часть IV

ФИЗИКА

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И СТРОЕНИЕ АТОМА

Перевод с английского

под редакцией
А. С. АХМАТОВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва 1974

530.1
Ф 50
УДК 530.10 (075.4)

АННОТАЦИЯ

Этой книгой издательство заканчивает второе издание американского курса физики для средней школы (первое издание вышло в 1965 г. в одной книге). В каждую часть курса в этом издании дополнительно включен перевод соответствующей части из «Методического руководства для преподавателей», содержащего разбор трудных мест курса. Курс состоит из четырех частей: I. «Вселенная», II. «Оптика и волны», III. «Механика», IV. «Электричество и строение атома». Части I и II вышли в 1973 г., часть III — в этом году.

В IV части «Электричество и строение атома» излагаются электростатика и магнетизм, рассмотрены атомистическая природа электрических сил, начала волновой механики, ядерной физики и физики твердого тела.

Книга явится полезным дополнением к существующим учебникам по физике. Она рассчитана на широкий круг читателей: учащихся средних школ, студентов техникумов, лиц, занимающихся самообразованием, представляет большой интерес для преподавателей физики.

© Перевод на русский язык, издательство «Наука», 1974.

Ф $\frac{20402\text{-}106}{053\ (02)\text{-}74}$ 105-74

ОГЛАВЛЕНИЕ *)

От редактора русского перевода 5

Глава 26. **Качественная характеристика электрических явлений** 7,*286*
26.1. Притяжение и отталкивание между наэлектризованными предметами (8,*289*). **26.2.** Электрические силы, действующие между составными частями вещества (9,*289*). **26.3.** Изоляторы и проводники (10,*291*). **26.4.** Несколько опытов с электроскопом (12,*291*). **26.5.** Электростатическая индукция (14,*291*). **26.6.** Усовершенствованные электроскопы и электрометры (17,*292*). **26.7.** Батареи (гальванические элементы) (19,*295*). **26.8.** Электрические токи (19,*295*). **26.9.** Проводимость газов. Ионизация (20,*297*). **26.10.** Конденсационная камера (22,*297*). **26.11.** Проводимость растворов (24,*297*). **26.12.** Электроны в металлах (25,*297*). **26.13.** Диоды. Электронные пушки. Осциллографы (27,*297*).
Домашние, классные и лабораторные задания 30,*300*

Глава 27. **Закон Кулона и элементарный электрический заряд** . . 32,*306*
27.1. Зависимость силы от расстояния (32,*308*). **27.2.** Электрический заряд и электрическая сила (33,*309*). **27.3.** Поля электрических сил (35,*310*). **27.4.** Измерение малых электрических сил (41,*315*). **27.5.** Элементарный заряд (46,*316*). **27.6.** Большие электрические весы (49,*318*). **27.7.** Постоянная в законе Кулона (51,*319*). **27.8.** Сохранение заряда (53,*321*). **27.9.** Электрический заряд электронов (54,*321*).
Домашние, классные и лабораторные задания 55,*322*

Глава 28. **Энергия и движение зарядов в электрических полях** . . 59,*329*
28.1. Определение масс электрона и протона (59,*331*). **28.2.** Электрический ток (66,*334*). **28.3.** Электролитическое измерение электрических токов (68,*334*). **28.4.** Опыты Томсона. Превращения энергии. Электрическая сила. Элементарные заряды (71,*337*). **28.5.** ЭДС и энергия, доставляемая батареей (73,*337*). **28.6.** Электрическое поле и потенциал (75,*338*). **28.7.** Батареи. Вольты и амперы (80,*342*). **28.8.** Состояние вопроса, рассмотренного в данной главе (83,*343*).
Домашние, классные и лабораторные задания 84,*343*

Глава 29. **Электрические цепи** 88,*352*
29.1. Проводники, батареи и разность потенциалов (88,*353*). **29.2.** Измерение разности потенциалов (95,*356*). **29.3.** Дальнейшая проверка сведений о разности потенциалов и энергии (96,*356*). **29.4.** Зависимость силы тока от разности потенциалов (97,*358*). **29.5.** Общее представление об электрической цепи (101,*359*).
Домашние, классные и лабораторные задания 106,*361*

Глава 30. **Магнитное поле** 111,*374*
30.1. Магнитная стрелка (111,*376*). **30.2.** Магнитные поля магнитов и токов. Линии магнитного поля (112,*376*). **30.3.** Сложение векторов, характеризующих магнитные поля (116,*377*). **30.4.** Силы, действующие на токи в магнитных полях. Единица магнитной индукции (118,*377*).

*) Курсивом указаны страницы соответствующих разделов Методического руководства. (*Прим. ред.*).

30.5. Измерительные приборы и электродвигатели (121,*378*). **30.6.** Силы, действующие на заряженные частицы, которые движутся в магнитном поле (123,*379*). **30.7.** Измерение масс заряженных частиц (126,*380*). **30.8.** Что представляют собой альфа-частицы? (128,*380*). **30.9.** Магнитное поле вблизи длинного прямого провода (130,*381*). **30.10.** Циркуляция вектора ***B*** (130,*381*). **30.11.** Однородные магнитные поля (133,*382*).
Домашние, классные и лабораторные задания 136,*382*

Глава 31. **Электромагнитная индукция и электромагнитные волны** 140,*392*
31.1. Наведенный или индукционный ток (140,*394*). **31.2.** Относительность движения (141,*394*). **31.3.** Переменный магнитный поток (143,*397*). **31.4.** ЭДС индукции (147,*399*). **31.5.** Направление ЭДС индукции (149,*399*). **31.6.** Электрические поля вокруг переменных магнитных потоков (149,*403*). **31.7.** Магнитные поля вокруг переменных электрических потоков (152,*404*). **31.8.** Механизм электромагнитного излучения (156,*405*). **31.9.** Доказательства существования электромагнитного излучения. Электромагнитный спектр (159,*405*).
Домашние, классные и лабораторные задания 163,*409*

Глава 32. **Исследование атома** 167,*420*
Введение (167,*422*). **32.1.** Отклонение альфа-частиц и модель атома Резерфорда (169,*423*). **32.2.** Траектории альфа-частиц в электрическом поле ядра (173,*425*). **32.3.** Угловое распределение рассеяния (176,*426*). **32.4.** Дальнейшие сведения о рассеянии (180,*426*). **32.5.** Трудности (183,*428*).
Домашние, классные и лабораторные задания 184,*431*

Глава 33. **Фотоны и волны вещества** 188,*442*
33.1. Зернистость света (188,*443*). **33.2.** Упорядоченность в случайности (192,*445*). **33.3.** Зернистость и интерференция света (194,*446*). **33.4.** Фотоэлектрический эффект (195,*447*). **33.5.** Объяснение фотоэлектрического эффекта Эйнштейном (198,*449*). **33.6.** Механика фотона. Количество движения фотона (202,*450*). **33.7.** Фотоны и электромагнитные волны (206,*452*). **33.8.** Волны вещества (209,*453*). **33.9.** Когда становится существенной волновая природа вещества? (215,*458*). **33.10.** Свет и вещество (218,*459*). **33.11.** Что же такое волны? (219,*461*).
Домашние, классные и лабораторные задания 220,*462*

Глава 34. **Квантовые системы и строение атомов** 224,*470*
Введение (224,*471*). **34.1.** Опыты Франка и Герца. Атомные уровни энергии (225,*471*). **34.2.** Последовательное возбуждение спектральных линий. Возбуждение и испускание (229,*474*). **34.3.** Спектры поглощения (234,*475*). **34.4.** Уровни энергии атома водорода (237,*477*). **34.5.** Происхождение уровней энергии (240,*478*). **34.6.** Волновая теория уровней энергии атома водорода (244,*479*). 34.7. Заключение (250,*482*).
Домашние, классные и лабораторные задания 251,*482*

Лабораторные работы 254,*487*
IV.1. Наэлектризованные тела (254,*488*). **IV.2.** Электростатическая индукция (254,*490*). **IV.3.** Сила взаимодействия между двумя заряженными шариками (255,*492*). **IV.4.** Сложение электрических сил (258,*494*). **IV.5.** Движущая сила и конечная скорость (259,*495*). **IV.6.** Опыт Милликена (261,*497*). **IV.7.** Заряд, переносимый ионами в растворе (262,*498*). **IV.8.** Заряд конденсатора (264,*502*). **IV.9.** Энергия, преобразуемая электродвигателем (265,*504*). **IV.10.** Магнитное поле тока (266,*506*). **IV.11.** Измерение индукции магнитного поля (268,*509*). **IV.12.** Масса электрона (270,*510*). **IV.13.** Магнитное поле вблизи длинного прямого провода (273,*512*). **IV.14.** Неупорядоченность радиоактивного распада (275,*515*). **IV.15.** Спектр водорода и постоянная Планка (275,*517*).

Методическое руководство 279

Приложения 520

ОТ РЕДАКТОРА РУССКОГО ПЕРЕВОДА

*Схему построения материала четвертой части курса физики Комитета содействия изучению физики *) «Электричество и строение атома» авторы, в основном, оставили без изменения. Во введении (гл. 26) излагаются общие предварительные сведения об электрических явлениях. Здесь, однако, наряду с традиционной феноменологией электростатики приводятся начальные сведения о проводимости газов, растворов и металлов. Далее рассматривается закон Кулона и учение об электрическом заряде (гл. 27), после чего излагается материал, характеризующий энергию и движение зарядов в электрических полях (гл. 28).*

Авторы ввели новую главу (гл. 29) «Электрические цепи», желая подчеркнуть практическую важность учения об электрических цепях. Гл. 30 «Магнитное поле» была существенно переработана и улучшена. Авторы, однако, остались при своем старом решении не вводить понятие магнитной индукции. Независимо от того, идет ли речь о напряженности или индукции магнитного поля, они применяют один и тот же термин «strength of field», что на русском языке в точности соответствует напряженности поля. Мы не могли пойти по этому пути, и поэтому в конце раздела 30.3 был введен термин «индукция магнитного поля», применявшийся и в дальнейшем всюду, где это было необходимо.

Заканчивается изложение учения об электричестве рассмотрением электромагнитной индукции и электромагнитных волн (гл. 31).

Строению атома посвящены три последние главы. Здесь сперва весьма обстоятельно обсуждается ядерная модель атома Резерфорда и его эксперимент по рассеянию α-частиц (гл. 32); в гл. 33 вводится понятие фотонов и представление о волнах материи, и в гл. 34

---

*) *См. «От редактора русского перевода», Физика, ч. I. Вселенная, перевод с англ., под ред. А. С. Ахматова, «Наука», 1973, стр. 5.*

рассматривается дискретность уровней энергии атомов на примере атома водорода

Четвертая часть курса во втором издании подверглась весьма значительной переработке: часть материала была исключена, другая — введена вновь. Вся эта работа, предпринятая авторами для улучшения последовательности, логичности и ясности изложения, не затронула, однако, общего духа и стиля книги.

Перевод четвертой части Учебника сделан Д. М. Толстым, а перевод четвертой части «Методического руководства» для преподавателей выполнен В. А. Алексеевым.

А. С. Ахматов

ГЛАВА

26 КАЧЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

В части III мы узнали, что каждое материальное тело притягивает любое другое материальное тело с силой, называемой гравитационной силой. Это гравитационное притяжение приводит к практически существенным последствиям только в тех случаях, когда по крайней мере одно из взаимодействующих тел обладает весьма большой массой, например является чем-либо вроде целой планеты.

Однако гравитационные силы не являются единственными силами, действующими между телами на расстоянии. Некоторые другие силы оказываются во много раз больше. Небольшой магнит поднимает со стола стальной гвоздь, преодолевая гравитационное притяжение всей Земли. Гребень, если потереть его рукавом, поднимает клочки бумаги. Это примеры соответственно магнитной и электрической сил.

Существование таких сил было известно еще в древности. Древние греки были знакомы с особыми свойствами магнетита — железной руды, являющейся природным магнитом. Слово «магнит» происходит от названия города Магнезия в Малой Азии, вблизи которого эта руда была найдена.

Утверждают также, что греческий философ Фалес около двадцати столетий назад наблюдал действие электрических сил. Он нашел, что янтарь, будучи натертым, притягивает легкие предметы. Слово «электричество» происходит от греческого слова «электрон» — янтарь.

Однако систематическое изучение электричества и магнетизма началось только со времени эпохи Возрождения, и физики не достигли ясного понимания этих вопросов вплоть до конца прошлого столетия. Вряд ли когда-либо научное достижение имело столь глубокие и далеко идущие последствия. Имеется бесчисленное множество практических применений учения об электричестве и магнетизме.

Использование электрической энергии и развитие электрических средств связи изменили весь наш образ жизни. В научном отношении мы узнали, что электрические силы определяют строение атомов и молекул. Электричество связано со многими биологическими процессами, например с действием наших нервов и мозга.

26.1. Притяжение и отталкивание между наэлектризованными предметами

Рассмотрим теперь некоторые основные электрические и магнитные явления и обсудим их истолкование.

Начнем с простого опыта. Натрем стеклянный стержень куском шелка и подвесим его в горизонтальном положении в петле из шелковой нити. Затем натрем второй стеклянный стержень и поместим его вблизи от первого. Оба стержня *отталкивают* друг друга. Повторим этот опыт с двумя стержнями из пластмассы, натертыми куском меха. Эти два стержня взаимно отталкиваются, как и стеклянные (рис. 26.1). Наконец, натрем стеклянный стержень шелком, а пластмассовый — мехом. Поместим один стержень в петлю, а другой поднесем к нему на близкое расстояние. Теперь мы увидим, что эти стержни *притягивают* друг друга.

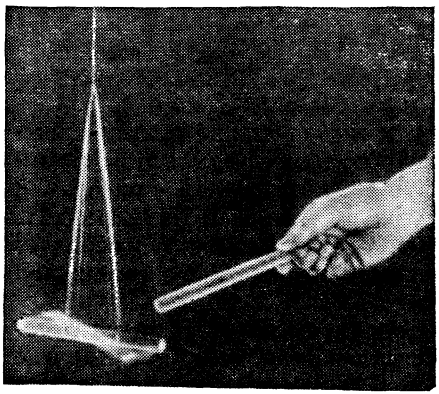


Рис. 26.1. При сближении два наэлектризованных пластмассовых стержня отталкиваются. Снимок сделан во время сближения стержней с большой выдержкой. Электрические силы оттолкнули ближний конец подвешенного стержня.

Подобные опыты можно провести с целым рядом других материалов. Предметы из одного и того же материала, наэлектризованные одинаковым способом, всегда взаимно отталкиваются. Различные наэлектризованные предметы могут взаимно притягиваться или отталкиваться.

Как мы видим, наэлектризованные предметы делятся на две группы. Существуют только два «электрических состояния»: одно, подобное состоянию стеклянного стержня, и другое, подобное состоянию пластмассового стержня в предыдущем примере. Следуя общепринятому обычаю, восходящему к Вениамину Франклину, мы говорим, что стеклянный стержень и все другие наэлектризованные предметы, ведущие себя подобным же образом, заряжены *положительно*. Вместе с тем мы говорим, что пластмассовый стержень и все другие наэлектризованные предметы, которые ведут себя таким же образом, заряжены *отрицательно**). Любые два положительно заряженных предмета отталкивают друг друга подобно двум наэлектризованным стеклянным стержням. Точно так же два отрицательно заряженных предмета взаимно отталкиваются. Любой положительно заряженный предмет притягивает любой отрицательно заряженный предмет.

*) Слова «положительный» и «отрицательный» применены здесь потому, что силы, с которыми соседние положительно и отрицательно заряженные предметы действуют на любое третье тело, стремятся взаимно уравновеситься.

26.2. Электрические силы, действующие между составными частями вещества

Мы знаем, что вещество построено из атомов и что сами атомы состоят из более мелких частей. Но до сих пор мы в этом курсе не встречались с вопросом о том, существуют ли такие предельно малые составные части, из которых состоят все атомы. Изучение электричества даст нам некоторые важные сведения по этому вопросу.

Прежде всего естественно считать, что сила, действующая между двумя предметами, представляет собой векторную сумму сил, действующих между их составными частями. Так как два наэлектризованных предмета притягивают или отталкивают друг друга, то мы предполагаем, что существуют подобные силы притяжения или отталкивания между некоторыми частями, из которых состоят оба предмета. Благодаря тому, что имеются электрически положительные и электрически отрицательные предметы, мы делаем допущение, что среди составных частей вещества имеются два вида частиц: *электрически положительные* и *электрически отрицательные*.

Две частицы одинакового знака взаимно отталкиваются, а две частицы противоположных знаков взаимно притягиваются. Некоторые из составных частей вещества принадлежат к третьей группе: например, нейтроны (раздел 23.8) не ведут себя ни как положительные, ни как отрицательные электрические частицы.

Хотя электрические силы, действующие между частицами, в огромное число раз больше гравитационных сил, действующих между теми же частицами, мы не наблюдаем заметного электрического взаимодействия между сближенными «незаряженными» предметами. Это не означает, однако, что следует отбросить представление о существовании положительных и отрицательных электрических частиц в этих предметах. Поскольку положительная и отрицательная частицы действуют на любую третью электрическую частицу с противоположно направленными силами, мы в праве сделать вывод, что силы, создаваемые двумя видами частиц, могут уравновешивать друг друга. Когда действия положительных и отрицательных частиц предмета полностью взаимно уничтожаются, мы говорим, что предмет незаряжен, или электрически нейтрален. Мы можем представить себе даже нейтральный атом*).

Если к электрически нейтральному предмету добавить несколько положительных частиц, то равновесие нарушается. Действие положительных частиц превышает действие отрицательных частиц; мы говорим, что предмет заряжен положительно. Можно также положительно зарядить предмет, удалив несколько отрицательных частиц и создав избыток положительных. Подобным же образом, нейтральный предмет можно сделать электрически отрицательным,

*) Если каждый малый объем тела нейтрален, то результирующая сила, действующая со стороны всех электрических частиц на любую электрическую частицу вне тела, равна нулю. Однако тело может быть нейтральным в целом, но содержать местные концентрации заряда. Тогда на заряженную частицу вблизи одной из таких местных концентраций зарядов будет действовать сила.

прибавив к нему несколько отрицательных частиц или отняв от него несколько положительных частиц.

Мы видели, что натирание стеклянного стержня делает стержень электрически положительным. Как это может произойти? Можно предположить две возможности: перенос положительных частиц от шелка к стержню или же перенос отрицательных частиц от стержня к шелку. В любом из этих случаев шелк должен стать электрически отрицательным, если стекло становится электрически положительным. Мы можем проверить этот вывод, поднося шелк к подвешенному стеклянному стержню. Оказывается, что стержень притягивается шелком. Точно так же шелк отталкивает отрицательно заряженный пластмассовый стержень.

26.3. Изоляторы и проводники

Во многих случаях различные материалы подразделяют, говоря, что один является проводником электричества (электрическим проводником), а другой — изолятором. Это деление основано на опытах, подобных тем, которые мы сейчас обсудим. Предположим, что легкий шарик с металлическим покрытием подвешен на шелковой нити. Расположим горизонтально металлический стержень на стеклянной или пластмассовой подставке так, чтобы одним концом он касался шарика (рис. 26.2, *а*). Наэлектризуем стеклянный стержень и проведем им по концу металлического стержня. В результате шарик отклонится (рис. 26.2, *б*). Повторим опыт, взяв вместо металлического стержня пластмассовый. Теперь шарик не отталкивается от стержня (рис. 26.2, *г*). Таким образом, мы видим, что металлический и пластмассовый стержни ведут себя различно.

Чтобы объяснить это различие, достаточно предположить, что в металле какие-то заряженные частицы могут свободно двигаться от одного конца к другому, в то время как в пластмассе нет таких заряженных частиц, которые могли бы свободно двигаться. Допустим, например, что свободные частицы в металле заряжены отрицательно. Когда положительно заряженный стеклянный стержень касается нейтрального металлического стержня, стекло вытягивает некоторое число свободных отрицательно заряженных частиц из металлического стержня и из шарика. Поэтому шарик и металлический стержень становятся положительно заряженными и отталкивают друг друга. Даже после удаления стекла будет иметь место недостаток отрицательно заряженных частиц как в металлическом стержне, так и в шарике, и они будут продолжать взаимно отталкиваться. С равным правом можно допустить, что свободные частицы заряжены положительно. Тогда, если коснуться металлического стержня наэлектризованным стеклянным стержнем, положительно заряженные частицы перейдут от стекла к металлу и, пройдя сквозь него, попадут на шарик. Снова металлический стержень и шарик оба станут положительно заряженными и будут взаимно отталкиваться.

Теперь представим себе, что случится, если металлический стержень заменить пластмассовым. В пластмассе ни положительные, ни

отрицательные частицы не могут свободно двигаться. Следовательно, только та часть стержня, которая находилась в непосредственном контакте с заряженным стеклом, приобретает избыток положительных частиц. Остальная часть стержня и шарик остаются электрически нейтральными. Поэтому не возникнет силы, отталкивающей шарик от стержня.

Вещества, ведущие себя в таких опытах подобно металлу, называются *проводниками*. Вещества, ведущие себя подобно пластмассе,

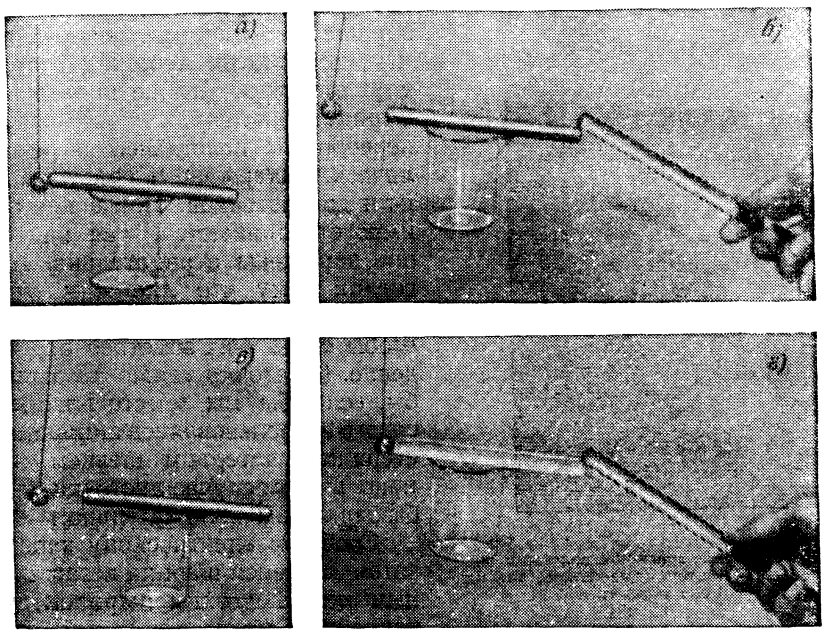


Рис. 26.2. *а*) Металлический стержень на стакане соприкасается с легким металлическим шариком. *б*) Мы касаемся конца металлического стержня заряженным стеклянным стержнем, и шарик на другом конце отталкивается. *в*) После удаления заряженного стержня металлический стержень все еще отталкивает шарик. *г*) Повторяем опыт с пластмассовым стержнем, кладя его на стакан вместо металлического. Шарик неподвижен.

называются *изоляторами*. Все проводники, в отличие от изоляторов, содержат свободно движущиеся электрически заряженные частицы.

К концу этой главы мы узнаем, как определять знак заряда свободно движущихся частиц в различного типа проводниках. Мы увидим, что когда проводниками являются жидкости и газы, то движутся как положительно, так и отрицательно заряженные частицы. В металлах же проводимость обусловлена только движением электрически отрицательных частиц. Для краткости обсуждения в следующих нескольких разделах мы будем молчаливо предполагать, что движутся только отрицательно заряженные частицы.

26.4. Несколько опытов с электроскопом

Электроскоп представляет собой прибор для обнаружения присутствия электрического заряда. Простейшим типом этого прибора является вышедший из употребления электроскоп с золотыми листочками. Он состоит из двух полосок золотой фольги, подвешенных к металлическому стержню в стеклянной колбе (рис. 26.3). Объясним теперь, как он работает.

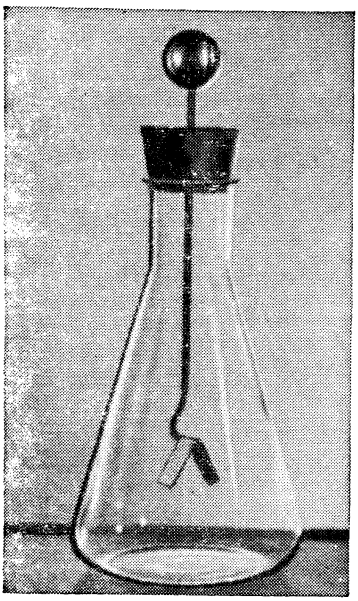


Рис. 26.3. Электроскоп с золотыми листочками. Листочки разошлись, так как они заряжены.

Если коснуться шарика на верхнем конце металлического стержня заряженным пластмассовым стержнем, то золотые листочки отойдут друг от друга. Что же произошло? Отрицательно заряженные частицы перешли от пластмассы на металлический стержень и сразу же дошли до листочков. Последние взаимно отталкиваются, так как оба они заражены отрицательно. Благодаря тому, что листочки очень легки, достаточно малого заряда, чтобы создать их заметное расхождение. (Листочки также разошлись бы, если бы мы вместо пластмассового воспользовались стеклянным стержнем, натертым шелком. Однако в этом случае листочки были бы заряжены положительно.)

Сообщим электроскопу заряд и затем коснемся шарика незаряженным металлическим шариком, укрепленным на изолирующей ручке (рис. 26.4). Листочки немного сблизятся, так как убрана часть заряда. Заряд распределился между электроскопом и шариком. Повторим этот опыт с шариком еще бóльших размеров. Листочки еще больше сблизятся, потому что больший шарик отнимет бóльшую долю заряда. То же самое произойдет, если соединить проволокой шарик электроскопа и большой шарик. Часть заряда по проволоке перейдет к большому шарику. При достаточно большом шарике на него перейдет практически весь заряд, и электроскоп останется со столь малым зарядом, что листочки соединятся. Можно воспользоваться самым большим из всех шаров, имеющихся в нашем распоряжении,— земным шаром. Если присоединить заряженный электроскоп к земле, то уйдет практически весь заряд — останется слишком мало, чтобы можно было его обнаружить. Этот процесс передачи заряда земле часто называется «заземлением»*).

*) В земной коре имеются непроводящие включения: пески пустынь, некоторые скальные породы и т.д. Но все же в земной коре преобладают проводящие электри-

Каждый из нас по размерам меньше земного шара, но мы также представляем собой проводники. Если вы зарядите электроскоп и затем коснетесь шарика пальцем, то листочки соединятся. Если первоначально на металлическом стержне и листочках был избыток отрицательных частиц, то некоторые из этих частиц должны были перейти в ваше тело. Они прошли сквозь ваше тело в землю. Но даже в том случае, если ваша обувь является изолятором, листочки

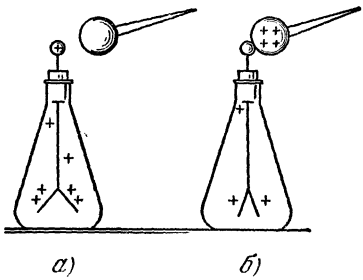


Рис. 26.4. *а*) Заряженный электроскоп с листочками, сильно отталкивающими друг друга. *б*) Мы коснулись шарика другим металлическим шариком на изолирующей ручке. Заряд теперь поделился между электроскопом и вторым шариком, и листочки значительно сблизились.

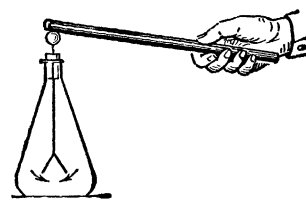


Рис. 26.5. Когда вы касаетесь шарика заряженного электроскопа графитовым стержнем, листочки сближаются.

электроскопа сблизятся. В этом случае вы поделили заряд между собой и маленьким электроскопом.

Если электроскоп заряжен положительно, то вы все же разрядите его, коснувшись шарика. Некоторое число отрицательных частиц перейдет от вас к электроскопу, нейтрализуя положительный заряд на листочках. Мы заключаем из этих опытов, что в обоих случаях человеческое тело является проводником электричества.

Мы можем выяснить, какие другие вещества являются проводниками. Допустим, например, что мы снова зарядили электроскоп и коснулись шарика графитовым стержнем из карандаша (рис. 26.5). Листочки сразу же соединятся, показывая, что графит также представляет собой проводник. С другой стороны, листочки заряженного электроскопа не шевельнутся, если коснуться шарика незаряженным стеклом, эбонитом, фарфором или пластмассой. Эти вещества являются изоляторами. Если коснуться шарика деревянной спичкой, то листочки соединятся, но очень медленно. По-видимому, в дереве могут двигаться какие-то заряженные частицы, но не так свободно, как в металлах; дерево оказывает значительно большее «сопротивление» движению заряженных частиц, чем металлы.

чество материалы, которые быстро распределяют заряд по всему земному шару. Чтобы была уверенность в соединении прибора именно с проводящей частью грунта, нередко осуществляют заземление через металлические трубы, например через водопроводную систему.

26.5. Электростатическая индукция

Можно и не прикасаться к проводнику для того, чтобы привести в движение заряды в нем. Возьмем два металлических стержня на изолирующих подставках. Приведем их в соприкосновение так, чтобы они образовали один длинный проводник, как показано на рис. 26.6, *а* и 26.7, *а*. Затем поднесем близко к одному концу проводника положительно заряженный стеклянный стержень. Положительный заряд на стеклянном стержне притянет отрицательные заряды на проводнике и оттолкнет положительные заряды. В результате ближний (к стеклянному стержню) конец проводника приобретет избыток отрицательно заряженных частиц, а дальний конец — положительный заряд. Теперь, не убирая стеклянный стержень, разделим два металлических стержня, раздвинув изолирующие подставки (рис. 26.6, *б* и 26.7, *б*). Ближний стержень должен иметь отрицательный заряд, а дальний — положительный. Мы можем проверить этот вывод, убрав стекло и поднеся легкий положительно заряженный шарик, подвешенный на нити. Мы увидим, что ближний стержень притягивает заряженный шарик, а дальний его отталкивает (рис. 26.6, *в* и 26.7, *в*).

Разделение положительных и отрицательных зарядов в проводнике, вызванное присутствием вблизи него заряженного предмета, называется *электростатической индукцией*; местные избытки положительного и отрицательного заряда, собирающиеся в различных областях проводника, называются индуцированными (или наведенными) зарядами.

Электростатическая индукция позволяет применять электроскоп для обнаружения присутствия заряда без перенесения заряда на электроскоп. Можно даже определить знак заряда. Для этого зарядим электроскоп, например положительно. Затем приблизим неизвестный исследуемый заряд к шарику электроскопа. Если заряд положителен, то он наведет на шарике отрицательный заряд и таким образом увеличит положительный заряд на листочках. Вследствие этого листочки разойдутся еще больше (рис. 26.8, *а*). Если, наоборот, неизвестный заряд отрицателен, то индукция произведет обратное действие. Положительный заряд на листочках уменьшится и листочки сблизятся (рис. 26.8, *б*).

Электростатическая индукция позволяет также объяснить силу притяжения, с которой наэлектризованный предмет действует на нейтральный проводник. Предположим, что наэлектризованный предмет A заряжен положительно (рис. 26.9). Он индуцирует отрицательный заряд на ближайшей к нему части проводника и положительный заряд — на удаленной части. Отрицательный индуцированный заряд притягивается к положительному заряду на A, а положительный индуцированный заряд отталкивается. Однако отталкивание слабее притяжения, потому что положительный индуцированный заряд находится на большем расстоянии от A, чем отрицательный. В результате возникает сила, действующая на проводник и притягивающая его к A.

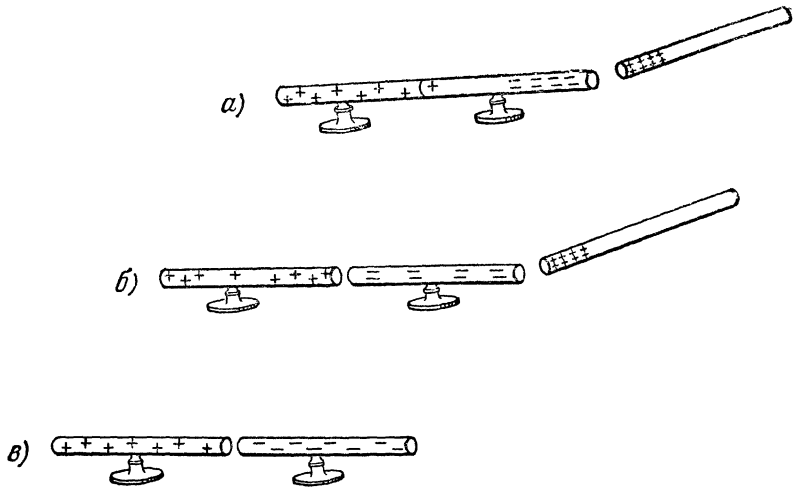
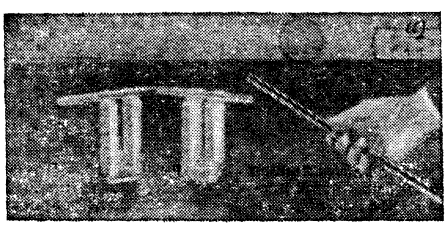
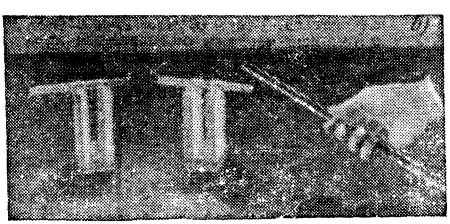


Рис. 26.6. Электростатическая индукция. *а*) Два металлических стержня соприкасаются; поблизости находится положительно заряженный стеклянный стержень. Отрицательные частицы притягиваются вправо, оставляя слева положительный заряд. *б*) Стержни разделены, но стеклянный стержень все еще находится поблизости. Стержень справа имеет отрицательный заряд, стержень слева — положительный. *в*) Стержни сохраняют свои заряды даже после удаления заряженного предмета.





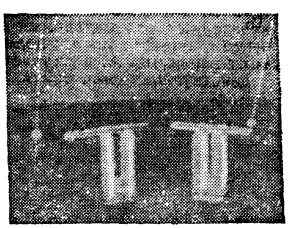


Рис. 26.7. Электростатическая индукция. *а*) Металлические стержни соприкасаются; поблизости находится положительный заряд. *б*) Стержни разделены. *в*) Мы проверяем заряд на каждом стержне с помощью положительно заряженного шарика. Стержень слева отталкивает шарик — он заряжен положительно. Стержень справа притягивает — он заряжен отрицательно.

Между нейтральным изолятором и расположенным вблизи него зарядом существует подобная же, но меньшая сила притяжения. В изоляторе ни положительные, ни отрицательные частицы не могут

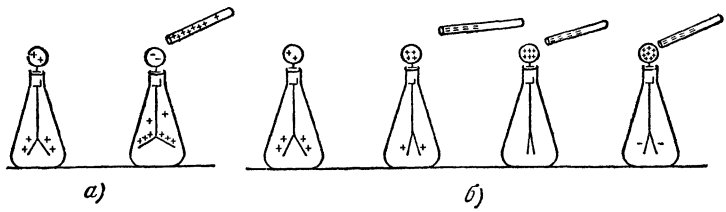


Рис. 26.8. Применение электроскопа для обнаружения заряда и определения его знака. *а*) Мы подносим положительный заряд к положительно заряженному электроскопу. Листочки раздвигаются еще больше. *б*) Мы постепенно приближаем отрицательный заряд к положительно заряженному электроскопу. Все больше отрицательных зарядов отталкиваются к листочкам, и последние сближаются. Наконец, когда большой отрицательный заряд очень близок, на листочки переходит так много отрицательных зарядов, что листочки заряжаются отрицательно. При этом они снова расходятся.

свободно уходить от своих атомов, но они могут сдвигаться на небольшие расстояния. Можно представить себе изолятор состоящим из положительно заряженных частиц, как бы прибитых гвоздями, так что они в изоляторе всегда остаются на месте, а отрицательные

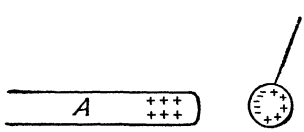


Рис. 26.9. Притяжение нейтрального проводника. Когда нейтральный проводник находится вблизи положительно заряженного предмета *A*, отрицательные частицы притягиваются к концу, ближайшему к положительному заряду. На другом конце проводника останется положительный заряд. Благодаря тому, что наведенный отрицательный электрический заряд ближе к положительному заряду на *A*, возникает равнодействующая сила притяжения.

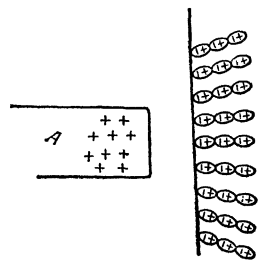


Рис. 26.10. Притяжение нейтрального изолятора. Положительно заряженный предмет *A* находится вблизи незаряженного изолятора. Заряженные частицы, которые могли бы свободно двигаться внутри изолятора, здесь отсутствуют, но в каждой молекуле положительные и отрицательные частицы могут немного сдвигаться. Таким образом, все отрицательные частицы оказываются несколько ближе к положительному заряду на *A* и снова возникает сила притяжения.

частицы удерживаются вблизи положительных пружинками. Пружинки не позволяют отрицательным частицам сдвигаться на большие расстояния. Но когда мы подносим близко к изолятору положительно заряженный предмет *A*, то отрицательные частицы к нему притягиваются. При этом они удаляются на малые расстояния от

положительных частиц по направлению к притягивающему их предмету A (рис. 26.10). Так как отрицательные частицы немного ближе к положительно заряженному предмету, чем их положительные соседи, то действующая на них сила притяжения несколько превышает силу отталкивания, действующую на положительные частицы. В результате между изолятором и положительно заряженным предметом возникает сила притяжения.

26.6. Усовершенствованные электроскопы и электрометры

Когда золотые листочки подвешены в стеклянной колбе (как показано на рис. 26.3), электроскоп чувствителен к любым зарядам, находящимся где-либо поблизости от него. Такие заряды создают

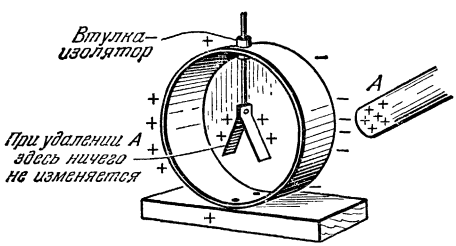


Рис. 26.11. Когда заряженный предмет A подносится близко к электроскопу с защитой, на кожухе индуцируются заряды. Внутри кожуха силы, создаваемые индуцированными зарядами, в точности компенсируют силы, создаваемые внешним зарядом. Проверьте это на опыте.

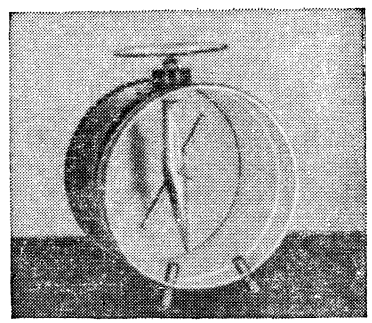


Рис. 26.12. Простой электроскоп с металлическим кожухом, сделанным из кофейной банки. Вместо металлических листочков — соломинка с металлическим покрытием; она подвешена на булавке, продетой через два отверстия в подвеске.

силы, действующие на листочки как непосредственно (когда листочки заряжены), так и вследствие электростатической индукции. Однако для многих целей предпочтительнее электроскоп, реагирующий только на заряды, находящиеся на листочках или вблизи шарика.

Нежелательные электрические эффекты можно устранить, заменив стеклянную колбу металлическим кожухом и применив втулку, изолирующую листочки от кожуха в электрическом отношении. Предположим, что мы поднесли к электроскопу с металлическим кожухом положительно заряженный предмет A (рис.26.11). Заряд на A индуцирует отрицательные заряды на ближней стороне металлического кожуха, а положительные заряды — на противоположной стороне. Опытным путем можно установить, что если электроскоп полностью окружен металлической защитой, то на листочки не будет влиять присутствие или отсутствие наружных зарядов. Индуцированные на кожухе заряды создают силы, действующие на листочки, и эти силы уравновешивают силу, создаваемую положительным зарядом на A. Электроскоп с металлической защитой является, таким

образом, гораздо более надежным прибором, чем прибор в стеклянной колбе. Он нечувствителен к посторонним воздействиям. Вы можете сами изготовить электроскоп с защитой, подобный приведенному на рис. 26.12.

Иногда требуется обнаружить заряды, которые меньше зарядов, вызывающих заметную реакцию обыкновенного электроскопа с золотыми листочками. Видоизменив конструкцию — изготовив подвижную часть из легкой проводящей нити, изменив форму стержня и уменьшив размеры,— можно построить значительно более чувствительные электроскопы. Каждый такой чувствительный прибор имеет для защиты металлический кожух и более чувствительную деталь, заменяющую стержень с листочками нашей простой модели. Мы будем называть любую такую чувствительную деталь стержнем электроскопа. С хорошо сконструированным стержнем в хорошем металлическом кожухе можно измерять тысячные и еще меньшие доли заряда, обнаруживаемого с помощью обыкновенного электроскопа с золотыми листочками.

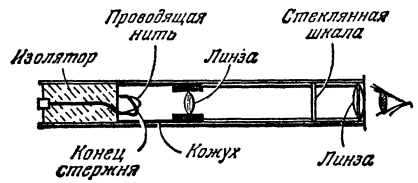


Рис. 26.13. Схема радиационного дозиметра, в котором высокая чувствительность достигается с помощью стержня, изготовленного из легкой проводящей нити малых размеров.

Чувствительные электроскопы широко распространены. Радиационные дозиметры (рис. 26.13), применяемые для обнаружения радиоактивного излучения, являются в действительности чувствительными электроскопами. Они снабжены шкалой, позволяющей производить отсчеты положения нити, заменяющей листочки нашего простого прибора. (Электроскоп со шкалой обычно называется *электрометром*.) Когда дозиметр заряжается, нить перемещается по шкале. Дальнейшее заряжение передвигает ее по шкале дальше, а разряжение перемещает ее в противоположном направлении.

При конструировании электрометра мы использовали металлическую защиту. Тот факт, что металлический экран электрически разделяет все пространство на две части, имеет бóльшее значение, чем улучшение конструкции самого прибора. Возможность защиты от зарядов, находящихся вне экрана, дает нам информацию об электрических силах. Дело в том, что детальным анализом можно показать, что полное уничтожение действия зарядов вне экрана получается только в случае сил, убывающих обратно пропорционально квадрату расстояния. Опыт Кулона, который мы рассмотрим в следующей главе, непосредственно показывает, что электрические силы принадлежат к этому типу.

26.7. Батареи (гальванические элементы)

Натирание друг о друга двух предметов (таких, как стержень из пластмассы и шерстяная ткань) не является единственным способом отделения положительно заряженных частиц от отрицательно заряженных. Батареи (и другие электрические генераторы) являются, в сущности говоря, устройствами для разделения зарядов.

Разделение зарядов, созданное достаточным числом батарей, может быть обнаружено хорошим электроскопом с золотыми листочками (рис. 26.14). Пара батарей, применяемых в радиоприемниках, может зарядить нитяной электрометр так, что нить отклонится на всю шкалу.

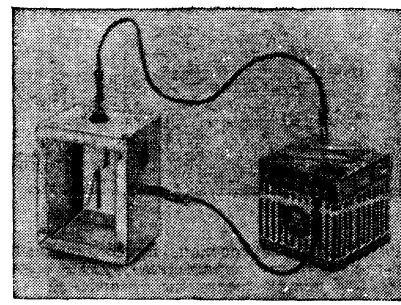


Рис. 26.14. Зарядка электроскопа с помощью батарей. Три анодные радиобатареи, необходимые для создания отклонения листочков, эквивалентны 180 карманным батарейкам, соединенным последовательно. Действие одной батарейки от карманного фонаря нельзя было бы обнаружить.

Заряд, сообщаемый электроскопу батареей, принадлежит к тому же виду электричества, которое мы получали от натертого стеклянного стержня или другого заряженного предмета. Когда положительный полюс батареи присоединен к стержню электроскопа, а отрицательный — к металлическому кожуху, стержень приобретает заряд того же знака, т. е. положительный заряд. Когда батарея соединена с электроскопом в обратном порядке, то стержень оказывается заряженным отрицательно; эти отрицательные заряды можно нейтрализовать частью положительного заряда натертого стекла.

Следовательно, батарея представляет собой сложное химическое устройство, которое посылает положительные заряды к положительному полюсу и отрицательные заряды к отрицательному полюсу, вопреки электрическим силам притяжения, стремящимся свести эти заряды вместе. Если присоединить полюсы батареи к металлическому кожуху и стержню электроскопа, то кожух и стержень приобретут противоположные заряды. Заряды быстро накапливаются до тех пор, пока через короткий промежуток времени силы, направляющие заряды обратно к батарее, не начнут компенсировать силы, создаваемые химическим действием, которые выталкивают заряды из батареи.

26.8. Электрические токи

Как мы видели, можно зарядить электроскоп, присоединив стержень и металлический кожух к полюсам батареи. Если отсоединить батарею, то электроскоп остается заряженным. Но если затем соединить стержень с металлическим кожухом металлической проволокой, то электроскоп быстро разрядится. Заряженные частицы

должны были пройти по проволоке, соединяющей стержень и кожух. Мы предполагаем, что это отрицательные частицы.

Предположим теперь, что батарея остается соединенной с электроскопом. Если мы соединим стержень с кожухом плохо проводящей проволокой (рис. 26.15), то электроскоп останется частично заряженным*). Теперь в проволоке имеется непрерывный поток заряженных частиц. По мере того, как отрицательные частицы достигают положительного полюса батареи, они компенсируют там часть положительного заряда; покидая отрицательный полюс батареи, они уносят с нее отрицательный заряд. Но батарея обеспечивает подачу зарядов к полюсам. Химические изменения непрерывно гонят отрицательно заряженные частицы через батарею (внутри нее) от положительного полюса к отрицательному (или положительные частицы в противоположном направлении). Скорость, с которой батарея перемещает свои заряды, определяется скоростью, с которой заряды вне батареи текут по проволоке и компенсируются.

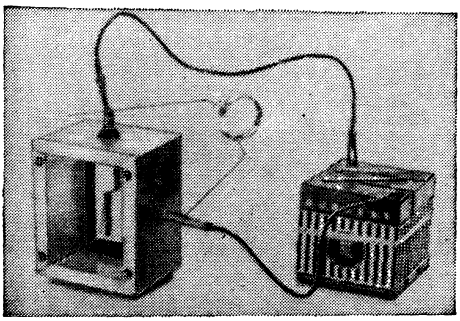


Рис. 26.15. Электроскоп, присоединенный к батарее, остается заряженным, даже если стержень и кожух соединены проволокой высокого сопротивления. Так как проволока очень тонка и длинна, то она намотана на кольцо. При отсоединении батареи электроскоп разрядится.

Поток заряженных частиц в проводнике называется *электрическим током*. В частности, постоянный поток электрических частиц, создаваемый батареей, называется *постоянным током*.

Электрические токи производят различные действия. Например, металлическая проволока, по которой проходит достаточно большой ток, нагревается. Можно изготовить приборы для обнаружения этих действий и таким образом измерять электрические токи. Электрический ток и его измерение подробнее рассмотрены в следующих разделах и в гл. 28.

26.9. Проводимость газов. Ионизация

Зарядим электроскоп, присоединив, например, стержень к положительному полюсу батареи, а кожух — к отрицательному. Электроскоп, конечно, заполнен воздухом. Что происходило бы, если бы некоторые молекулы воздуха были заряжены положительно, а некоторые — отрицательно? Положительные молекулы притягивались бы к отрицательно заряженному кожуху, а отрицательные молекулы — к положительно заряженному стержню. Приток электрически отрицательных молекул нейтрализует избыток положитель-

*) Для этого пригодна длинная тонкая проволока из хромоникелевого сплава.

ных частиц, имеющихся на стержне, и электроскоп должен был бы разрядиться (рис. 26.16).

Однако ничего подобного не происходит. При обычных условиях электроскоп длительное время остается заряженным. Газ внутри него является эффективным изолятором. Это значит, что молекулы воздуха *электрически нейтральны*. Точно так же, если наполнить электроскоп другими газами, такими, как двуокись углерода, гелий, аргон и др., всегда получается тот же результат, даже когда

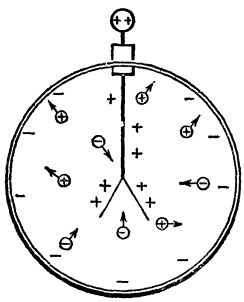


Рис. 26.16. Если воздух содержит положительно и отрицательно заряженные частицы, то заряд на электроскопе быстро нейтрализуется. В обычных условиях этого не наблюдается, но воздух можно ионизовать.

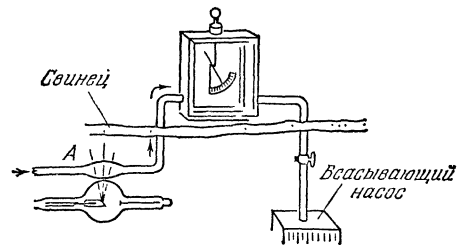


Рис. 26.17. Рентгеновские лучи ионизуют воздух в трубке *A*. Когда этот воздух, содержащий ионы, попадает в электроскоп, листочки сближаются.

газы одноатомны. Следовательно, целые молекулы, включая и такие, которые являются отдельными атомами, электрически нейтральны.

Теперь поднесем к заряженному электроскопу какой-нибудь радиоактивный материал или направим на него пучок рентгеновских лучей. Электроскоп будет постепенно разряжаться. Однако если мы удалим радиоактивный материал (или перекроем пучок рентгеновских лучей), прежде чем электроскоп потеряет весь свой заряд, он перестанет разряжаться.

Эти результаты можно объяснить, предположив, что рентгеновские лучи или излучение от радиоактивного материала разбивают молекулы газа на электрически заряженные осколки. Часть этих осколков может быть тождественной с мельчайшими элементами материи, о которых мы уже говорили. Другие могут состоять из нескольких таких частиц. Некоторые могут представлять заряженные осколки молекулы, присоединившиеся к нейтральным молекулам, образовав таким образом более тяжелые заряженные частицы. Заряженные осколки молекул или более сложные образования называются *ионами*; газ, содержащий ионы, называется *ионизованным*.

Обычный газ является изолятором, ионизованный же газ ведет себя подобно проводнику. Положительно заряженный предмет,

погруженный в ионизованный газ, притягивает отрицательные ионы. Во всех случаях ионы, приходя в соприкосновение с предметом, постепенно нейтрализуют первоначальный заряд.

Мы можем проделать много опытов, показывающих, что проводимость газа является результатом ионизации. Например, мы можем убедиться, что разряд электроскопа, помещенного на пути пучка рентгеновских лучей, не обусловлен непосредственным действием рентгеновских лучей на шарик электроскопа. Опыт, изображенный на рис. 26.17, показывает, что рентгеновские лучи действуют на газ. В этом опыте воздух накачивается в электроскоп через трубку, часть которой можно облучать. Зарядим электроскоп и пустим в ход насос. Затем включим источник рентгеновских лучей. Электроскоп начинает разряжаться, потому что ионы, образованные рентгеновскими лучами, вносятся в электроскоп потоком воздуха. Не выключая рентгеновского аппарата, остановим насос; при этом останавливается поток воздуха, и ионы, образующиеся в трубке, больше не достигают электроскопа. Постепенный разряд электроскопа также прекращается.

В начале этого раздела мы говорили, что газы обычно являются хорошими изоляторами. Можно сказать, что в отсутствие ионизующего излучения они являются идеальными изоляторами. Однако в действительности небольшое количество излучения имеется всюду. Многие из окружающих нас материалов содержат ничтожные следы радиоактивных веществ. Если бы мы даже смогли исключить излучение от материалов вблизи нас, то ионы все равно создаются космическими лучами. Даже весьма толстые экраны, изготовленные из свободных от радиоактивности материалов, являются недостаточной защитой от этих проникающих излучений, возникающих за пределами нашей атмосферы. Поэтому газы всегда немного ионизованы и таким образом являются слабо проводящими. Однако эта проводимость столь мала, что ее можно обнаружить только с помощью очень чувствительных приборов.

26.10. Конденсационная камера

На рис. 1.5 и 8.3 в части I показаны видимые следы, оставленные быстро движущимися частицами в жидкости пузырьковой камеры, нагретой почти до кипения, и в фотографической эмульсии. Эти следы создаются только быстро движущимися *заряженными* частицами. Каждый трек (след) представляет собой косвенный результат действия электрических сил, с которыми пролетающая заряженная частица влияет на атомы жидкости или эмульсии.

Таким образом, с помощью методов пузырьковой камеры и фотоэмульсии мы можем «видеть» пути заряженных частиц в газах (рис. 26.18).

Частицы оставляют след в виде положительных и отрицательных ионов. Принцип действия конденсационной камеры основан на более легкой конденсации паров вокруг таких ионов, чем в пространстве, лишенном ионов.

Один из типов конденсационной камеры, называемой диффузионной камерой, показан на рис. 26.19. Простой ее вариант состоит из полого цилиндрического сосуда, установленного на большом куске твердой углекислоты. Дно камеры подвергается охлаждению, между тем как прозрачная крышка находится при более высокой температуре. На внутренней поверхности верхней части камеры имеется прокладка, смоченная спиртом. Спирт непрерывно испаряется с этой прокладки и конденсируется на холодном дне. Дно камеры зачернено, чтобы белые туманные треки (следы пролета частиц) были ясно видны сверху при боковом освещении. Непосредственно над дном находится область, где пары спирта самопроизвольно не конденсируются, но будут конденсироваться вокруг любого образовавшегося иона. Когда заряженная частица пролетает через эту область, ее след становится видимым. Камеру этого типа можно дешево изготовить, и она может действовать непрерывно. С ее помощью можно заметить случайное прохождение заряженной космической частицы. Поместив в камеру небольшое количество радиоактивного материала, можно наблюдать треки заряженных осколков, испускаемых при радиоактивном распаде (рис. 26.20).

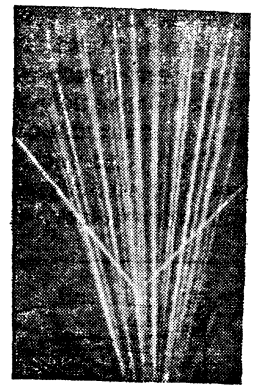


Рис. 26.18. Фотоснимок показывает пути альфа-частиц в камере, наполненной гелием.



Рис. 26.19. Простейшая диффузионная камера. Радиоактивный препарат ничтожно малых размеров помещается в ушке иглы, укрепленной в корковой пробке.



Рис. 26.20. Треки альфа-частиц в диффузионной камере.

26.11. Проводимость растворов

Некоторые жидкости являются проводниками электричества, другие — изоляторами. Особенно интересно поведение воды и водных растворов. Чтобы экспериментально изучить это поведение, воспользуемся установкой, показанной на рис. 26.21. Соединим последовательно металлическую пластинку, прибор для измерения силы электрического тока, батарею и вторую металлическую пластинку. Затем погрузим металлические пластинки (называемые электродами) в стакан с водой.

Если вода чистая, то прибор не обнаружит электрического тока. Так как молекулы в жидкости движутся свободно, то отсутствие тока доказывает, что молекулы воды электрически нейтральны.

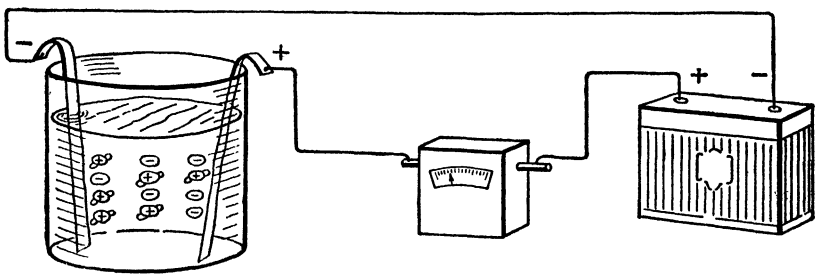


Рис. 26.21. Прибор для изучения электрической проводимости жидкости. Когда в воде растворена соль, измерительный прибор показывает наличие тока. Заряд переносится через раствор положительными и отрицательными ионами.

Если мы растворим в воде немного поваренной соли, то прибор покажет наличие тока в цепи. То же самое происходит и со многими другими химическими соединениями, например с соляной и серной кислотой, сернокислой медью, хлористым калием и др. Проводимость этих растворов можно объяснить, предположив, что поваренная соль (или другое растворенное вещество) расщепляется на положительно и отрицательно заряженные осколки, которые мы будем называть положительными и отрицательными ионами. Это объяснение весьма сходно с объяснением электрической проводимости в газах. Однако в жидкостях, в отличие от газов, не нужен посторонний ионизующий агент. Ионы образуются в результате самопроизвольного расщепления растворенного вещества.

Убедительное подтверждение нашего объяснения электрической проводимости растворов мы получаем, наблюдая явления, происходящие на электродах. Если у нас имеется медная соль (например, сернокислая медь), растворенная в воде, то при наличии электрического тока отрицательный электрод постепенно покрывается медной пленкой. Если же вместо этого наполнить сосуд раствором соли серебра (например, азотистого серебра), то мы увидим, что отрицательный электрод начнет покрываться серебряной пленкой. Это заставляет предположить, что сернокислая медь или азотистое серебро расщепляются в растворе и что атомы *металла* переносятся

положительными ионами. Движение этих ионов связано с доступным наблюдению переносом вещества.

Описанное здесь явление известно под названием *электролиза*. Обычно он применяется для электролитических покрытий (гальванопластика, гальваностегия) и в других производственных процессах, таких, как очистка меди, получение газообразного водорода и производство алюминия. В разделе 28.3 мы увидим, как используется электролиз для измерения электрического тока.

26.12. Электроны в металлах

Металлы являются наиболее распространенным видом проводников. Какого же сорта заряженные частицы могут свободно в них двигаться, делая их проводящими? Обладают ли эти частицы положительным или отрицательным зарядом или же тем и другим? Нет такого опыта, который ответил бы на этот вопрос в такой же отчетливой форме, как в случае проводящих газов и жидкостей. Однако одно наблюдение дает нам весьма обещающий ключ к разгадке; вместе с другими данными оно приводит к исчерпывающему ответу.

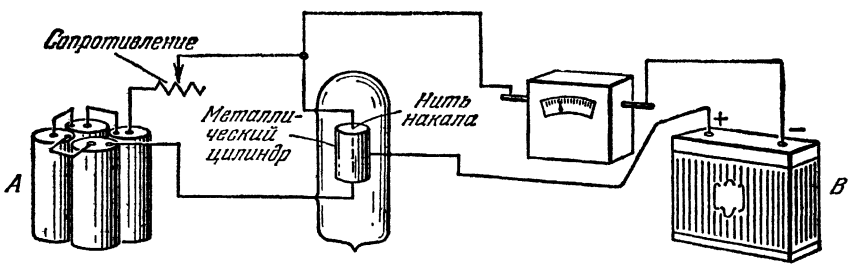


Рис. 26.22. Прибор для исследования природы электрической проводимости в металлах. Электрический ток от батареи накала *A* нагревает нить. Температуру нити можно повысить, уменьшая сопротивление в цепи батареи накала *A*. Измеритель тока, присоединенный к батарее *B*, дает показания, когда ток течет через пространство между нитью и цилиндром.

Естественно предположить, что заряженные частицы в металлах участвуют в тепловом движении подобно молекулам газа (см. гл. 9 и 25). Опыты показывают, что заряженный кусок металла, находящийся в вакууме, сколь угодно долго сохраняет свой заряд. Следовательно, заряженные частицы при обычных условиях не могут покидать металл. Отсюда мы заключаем, что когда движущиеся частицы оказываются вблизи поверхности металла, на них действуют силы, препятствующие их вылету и втягивающие их обратно в металл.

Теперь нагреем металл. С повышением температуры скорости частиц должны возрасти, как это происходит со скоростями молекул газа. При достаточно высоких температурах значительная доля частиц должна обладать скоростями, достаточными для вылета. Подобно ракетам, движущимся достаточно быстро для того, чтобы преодолеть гравитационное притяжение Земли, эти быстро движущиеся частицы могут выходить за пределы действия сил притяжения.

С прибором, показанным на рис. 26.22, мы можем провести опыты, позволяющие увидеть, что же именно происходит при нагревании металла. Существенную часть этой установки представляет полый металлический цилиндр с тонкой металлической нитью, укрепленной вдоль его оси. Цилиндр с нитью впаяны в стеклянный сосуд, который тщательно откачан. Для нагрева нити присоединим ее к батарее накала *A*. Присоединим также нить через измеритель тока к отрицательному полюсу батареи *B*. Положительный полюс батареи *B* присоединен к цилиндру.

Пока нить находится при обычных температурах, в цепи батареи *B* нет тока. Но если постепенно повышать температуру нити, то измеритель отметит появление тока, показывая, что заряженные частицы проходят через безвоздушное пространство между нитью и цилиндром. По мере повышения температуры нити, которая от оранжевого свечения перейдет к белому, ток будет очень быстро возрастать.

Повторим опыт, изменив в обратном порядке соединение с батареей *B*. Цилиндр теперь заряжен отрицательно, а нить — положительно. В этом случае прибор не покажет наличия тока, даже если нагреть нить до белого каления.

Что означают эти результаты? Предположим сначала, что горячая нить испускает *отрицательные* частицы. Когда нить заряжена отрицательно, а цилиндр положительно, то эти частицы отталкиваются нитью и притягиваются цилиндром. Следовательно, они движутся от нити к цилиндру; затем они переходят по металлической проволоке к положительному полюсу батареи и от отрицательного полюса через металлическую проволоку — снова к горячей нити. Таким образом, испускание нитью отрицательных частиц действительно перекидывает мост между нитью и цилиндром, так что в цепи наблюдается устойчивый ток.

Предположим теперь, что нить испускает *положительные* частицы. Они образуют мост, если нить заряжена положительно, а цилиндр — отрицательно; тогда мы наблюдали бы ток в цепи батареи *B*. Следовательно, тот факт, что при положительно заряженной нити ток отсутствует, доказывает, что нить не испускает положительных частиц. Отсюда мы делаем вывод, что все заряженные частицы, вылетающие из нагретого металла, заряжены *отрицательно*.

Естественно, мы приходим к убеждению, что здесь, при испускании в вакуум, мы имеем дело с теми же самыми частицами, которые движутся внутри металла. Эти частицы называются *электронами*. Испускание электронов металлами известно как явление термоэлектронной эмиссии.

Дальнейшие опыты показывают, что электроны одинаковы во всех металлах. В описанном выше опыте можно изготовить нить и цилиндр из различных металлов, например из вольфрама и никеля. Будем затем длительное время пропускать термоэлектронный ток, но при температуре, при которой вольфрам заметно не испаряется. Мы не обнаружим на цилиндре следов металла нити, независимо

от того, как долго протекали электроны. Не происходит также изменений химического состава цилиндра или нити. Электроны, вылетевшие из вольфрама, должны быть тождественны с электронами, находящимися в никеле.

Этот вывод подкрепляется аналогичными данными для соприкасающихся металлов. Можно соединить никелевой проволокой медные полюсы батареи и пропускать ток в течение нескольких дней; при этом не будет заметно никакого изменения как в самой проволоке, так и в полюсах батареи. От одного металла к другому при этом перейдет очень много электронов, но не произойдет никакого изменения ни в меди, ни в никеле. Таким образом, электроны никеля и меди неразличимы.

В конечном итоге мы приходим к выводу, что электроны должны принадлежать к числу мельчайших кирпичиков, которые входят в состав всех металлов и вообще всех атомов. В настоящее время правильность этого заключения не вызывает сомнений, и в последующих главах мы найдем этому еще много подтверждений.

26.13. Диоды. Электронные пушки. Осциллографы

Термоэлектронная эмиссия имеет много практических применений; одним из наиболее важных является ее применение в радиолампах. Устройство, которое мы использовали для демонстрации термо-

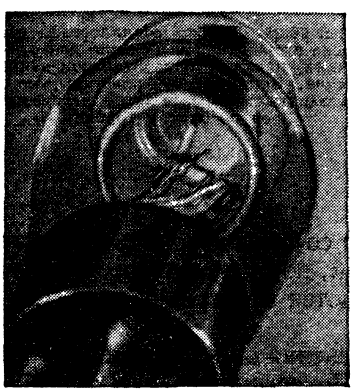


Рис. 26.23. Фотоснимок обычного диода. Белая металлическая трубка в центре нагревается изнутри и испускает электроны. Если она заряжена отрицательно, а наружный цилиндр положительно, то через разделяющее их пространство будут проходить электроны.

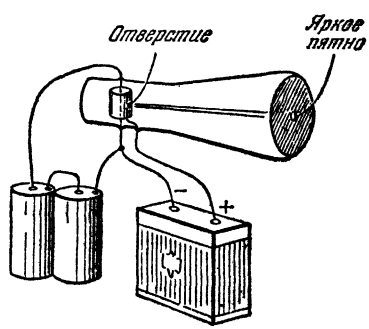


Рис. 26.24. Обыкновенный диод можно превратить в электронную пушку, просверлив в цилиндре отверстие и удлинив стеклянный баллон. Один конец трубки покрыт флуоресцирующим веществом, которое светится при ударе о него электронов.

электронной эмиссии, представляет простой тип радиолампы, называемой диодом (рис. 26.23). (На языке радиотехники горячая проволока, испускающая электроны, называется катодом, а электрод,

к которому летят электроны,— анодом.) В диоде электроны путешествуют от катода к аноду, но не в противоположном направлении. Поэтому его можно применять в качестве вентиля (другие названия: выпрямитель, детектор) для превращения тока, текущего в цепи попеременно в каждом направлении, в ток, который течет прерывисто, но только в одном направлении.

Можно также воспользоваться диодом для изготовления электронной «пушки». Для этого в аноде нужно просверлить отверстие (рис. 26.24). Хотя значительная часть электронов, испускаемых горячей нитью, ударяется об анод, сквозь отверстие пройдут только те электроны, которые движутся прямо к отверстию; пройдя сквозь него,

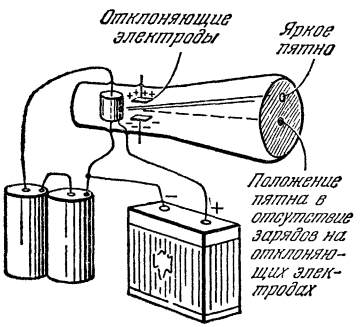


Рис. 26.25. Электронная пушка может служить электрометром, если в трубке поместить пару горизонтальных металлических пластин. Если, например, верхней пластине сообщить положительный заряд, а нижней — отрицательный, то электронный пучок отклонится вверх. Смещение светящегося пятна относительно центра является мерой заряда на пластинах.

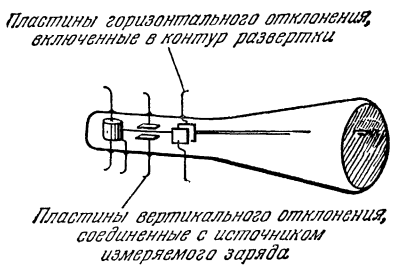


Рис. 26.26. Трубка осциллографа снабжена второй парой пластин для отклонения пучка в горизонтальном направлении. Заряжая эти пластины, можно заставить светящееся пятно перемещаться по экрану трубки.

они будут двигаться до столкновения со стенкой трубки. Если стенка, расположенная напротив «пушки», покрыта флуоресцирующим составом, то в том месте, куда ударяются электроны, появится яркое пятно.

При внесении еще одного видоизменения описанная нами трубка станет электронным осциллографом. Поместим в трубке две небольшие горизонтальные пластины так, чтобы пучок электронов проходил между ними (рис. 26.25). Если одну пластину зарядить положительно, а другую отрицательно, то электроны отклоняются по вертикали к положительной пластине и ударяются о флуоресцирующий экран уже в другом месте. Даже одной батареи от карманного фонаря, присоединенной к отклоняющим пластинам, достаточно для заметного смещения пятна. Следовательно, такой осциллограф можно использовать в качестве электрометра. Если соединить его с усилителем типа усилителя в радиоприемнике, то он окажется значительно более чувствительным прибором, чем описанные ранее электрометры.

При употреблении в качестве электрометра электроннолучевой осциллограф обладает, помимо большой чувствительности, еще более полезным свойством: быстротой отклика. Обычный электрометр имеет заметную массу движущихся частей и потому требует значительного времени для достижения равновесного положения после зарядки. Электроны же обладают ничтожно малой массой по сравнению с самыми легкими механическими частями. Поэтому отклонение электронного пучка происходит практически мгновенно.

Таким образом, электронный осциллограф в состоянии показывать весьма быстрые изменения заряда, чего обыкновенные электрометры делать не могут.

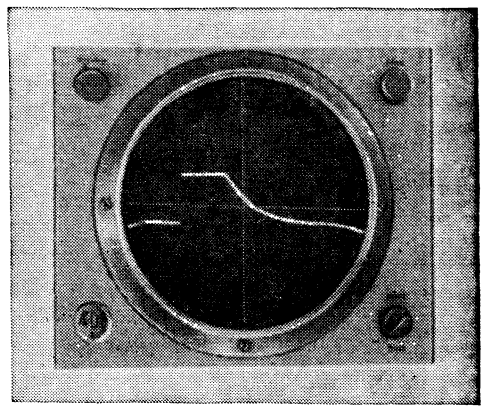


Рис. 26.27. Фотоснимок следа на экране трубки осциллографа. Пока контур развертки перемещал пучок слева направо, батарея быстро зарядила две металлические пластины, соединенные с вертикально отклоняющими пластинами трубки. Через мгновение началась их медленная разрядка через проволоку высокого сопротивления.

С помощью электронного осциллографа мы даже можем детально изучать быстрые изменения заряда с течением времени. Для этого снабдим осциллограф второй парой металлических пластин, предназначенных для развертки, т. е. для отклонения пучка в горизонтальном направлении (рис. 26.26). Цепь развертки постепенно заряжает эту пару пластин и затем внезапно их разряжает, после чего снова начинает их заряжать. Во время зарядки яркое пятно в том месте, куда ударяются электроны, отклоняется в горизонтальном направлении с постоянной скоростью; затем после разрядки оно быстро возвращается к исходному положению. В то же самое время первая пара пластин создает вертикальное отклонение в соответствии с их зарядом.

В результате двух отклонений пятно прочерчивает кривую, дающую графическую картину изменения во времени заряда на вертикальных пластинах (рис. 26.27).

Электроннолучевые трубки нашли много применений. Телевизионные и радиолокационные (радарные) трубки представляют собой специальные типы электроннолучевых трубок. Картины, которые при этом получаются, возникают в результате отклонения электронного пучка в вертикальном и горизонтальном направлениях по поверхности трубки с одновременным изменением интенсивности пучка, заставляющей каждую небольшую область экрана светиться или оставаться темной в ответ на сигнал телевизионной камеры.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

1*. Если два заряженных стержня взаимно отталкиваются, что можно сказать о знаках их зарядов? (Раздел 26.1.)

2*. Положим, что предмет A отталкивает B и притягивает C, а C отталкивает D. Если известно, что предмет D заряжен положительно, каков знак заряда B? (Раздел 26.1.)

3. Предположим, что вы наэлектризовали стержень из пластмассы, натерев его шерстью.

а) Считаете ли вы, что шерсть зарядится?

б) Как вы можете это обнаружить?

4*. Обязательно ли снятие всех отрицательных зарядов для того, чтобы стержень зарядился положительно? (Раздел 26.2.)

5*. а) Почему нельзя наэлектризовать трением металлический стержень, если держать его в руке?

б) Что нужно сделать для того, чтобы наэлектризовать металлический стержень? (Раздел 26.4.)

6. При заправке баков самолета бензином металлический наконечник рукава всегда тщательно присоединяется проволокой к металлическому корпусу до погружения наконечника в бак. Объясните, почему это делается и как такой способ выполняет свою задачу.

7. а) Когда в сухой зимний день вы касаетесь металлического предмета, например дверной ручки, вы видите искру и чувствуете толчок. Обычно это объясняют, говоря, что человеком накоплен статический заряд. Как можно выяснить знак заряда, которым вы обладаете? Почему это явление не происходит летом во влажный день?

б) Если накопить статический заряд и затем коснуться деревянной рамы двери, то в большинстве случаев не наблюдается искры или толчка, хотя они возникли бы при прикосновении к металлической ручке. Почему?

в) Иногда прикосновение к деревянной раме, а затем к металлической ручке не вызывает искры или толчка, хотя они имели бы место, если сначала коснуться ручки. Предложите объяснение.

8*. Что можно сказать о зарядах листочков изолированного электроскопа и его шарика, если между листочками наблюдается сильное отталкивание? (Раздел 26.4.)

9*. Что произойдет при соприкосновении шариков двух тождественных и одинаково заряженных электроскопов, если они:

а) заряжены положительно;

б) заряжены отрицательно;

в) заряжены разноименно? (Раздел 26.4.)

10*. При поднесении заряженного стержня к отрицательно заряженному электроскопу листочки сближаются. Каков заряд стержня? (Раздел 26.5.)

11*. При поднесении заряженного стержня к положительно заряженному электроскопу листочки сначала сходятся, а затем расходятся. Каков заряд стержня? (Раздел 26.5.)

12. Три соприкасающихся друг с другом металлических бруска, лежащих на пластмассовой крышке стола, образуют цепь проводников. Поместите два предмета с большими положительными электрическими зарядами поблизости от каждого из крайних кусков, но так, чтобы они их не касались. Затем раздвиньте куски с помощью незаряженного стержня из изолятора, оставив поблизости положительно заряженные предметы. Наконец, удалите и эти предметы.

а) Какой заряд окажется теперь на каждом из кусков?

б) Путем описания движения отрицательных электрических зарядов объясните, каким образом куски металла приобрели эти заряды.

13. Имеются два металлических шара одинакового размера, укрепленных на непроводящих подставках. Имеются также пластмассовый стержень и кусок хлопчатобумажной ткани. Опишите, что нужно сделать, чтобы сообщить шарам одинаковые электрические заряды:

а) одного знака;

б) противоположных знаков.

14. Опишите последовательные этапы процесса заряжения электроскопа положительным зарядом через индукцию и представьте с помощью чертежей движение отрицательных электрических зарядов в процессе заряжения.

15. Предполагают, что Земля обладает небольшим электрическим зарядом. Как можно это проверить?

16. Как можно определить с помощью электроскопа, который из зажимов батареи связан с положительным электродом?

17*. Что произойдет с листочками электроскопа на рис. 26.15, если, оставив на месте проволочное сопротивление, отключить батарею? (Раздел 26.8.)

18*. Почему в вакууме электроскоп разряжается медленнее, чем в воздухе? (Раздел 26.9.)

19*. Если нужно посеребрить ложку, погруженную в раствор серебра, который зажим батареи нужно присоединить к ложке? (Раздел 26.11.)

20. Мы видели, что электрический заряд способен передаваться сквозь определенные растворы, как, например, раствор сернокислой меди в воде. В этом случае на отрицательном электроде отлагается медь. Вспомните объяснение этого явления, приведенное в разделе 26.11, и подумайте, как этот процесс можно использовать для измерения тока. Подготовьтесь к обсуждению ваших соображений в классе.

21*. Допустим, что электрическая цепь с батареей B на рис. 26.22 заменена положительно заряженным электроскопом, шарик которого присоединен к металлическому цилиндру в стеклянном баллоне. Что произойдет при нагревании нити? (Раздел 26.12.)

22. Предположим, что имеется большое число одинаковых частиц. Любые две из них на расстоянии 10 см взаимно отталкиваются с силой $3 \cdot 10^{-10}$ Н.

а) Если одна из них находится в 10 см от компактной группы, содержащей n таких частиц, то с какой силой она, по вашему мнению, отталкивается от них?

б) Предположим, что отталкивание измерено и оказалось равным $6 \cdot 10^{-6}$ Н; сколько частиц было в этом случае в группе?

23. Предположим, что имеется большое число положительных и отрицательных электрических частиц, совершенно одинаковых (за исключением знака). Это значит, что любая пара из них взаимно притягивается или отталкивается в зависимости от их знака, но величина силы взаимодействия между ними остается неизменной для одинаковых расстояний. Например, сила между любыми двумя из них равна $3 \cdot 10^{-10}$ Н при расстоянии 10 см.

а) Одна положительно заряженная частица находится в 10 см от группы, содержащей P положительных и M отрицательных частиц. Насколько сильно она будет отталкиваться?

б) Вы не в состоянии сосчитать частицы, но можете измерить силу, которая оказывается равной $6 \cdot 10^{-6}$ Н. Что это говорит о значениях P и M?

24*. Какой заряд надо сообщить горизонтально отклоняющему электроду, находящемуся на переднем плане, чтобы луч перемещался по экрану справа налево, если смотреть на экран снаружи? (Раздел 26.13.)

ГЛАВА

27 ЗАКОН КУЛОНА И ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД

До сих пор наше изучение электрических сил носило качественный характер. Оно привело нас к выводу, что электрическое притяжение и отталкивание между большими телами обусловлено силами притяжения и отталкивания между субатомными частицами, из которых они состоят. Нашей ближайшей целью будет описание опытов, которые дадут количественные сведения об этих силах.

27.1. Зависимость силы от расстояния

Вид зависимости сил притяжения или отталкивания между зарядами от расстояния был установлен экспериментально французским физиком Шарлем Кулоном в 1785 г. В своем опыте Кулон применил крутильные весы (рис. 27.1), подобные тому прибору, которым позже пользовался Кавендиш для изучения гравитационного притяжения (см. раздел 21.10). На рис.

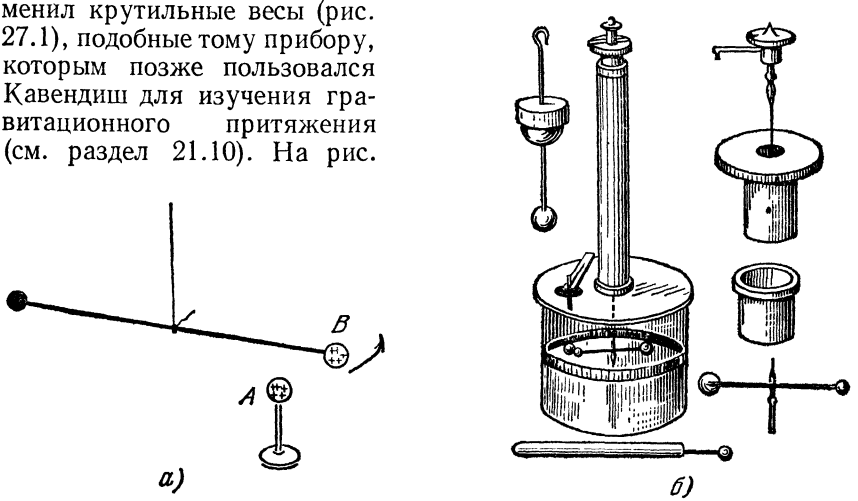


Рис. 27.1 *а*) Схема крутильных весов Кулона. *б*) Рисунок прибора Кулона, опубликованный в его оригинальной статье.

27.1, *а* представлена схема такого прибора. Под действием силы, с которой поднесенный заряженный шарик A действует на заряженный шарик B, коромысло весов поворачивается и занимает новое положение при закрученном подвесе. Чем больше сила, тем больше закручивание. Таким образом, по углу закручивания Кулон мог измерить электрическую силу. Изменяя расстояние между

заряженными шариками, он измерял силу в функции расстояния. Чтобы заряды были распределены по всей поверхности шариков, последние должны быть удалены друг от друга настолько, чтобы небольшие различия в расстоянии и направлении не играли роли*).

Пользуясь как положительно, так и отрицательно заряженными шариками, Кулон показал, что электрическая сила всегда обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами. Он получил этот результат с точностью около 3%. Позже косвенные опыты, основанные на экранирующем действии проводников, дали значительно более высокую точность. Кавендиш достиг точности в 1%. Максвелл показал, что показатель степени отличается от 2 (*квадрат* в законе обратной пропорциональности квадрату расстояния) на величину, не превышающую 1/40 000. В настоящее время установлено, что это отклонение не превышает $1/10^9$. Заметьте, что электрические и гравитационные силы изменяются с расстоянием совершенно одинаково. Объяснение этого сходства отсутствует, но благодаря ему часто удается одинаково трактовать гравитационные и электрические действия.

Сила притяжения или отталкивания между двумя любыми заряженными телами представляет векторную сумму всех сил, с которыми заряженные частицы одного тела действуют на заряженные частицы другого. Во всех случаях опыт показывает, что сила изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния. Отсюда естественно заключить, что и *сила взаимодействия между отдельными заряженными частицами изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния между ними.* Как и в случаях других рассмотренных нами сил, зависящих от расстояния, сила, с которой заряженная частица действует на другую, равнопротивоположна силе действия второй на первую.

Начиная с 1910 г. очень много опытов было проведено с субатомными частицами. Ими можно обстреливать другие такие же частицы или заряженные ядра атомов. Как мы увидим в гл. 32, эти опыты также показывают, что электрическая сила между частицами изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния.

27.2. Электрический заряд и электрическая сила

В электрически нейтральном теле действия положительно и отрицательно заряженных частиц взаимно компенсируются. Положительно заряженное тело содержит некомпенсированные положительные частицы, а отрицательно заряженное — некомпенсированные отрицательные частицы. Таким образом, заряд тела зависит от некомпенсированного избытка (по сравнению с нейтральным телом) положительных или отрицательных частиц.

---

*) Заряженые тела, находящиеся на таком расстоянии друг от друга, которое велико по сравнению с их размерами, часто называются точечными зарядами, потому что в таких случаях характер распределения зарядов на телах не имеет значения.

Сила между двумя заряженными телами зависит от расстояния между ними и возрастает с избытком положительно или отрицательно заряженных частиц в каждом теле. Какова же зависимость этой силы от избытка заряженных частиц? Для ответа на этот вопрос нужно установить способ деления избытка заряженных частиц определенным образом — на 2 части, на 3 части и т. д. Коснемся заряженного металлического шара таким же незаряженным шаром (рис. 27.2). Тогда заряженные частицы будут перемещаться до тех пор, пока не будут поровну разделены между шарами. Каждый шар получит половину первоначального заряда.

Что произойдет с электрическими силами, когда заряды разделятся? Измерьте силу отталкивания между двумя заряженными

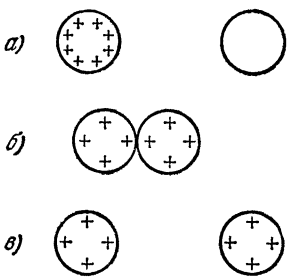


Рис. 27.2. Разделение электрического заряда. Если заряженным шаром коснуться такого же незаряженного шара, то избыток заряженных частиц разделится поровну. Окончательное распределение заряда должно быть симметричным, как показано на схеме *в*).

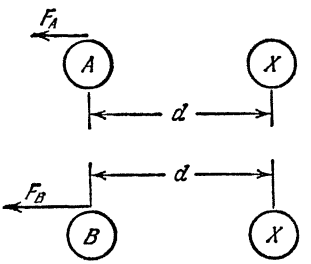


Рис. 27.3. Для сравнения двух зарядов A и B поместим их поочередно на одинаковое расстояние от произвольного заряда X и измерим силы. Отношение зарядов равно отношению сил: $q_A : q_B = F_A : F_B$. Чему равно, по вашему мнению, отношение сил, действующих на X?

шарами A и C при определенном расстоянии между ними. Затем разделите заряд A пополам между одинаковыми шарами (A и B). Тогда сила взаимодействия A и C (при том же расстоянии) также уменьшится вдвое. Более того, мы получим ту же силу, если заменим A шаром B, тождественным с ним, которому была передана половина заряда. По-видимому, как мы это и предполагали, заряд и сила пропорциональны друг другу.

Подобные опыты открывают возможность количественного сравнения зарядов. Два заряда равны, если они действуют с равными силами на заданном расстоянии на любой третий заряд. Один заряд вдвое больше другого, если на него действует удвоенная сила. Если уменьшить заряд вдвое, то сила, с которой он действует на третий заряд, также уменьшится вдвое. Вообще заряды относятся друг к другу, как силы, которые они создают или испытывают со стороны любого другого заряда, находящегося на определенном расстоянии. Это *отношение* не зависит от величины другого заряда или от расстояния до него (рис. 27.3).

С таким же успехом мы можем, наоборот, определить отношение сил, испытываемых «другим» зарядом, по величине зарядов, создающих эти силы.

Подведем теперь итог наших знаний на языке алгебры. Электрическая сила, действующая на заряд q, пропорциональна заряду: $F \backsim q$. Если эта сила представляет собой силу взаимодействия между зарядом q и другим небольшим телом с зарядом Q, то сила также пропорциональна другому заряду. Эту пропорциональность обоим зарядам можно представить выражением $F \backsim qQ$.

Мы выяснили теперь смысл заряда и знаем, как электрическая сила зависит от зарядов. Объединим эти сведения с опытами Кулона. Эти опыты говорят нам, что сила обратно пропорциональна квадрату расстояния r между зарядами. Так мы приходим к полному выражению для силы взаимодействия между зарядами. Эта сила равна

$$F = kQq/r^2,$$

где коэффициент пропорциональности k зависит от единиц, в которых выражены силы, расстояния и заряды. Если Q и q одного знака, то силы являются силами отталкивания, и вектор каждой силы, действующей на один из зарядов, направлен во внешнюю сторону по прямой, проходящей через заряженные тела. Наоборот, если знаки Q и q противоположны, то каждая из двух сил направлена по той же прямой во внутреннюю сторону. Назовем это выражение для силы *законом Кулона*, а силу — кулоновской силой.

Когда мы впервые начали говорить об электрическом заряде, то придавали этому слову только качественный смысл. Электрический заряд являлся только результатом прибавления или удаления нескольких положительно или отрицательно заряженных частиц от нейтрального предмета. Теперь, однако, мы научились сравнивать заряды количественно; мы можем теперь говорить о зарядах самих отдельных частиц. Две частицы имеют одинаковый заряд, если они испытывают одинаковую силу, когда помещены на определенном расстоянии от другого заряда. Если силы, испытываемые двумя частицами, различны, то их заряды относятся друг к другу, как эти силы.

Недостает только одного: необходима стандартная единица заряда, нечто воспроизводимое, для того, чтобы можно было сравнивать заряды в сколь угодно далеко отстоящих друг от друга местах. С этой целью применялись иногда различные произвольные единицы. Однако, к счастью, как мы увидим в разделе 27.5, природа сама предоставляет нам основную единицу.

27.3. Поля электрических сил

Предположим, что вблизи небольшого заряженного тела, неподвижного и находящегося в определенном месте, мы перемещаем заряд. Сила взаимодействия изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния и всегда направлена вдоль прямой, соединяю-

щей заряды. Можно вычертить векторы силы вокруг неподвижного заряда, указывающие величину и направление силы, действующей на подвижный заряд, в большом числе точек пространства. На рис. 27.4 показана совокупность таких векторов для положительного и отрицательного неподвижных зарядов. Поля этих векторов

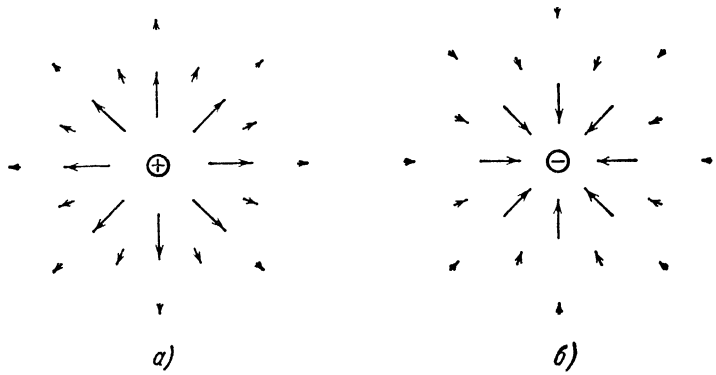


Рис. 27.4. Поле электрических сил, действующих на подвижный положительный заряд со стороны неподвижного положительного заряда (*а*) и неподвижного отрицательного заряда (*б*). Поле представляет собой совокупность векторов сил, действующих на подвижный заряд в каждой точке пространства.

очень сходны с совокупностью векторов, изображающей гравитационное поле Земли (см. рис. 20.1) с той разницей, что векторы гравитационного поля всегда направлены к Земле, тогда как векторы электрического поля направлены от создающих их зарядов, когда действуют силы отталкивания, и, наоборот, к зарядам,

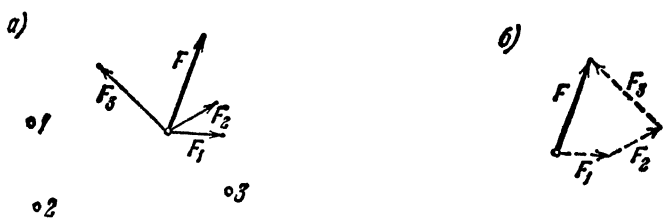


Рис. 27.5. *а*) Три неподвижных заряда действуют на подвижный заряд. *б*) Результирующая сила F равна векторной сумме сил F_1, F_2 и F_3, создаваемых неподвижными зарядами порознь.

образующим поле, когда имеет место притяжение. Совокупность векторов электрических сил, приложенных к подвижному заряду в разных точках пространства, называется электрическим полем. Это поле показывает величину и направление силы, испытываемой подвижным зарядом в различных точках. Следует отметить, что абсолютная величина каждого вектора силы зависит от величины подвижного заряда, а направление вектора силы — от его знака. На рисунках в этом разделе показано направление сил, действую-

щих на положительный подвижный заряд. Если он отрицателен, направление сил изменится на обратное.

Предположим теперь, что имеется несколько зарядов, неподвижно закрепленных в различных положениях. Они создают силу, действующую на подвижный заряд в любом его положении, и эта сила есть векторная сумма сил, каждую из которых соответствующий закрепленный заряд создавал бы в отдельности (рис. 27.5). В этом случае результирующая сила, действующая на подвижный заряд, не изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от какого-либо из закрепленных зарядов. Но эту результирующую силу можно вычислить, сложив все отдельные силы, или ее можно измерить экспериментально. Ее можно представить, сделав чертеж результирующих векторов силы для большого числа положений; таким образом можно составить представление о силовом поле, создаваемом всей совокупностью неподвижно закрепленных зарядов.

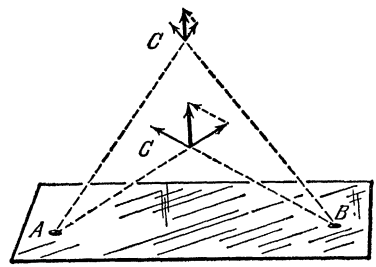


Рис. 27.6. Два неподвижных заряда A и B, расположенных на плоскости, создают силы, действующие на подвижный заряд C. Когда C приближается к плоскости, направления сил все больше расходятся. Поэтому результирующая сила не возрастает в такой степени, как этого можно было бы ожидать. Какова сумма сил, создаваемых зарядами A и B, когда заряд C находится как раз посередине между ними?

Предположим в качестве примера, что имеется большое число зарядов, равномерно распределенных на большой плоской площадке. Мы обнаружим, что результирующая сила не возрастает заметным образом при приближении к плоскости. Хотя мы приближаемся к зарядам, создаваемые ими силы при этом все больше расходятся по направлению, и это компенсирует рост сил (рис. 27.6). Если провести векторное сложение всех сил, то окажется, что результирующая сила не изменяется ни по величине, ни по направлению по мере приближения к плоскости. Силовое поле однородно. (Доказательство приводится в конце раздела.) Если заряды на плоскости и подвижный заряд — одного знака, то это однородное силовое поле будет направлено от плоскости. Такое поле изображено на рис. 27.7. *Экспериментальное* доказательство его однородности будет дано в следующем разделе.

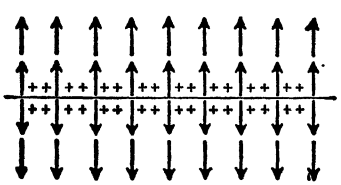


Рис. 27.7. Электрическое поле равномерно заряженной плоскости.

Часто, вместо вычерчивания совокупности векторов результирующей силы, электрическое силовое поле изображают иначе, вычерчивая ряд электрических силовых линий. Линию строят путем непрерывного перемещения точки в направлении результирующей силы, действующей на перемещаемый заряд. С изменением направления

силы изменяется и направление линии. Картины электрических силовых линий вокруг одиночного небольшого заряженного предмета и вокруг нескольких отдельных заряженных предметов приведены на рис. 27.8.

Направление каждой линии определяет направление равнодействующей сил, приложенных к подвижному положительному заряду, помещенному на данной линии.

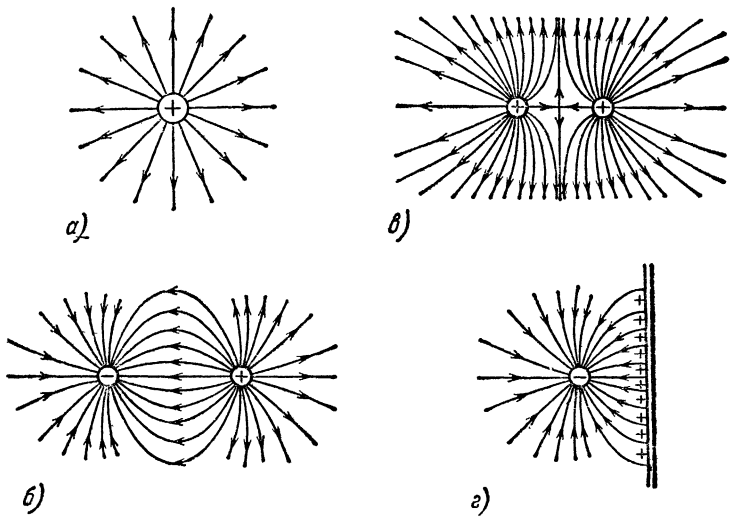


Рис. 27.8. Поле электрических сил, действующих на положительный подвижный заряд, создаваемое уединенным положительно заряженным шаром (*а*), двумя противоположно заряженными шарами (*б*), двумя одинаково заряженными шарами (*в*). *г*) Маленький шар около противоположно заряженного большого плоского проводника. Обратите внимание на то, что густота линий означает силу поля. Расхождение линий сопровождает ослабление поля.

Иногда удается экспериментально показать электрические силовые линии, используя тот факт, что маленькие продолговатые тельца будут располагаться вдоль них. Например, можно получить взвесь семян травы в изолирующей жидкости. Если затем создать электрическое поле, поместив в жидкость заряженные предметы, то семена расположатся таким образом, что образуют картину поля. На рис. 27.9 представлены картины нескольких типов электрических полей, полученные с помощью семян камыша. (Сравните центр рис. 27.9, *е* с рис. 27.7.)

На рис. 27.9 заряженными предметами являются металлические проводники.

Заметьте, что электрические силовые линии подходят к их поверхности под прямыми углами. Это легко понять. В металлическом проводнике электроны внутри металла могут свободно перемещаться из одной точки в другую, но не могут свободно покидать его поверхность. Если электрические силы, действующие на электроны, находящиеся вблизи от поверхности металла, имеют

составляющую, параллельную этой поверхности, то они увлекают электроны вдоль поверхности. Этот поток электронов представляет собой электрический ток. Такие токи в металле будут существовать

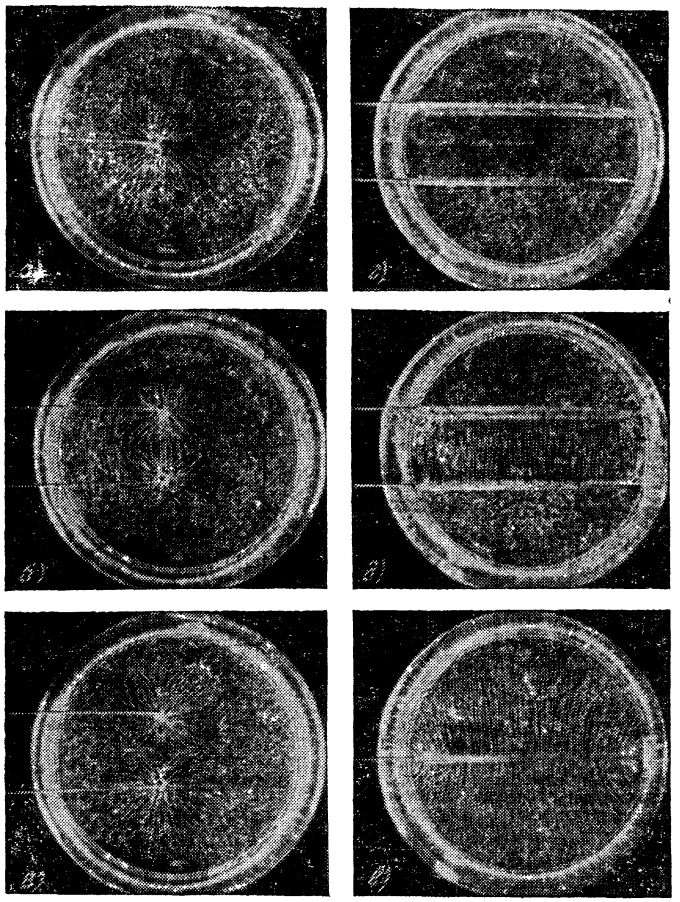


Рис. 27.9. Фотоснимки картин электрического поля, образованных семенами камыша в изолирующей жидкости. *а*) Заряженный стержень, *б*) Два стержня с равными, но противоположными зарядами. *в*) Два одинаково заряженных стержня. *г*) Две параллельные пластины в отсутствие электрического поля. *д*) Две параллельные пластины с противоположными зарядами. *е*) Одна заряженная металлическая пластина.

до тех пор, пока электроны не расположатся так, что линии электрического поля сделаются перпендикулярными к поверхности металла в любой ее точке независимо от формы поверхности. Такое перераспределение электронов требует очень малой доли секунды; в подобных опытах мы определяем поле, создавшееся после того, как электроны перестанут двигаться.

В следующем разделе мы рассмотрим электрическую силу, действующую на небольшой предмет, помещенный между двумя параллельными, близко расположенными противоположно заряженными металлическими пластинами (рис. 27.10). За исключением краев, заряд на каждой пластине равномерно распределяется по внутренней поверхности. Следовательно, в области между пластинами электрическое поле должно быть однородным и направленным прямо от одной пластины к другой. Если только пробный заряд между пластинами не слишком близок к краям, то действующая на него сила должна быть во всех точках одинакова. Эта сила пропорциональна величине зарядов на пластинах.

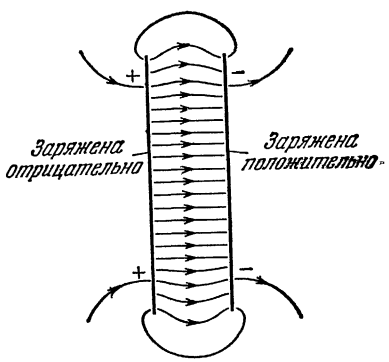


Рис. 27.10. Поле сил, действующих на положительный заряд между противоположно заряженными параллельными металлическими пластинами. Сила, действующая на заряд между пластинами, одинакова везде, кроме как у краев.

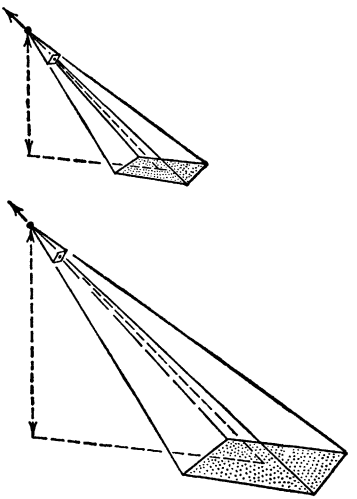


Рис. 27.11. Если смотреть на плоскость через узкий конус, то виден участок плоскости, величина которого зависит от высоты наблюдателя над плоскостью.

Электрическая сила, действующая на заряд, находящийся над равномерно заряженной плоскостью. Вообразите, что вы находитесь на заряде. Плоскость — прямо под вами; вы смотрите на нее через небольшой конус, расположенный под некоторым углом к вертикали (рис. 27.11). Площадь небольшого участка плоскости, который виден через конус, пропорциональна квадрату той высоты, на которой вы находитесь над плоскостью. Например, если удалиться от плоскости на вдвое большее расстояние, то вы увидите площадку, длина и ширина которой вдвое больше первоначальных. Ее площадь, следовательно, в четыре раза больше первоначальной, и поэтому заряд площадки в четыре раза больше первоначального заряда, который виден под этим углом. Но этот заряд находится на двойном расстоянии по сравнению с первоначальным. Поэтому отношение величины силы, действующей на заряд, при изменении расстояния между зарядом и плоскостью определяется двумя факторами: сила увеличивается в четыре раза вследствие увеличения заряда в четыре раза и уменьшается в четыре раза вследствие увеличения расстояния в два раза. Окончательный результат — вследствие того, что $4 \cdot {}^1/_4 = 1$ — дает первоначальную силу.

Уменьшение силы взаимодействия при удалении заряда от плоскости и возрастание величины заряда, который виден через конус, всегда компенсируют друг друга ($1/r^2$ и r^2). Следовательно, сила, действующая на заряд под любым углом, одинакова для всех высот, если только не рассматривать края плоскости.

Наконец, поскольку силы, действующие под всеми углами, одинаковы, результирующая сила также остается неизменной. Она не должна зависеть от высоты над плоскостью. Заметим, что ни при каком другом законе изменения силы с расстоянием однородное силовое поле не может образовываться. Закон пропорциональности силы величине $1/r^2$ является единственным, который компенсируется геометрическим фактором r^2. Поэтому обнаружение в этом случае однородного силового поля служит проверкой закона Кулона.

Конечно, при очень больших высотах, столь больших, что вся заряженная площадка представляется точкой, сила не остается постоянной, а убывает по закону $1/r^2$. Непостоянство силы становится заметным уже при удалении примерно на расстояние, составляющее 1/20 от наименьшего размера заряженной области.

27.4. Измерение малых электрических сил

Как мы увидим, ионы обладают зарядами, соответствующими очень небольшому числу частиц, нередко всего лишь одной или двум частицам. Изучая ионы, мы увидим, что все мельчайшие носители зарядов обладают зарядами одинаковой величины. Заряды встречаются как бы в виде отдельных зерен, и каждое зерно, заряженное положительно или отрицательно, имеет такой же заряд, как и другие зерна. Тождественность зерен заряда, подобная тождественности атомов вещества, дает нам природную единицу заряда. Открытие зерен электричества является одной из больших вех, отмежевывающих современную физику от прежней.

Это открытие позволяет нам определить заряд на каком-либо предмете, сосчитать избыточное число электрических частиц одного знака по сравнению с частицами другого знака. Это упрощает представление о заряде. Конечно, тот факт, что все элементарные заряды имеют одинаковую величину, не дает уверенности, что их носители одинаковы во всех других отношениях. Как мы увидим дальше, имеются частицы с различными массами, но с одинаковым зарядом. Здесь мы изучим малые электрические силы, действующие на ионы, и затем воспользуемся ими для установления единиц заряда. Электрические силы, действующие на ионы, малы; эти силы не способны приводить в движение предметы обычных размеров или заметно натягивать пружины. Во всяком случае мы не в состоянии привязать отдельный ион к пружине или быть уверенными, что на каком-либо предмете видимых размеров находится только один ион. Поэтому мы должны найти способ обращаться с очень малыми предметами, у которых имеется избыток только в несколько элементарных электрических частиц. В этом разделе мы рассмотрим один метод обращения с такими предметами и измерения очень малых электрических сил, которыми мы можем действовать на них. Это даст нам все необходимое для понимания тех данных, которые будут получены в следующем разделе для природной единицы заряда.

Нам необходимы предметы, которые значительно больше ионов или молекул газа и все же достаточно малы для того, чтобы они

приводились в движение малыми электрическими силами. Предметы, видимые невооруженным глазом, слишком массивны для этой цели. Для этого оказываются пригодными микроскопические шарики из пластмассы диаметром около 10^{-6} м (рис. 27.12). Хотя они



Рис. 27.12 Электронномикроскопический фотоснимок нескольких пластмассовых шариков при увеличении около 2500×.

достаточно велики для того, чтобы в оптический микроскоп выглядеть как пятнышки света, масса каждого из них составляет только около 10^{-12} кг, т. е. микро-микрограмм. Такие шарики изготовляются для определения размеров предметов, наблюдаемых в электронных микроскопах, и можно достать большое число почти одинаковых шариков.

В воздухе эти шарики движутся довольно медленно Рассматривая их, мы видим, что они падают почти прямолинейно (рис. 27.13) испытывая лишь слабое влияние броуновского движения и

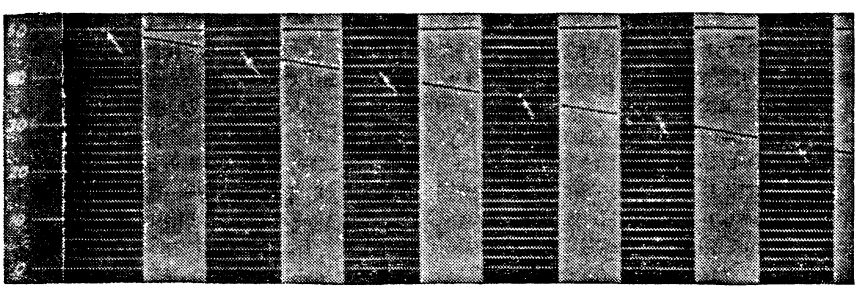


Рис. 27.13. Фотоснимки пластмассового шарика, движущегося вниз под действием силы тяжести, снятые в микроскоп, через промежутки времени в 1 с. За равные промежутки времени шарик опускается на одно и то же расстояние поперек штрихов окулярной шкалы, общая длина которой немного превышает 1 мм.

без заметного ускорения Действующая на них результирующая сила в среднем должна быть равна нулю Эта равная нулю результирующая сила есть векторная сумма силы тяжести, увлекающей шарик вниз, и противоположно направленной силы сопротивления

воздуха. Когда шарик начинает падать, сопротивление воздуха равно нулю, но чем быстрее движется шарик, тем больше сопротивление. Таким образом, сопротивление воздуха быстро возрастает до тех пор, пока оно не уравновесит небольшую силу тяжести. С этого момента шарик движется с постоянной скоростью, называемой конечной скоростью падения.

Если поместить несколько таких пластмассовых шариков между заряженными пластинами, то, помимо силы тяжести, на шарики начнет действовать электрическая сила. Некоторые шарики начнут двигаться вверх, а некоторые вниз. Очевидно, эти шарики имеют электрические заряды. В начале движения шарика под действием равнодействующей силы (векторной суммы силы тяжести и электрической силы) сопротивление воздуха изменяется, пока

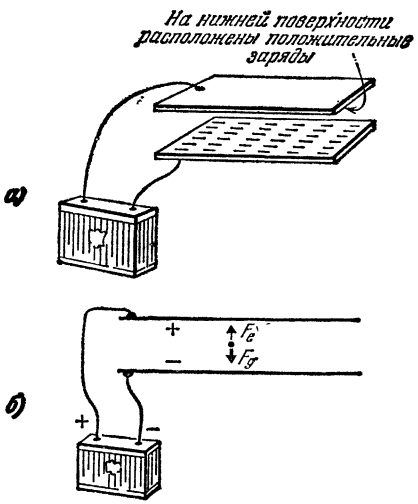


Рис. 27.14. Выбрав подходящую батарею и подходящее расстояние между пластинами, можно поддерживать шарик в неподвижном состоянии между пластинами. Электрическая сила и сила тяжести должны быть равны и противоположно направлены.

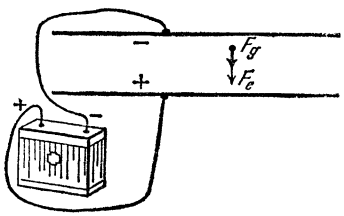


Рис. 27.15. После переключения полюсов уравновешивающей батареи действие электрической силы направлено вниз. Движущая сила равна удвоенной силе тяжести.

шарик не приобретет постоянную скорость. Эта конечная скорость будет отличаться от конечной скорости, приобретаемой под действием только силы тяжести.

Как связана эта конечная скорость с движущей равнодействующей силой? Рассмотрим шарик, помещенный между двумя заряженными металлическими пластинами, соединенными с батареей, как показано на рис. 27.14. Изменяя электрический заряд пластин, можно изменять электрическую силу, действующую на шарик. Воспользовавшись подходящей батареей и подобрав надлежащее расстояние между пластинами, можно добиться того, чтобы электрическая сила, приложенная к шарику, была равна по величине силе тяжести, но противоположна ей по направлению. Тогда шарик будет удерживаться между пластинами в равновесии. Что произойдет, если поменять зажимы батареи, соединенные с пластинами (рис. 27.15)? Электрическая сила остается равной силе тяжести по

величине, но теперь она направлена в ту же сторону, что и сила тяжести. Измерив конечную скорость падения шарика, мы найдем, что она вдвое больше конечной скорости падения под действием одной только силы тяжести. Этот результат подсказывает заключение, что

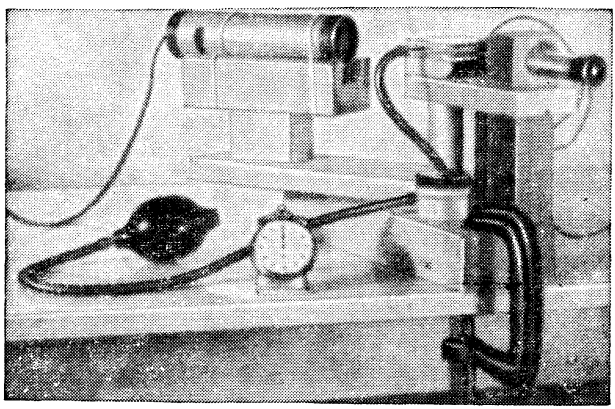


Рис. 27.16. Микро-микровесы Сжатием большой резиновой груши достигается продувка шариков из банки вверх по резиновой трубке в пространство между металлическими пластинами, соединенными с батареей проводами, которые видны справа. Шарики, освещаемые ярким источником света, расположенным на рисунке в верхней средней части, наблюдаются через микроскоп, расположенный справа

конечная скорость шарика прямо пропорциональна движущей силе. Эта закономерность была проверена, и она оправдывается в широком диапазоне скоростей.

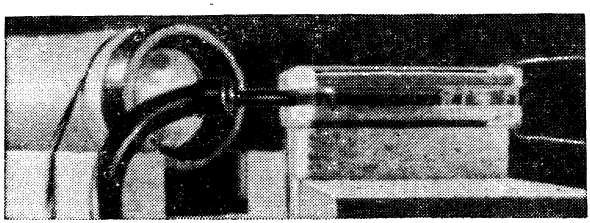


Рис. 27.17. Пластины микро-микровесов, снятые крупным планом. Микроскоп убран, чтобы яснее показать пластины и провода, идущие от них к батарее

Прибор, на котором эти опыты фактически проводились, изображен на рис. 27.16 и 27.17. В этом приборе можно компенсировать электрической силой вес шарика, масса которого достигает микромикрограмма (или 10^{-12} г). Этот прибор мы будем называть микромикровесами. С помощью микро-микровесов можно показать, что электрическая сила пропорциональна числу одинаковых батарей,

присоединенных последовательно к пластинам. Сначала измеряем конечную скорость опускания пластмассового шарика в отсутствие элекрической силы (рис. 27.18, *а*). Затем подбираем батарею и расстояние между пластинами так, чтобы электрическая сила в точности компенсировала силу тяжести, в результате чего конечная скорость шарика должна быть равна нулю (рис. 27.18, *б*). После этого включаем последовательно вторую батарею, тождественную

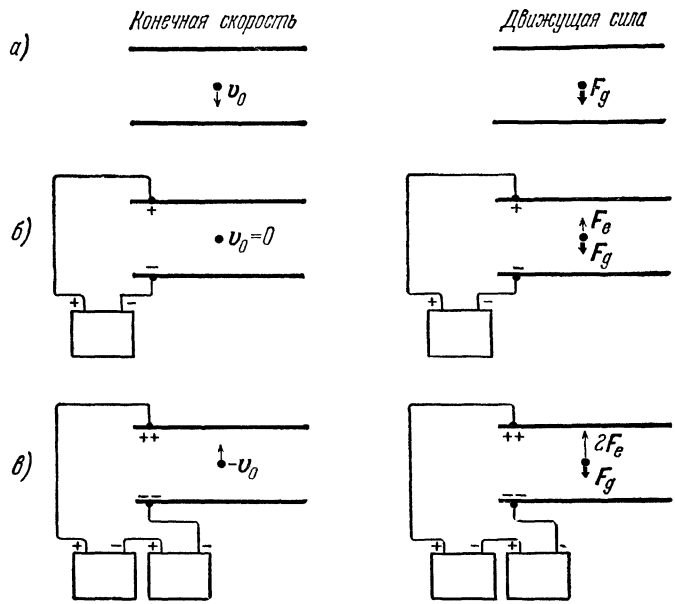


Рис. 27.18. Можно следующим образом показать, что электрическая сила, приложенная к шарику, пропорциональна числу последовательно включенных батарей: *а*) измеряем конечную скорость опускания в отсутствие электрической силы; *б*) уравновешиваем вес шарика равнопротивоположной электрической силой; *в*) измеряем конечную скорость поднятия после последовательного включения второй батареи, тождественной первой. Последняя конечная скорость равнопротивоположна той, которая была измерена в случае *а*). Это показывает, что теперь электрическая сила, действующая на шарик, должна быть вдвое больше веса шарика.

первой, и убеждаемся, что шарик движется вверх с конечной скоростью, равнопротивоположной той, которая наблюдалась в отсутствие электрической силы (рис. 27.18, *в*). Это доказывает, что электрическая сила в случае двух батарей вдвое больше электрической силы в случае одной батареи. Если последовательно включить такую же третью батарею, шарик будет подниматься с конечной скоростью, которая по величине превысит вдвое конечную скорость опускания без электрической силы. Если одна батарея только компенсирует вес шарика, то две другие создают равнодействующую силу, вдвое превышающую этот вес и противоположную силе тяжести по направлению.

Отметим еще одно обстоятельство. При движении заряженного шарика вверх или вниз между металлическими пластинами он дви-

жется с одной и той же конечной скоростью независимо от того, в каком месте он находится. Следовательно, электрическая сила одинакова во всех точках между пластинами. Это является экспериментальным доказательством однородности электрического поля, между параллельными равнопротивоположно заряженными пластинами, которое согласуется с теоретическим утверждением, сделанным в предыдущем разделе, о том, что поле в этом случае и *должно* быть однородным.

27.5. Элементарный заряд

Предположим, что вы получили несколько запечатанных мешочков, содержащих различное число шариков. Вы должны определить, одинаковы ли все шарики в мешочках и сколько их имеется в каждом мешочке — без распечатывания. Вы взвешиваете мешочки и находите массы шариков, приведенные в табл. 27.1. Нанеся

ТАБЛИЦА 27.1

Мешочек	Масса шариков в мешочке, кг	Предполагаемое число шариков	Масса одного шарика
A	0,02800		
B	0,00560		
C	0,01680		
D	0,01120		
E	0,02240		

эти массы на график, как на рис. 27.19, вы видите, что все они являются целыми кратными 0,00560 кг. Тогда вы можете легко прийти к выводу, что все шарики — одинаковой массы. Такой вывод весьма правдоподобен, потому что шариков с массой 0,00560 кг в мешочке *A* было бы пять, в *B* — один, в *C* — три, в *D* — два и в *E* — четыре. (Вы, вероятно, потрясете мешочек *B* для выяснения правильности вашего предположения.)

С другой стороны, если в каждом мешочке огромное число шариков, то, возможно, вы не будете ожидать, что все шарики имеют одинаковую массу. Например, допустите, что мешочки с шариками имеют массы в 5,76 кг, 6,27 кг, 3,24 кг, 4,82 кг,..., т. е. около 1030, 1120, 580, 860,... шариков. Даже если допустить, что шарики одинаковы, при таких массах в этом трудно будет убедиться. Для получения уверенности в том, что все мешочки содержат целое число одинаковых шариков, необходимо измерять массу с точностью до малой доли массы одного шарика. Это означает необходимость взвешивания с точностью до одной десятитысячной, что является значительно более трудным и значительно менее убедительным. Если бы число одинаковых предметов было намного больше избранного нами и близко к числу атомов в моле ($6 \cdot 10^{23}$), то дело стало бы безнадежным.

Так как даже в весьма малом теле имеется очень много атомов, то массы атомов были установлены не путем взвешивания малого их числа. Был применен менее прямой метод (см. гл. 8). По той же причине элементарная единица заряда была открыта не путем измерения больших зарядов и установления того, что они оказываются целыми кратными единичного заряда. Заряды, с которыми мы обычно имеем дело, содержат огромное число — миллионы миллионов — элементарных электрических зарядов, и присутствие или отсутствие одного заряда очень трудно обнаружить. Поэтому первое доказательство существования элементарного заряда было получено в XIX веке косвенным путем. Так как это доказательство является косвенным и связано с другими вопросами атомной теории, мы займемся им в разделе 28.3. Здесь же мы вместо этого рассмотрим некоторые данные, ставшие доступными в начале нашего столетия. В это время получили развитие для измерения зарядов ионов микромикровесы, похожие на весы, описанные в предыдущем разделе. В 1909 г. Милликен усовершенствовал весы, весьма сходные с описанными нами, и провел ряд опытов, ясно показавших существование элементарной единицы заряда. Но вместо применяемых нами пластмассовых шариков известной массы он пользовался крошечными масляными капельками, и ему нужно было попутно с определением их зарядов измерять их массы. Таким образом, наш опыт легче его, хотя по идее он такой же*).

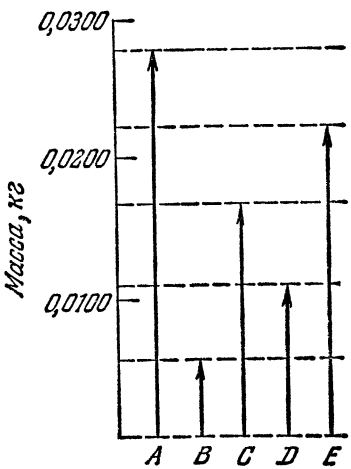


Рис. 27.19. Массы пяти мешочков с шариками. Горизонтальные пунктирные прямые проведены для облегчения сравнения.

Пусть между пластинами микро-микровесов помещено несколько шариков, подобных показанным на рис. 27.12. Пока пластины не заряжены, и на шарики не действуют электрические силы, все шарики имеют одинаковую конечную скорость опускания. Это обусловлено тем, что масса шариков одинакова, так что движущая сила, образуемая силой тяжести, одна и та же для всех шариков. Наоборот, когда пластины заряжены, конечные скорости разных шариков уже не одинаковы. Движущая сила теперь складывается из гравитационной и электрической, так что конечная скорость есть векторная сумма скоростей, обусловленных электрической и гравитационной движущими силами. Вычитая конечную скорость, обуслов-

*) Во времена Милликена не существовало стандартизованных пластмассовых шариков и электронного микроскопа, с помощью которого можно было бы удостовериться, что шарики все одинаковы. Он был вынужден делать нечто иное.

ленную гравитационной движущей силой, получим в остатке ту конечную скорость, которую каждый шарик получил бы под действием одной лишь электрической силы. Поскольку мы знаем, что конечная скорость пропорциональна движущей силе, можно определить электрическую силу, действующую на каждый шарик.

Конечные скорости нескольких шариков были измерены при помощи оборудования, изображенного на рис. 27.16 и 27.17. Конечная скорость, обусловленная только гравитационной движущей силой, вычиталась из измеренных значений. Полученные таким образом конечные скорости, обусловленные только электрической силой, отложены на рис. 27.20. Можно видеть, что значения скоростей

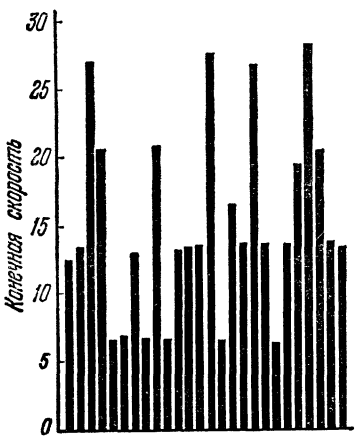


Рис. 27.20. Конечные скорости (выраженные в удобных для данного опыта единицах), обусловленные электрической составляющей движущей силы, действующей на различные пластмассовые шарики. Конечная скорость, обусловленная гравитационной составляющей силы, была вычтена из измеренных скоростей.

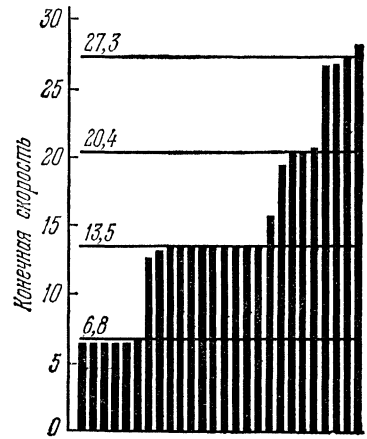


Рис. 27.21. Конечные скорости по данным рис. 27.20 после перестановки в порядке возрастания скорости. Можно видеть, что величины скорости группируются около некоторых значений, кратных наименьшему из них.

распределены не хаотически. Они группируются около некоторых значений, кратных наименьшему из них. В данном опыте скорости группируются около 6,8; 13,5; 20,4; 27,3 (в единицах, удобных для использования в данных условиях). Это особенно заметно, если расположить столбики в порядке возрастания скорости (рис. 27.21). Поскольку конечная скорость пропорциональна движущей силе, из этих данных можно заключить, что значения электрической силы тоже группируются около определенных величин. С другой стороны, электрическая сила пропорциональна как заряду пластин, так и заряду шариков. Заряд пластин постоянен в течение всего опыта, таким образом, различие в электрической силе, приложенной к разным шарикам, должно проистекать от различия в их зарядах. Разности этих зарядов оказываются кратными некоторому фундаментальному заряду.

Можно проводить другие аналогичные опыты с шариками разных размеров и разных материалов. Многие подобные опыты производились Милликеном. Оказалось, в частности, что для шарика удвоенной массы компенсирующая сила вдвое больше. Отношение скорости к движущей силе тоже неодинаково. Однако, если учесть все измерения, то оказывается, что все измерения приводят к одной и той же естественной единице заряда. Можно пользоваться различными газами; можно ионизовать их различным образом; можно даже посылать в газ электроны или другие заряженные частицы — мы всегда приходим к одной и той же единице заряда. Назовем ее элементарным зарядом.

27.6. Большие электрические весы

С помощью микро-микровесов можно измерять заряд предмета, выражая его как определенное число элементарных зарядов. Мы знаем, что этот метод пригоден, когда число элементарных зарядов мало, а сам предмет — микроскопический. Будет ли он также пригоден для большого числа элементарных зарядов? Действительно, большое число элементарных зарядов не поместится на микроскопическом предмете. С другой стороны, если предмет достаточно велик, чтобы удерживать большой заряд, он будет слишком велик для микро-микровесов. Следовательно, микро-микровесы не годятся для определения большого числа элементарных зарядов.

Как же, однако, можно измерить большой заряд, рассматривая его как совокупность элементарных зарядов? Имеется несколько способов, но наиболее простой из них заключается в устройстве весов большего размера. Требуются весы, которые достаточно велики, чтобы поместить шар из опыта Кулона (см. разделы 27.1 и 27.2) или другой подобный предмет. Если можно измерить заряд на таком предмете, выразив его определенным числом элементарных зарядов, то тогда мы сумеем измерить любые заряды, как совокупности элементарных зарядов. Действительно, в следующем разделе мы увидим, что коль скоро удалось измерить один большой заряд, то опыт Кулона позволит измерить любой другой заряд, выразив его числом элементарных зарядов.

Новые весы должны быть достаточно велики, чтобы на них можно было поместить достаточно большой предмет, и в то же время должна быть известна электрическая сила, действующая на элементарный заряд между пластинами. (До тех пор пока неизвестна сила, действующая на элементарный заряд, весами можно пользоваться только для измерения больших зарядов, выраженных в произвольных единицах заряда.) Если бы можно было точно проделать опыт Милликена на больших весах, то можно было бы непосредственно сравнить большой заряд с элементарным зарядом. К несчастью, провести опыт Милликена на больших весах практически невозможно. Однако имеется способ обойти эту трудность: можно построить большие весы, в которых сила, действующая на каждый элементарный заряд между пластинами, в точности равна силе, дейст-

вующей на элементарный заряд в микро-микровесах. Для постройки таких больших весов необходимо узнать, как размеры весов связаны с силой, которую они создают. Тогда можно увеличить размеры весов без изменения силы.

Чтобы выбрать масштаб для весов, нужно изменить как площадь пластин, так и расстояние между ними. Можно опытным путем выяснить влияние каждого из этих изменений как с микро-микровесами, так и с заряженными пластинами, далеко отстоящими друг от друга и создающими силы, которые действуют на большие заряды.

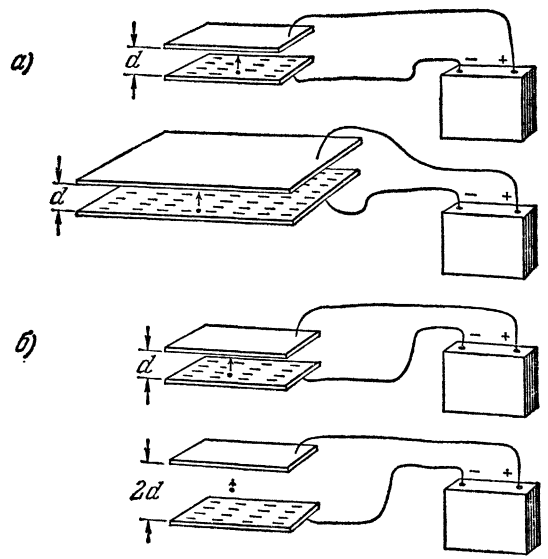


Рис. 27.22. *а*) Если увеличить площадь пластин без изменения расстояния между ними и без смены батареи, то сила, действующая на элементарный заряд, находящийся в любом месте между пластинами, останется неизменной. *б*) Если удвоить расстояние между пластинами при одной и той же присоединенной батарее, то сила уменьшится вдвое. Вообще сила пропорциональна $1/d$, где d — расстояние между пластинами.

Если пользоваться пластинами большей площади с тем же расстоянием между ними, присоединенными к той же батарее (рис. 27.22, *а*), то сила, действующая на заряд между ними, не изменяется. Однако если увеличить расстояние между пластинами с той же присоединенной к ним батареей, то сила уменьшится обратно пропорционально расстоянию (рис. 27.22, *б*). Уменьшение электрической силы можно скомпенсировать применением большего числа батарей для зарядки пластин. Так как сила возрастает пропорционально числу батарей (раздел 27.4), то при всяком увеличении в два раза расстояния между пластинами нужно удвоить число батарей. Непосредственная проверка подтверждает это. Пока размеры пластин велики по сравнению с расстоянием между ними, электрическую силу можно поддерживать неизменной, увеличивая расстояние ме-

жду пластинами и в том же отношении увеличивая число батарей. Площадь пластин не играет роли. Поэтому, для того чтобы довести электрические микро-микровесы до удобных размеров, применяются большие параллельные металлические пластины с надлежащим расстоянием между ними. Чтобы электрическая сила, действующая на элементарный заряд между пластинами, была такая же, как и в микро-микровесах, нужно заряжать пластины соответственно расстоянию между ними достаточным числом батарей, соединенных последовательно.

27.7. Постоянная в законе Кулона

При обсуждении закона Кулона и электрического заряда в разделах 27.1 и 27.2 мы нашли, что

$$F=kq_1q_2/r^2,$$

где F — сила, с которой один заряд действует на другой, q_1 и q_2 — заряды и r — расстояние между ними. Коэффициент пропорциональности k представляет постоянную. Его значение зависит от единиц, в которых измеряются сила, расстояние и заряд. Теперь мы в состоянии вычислить постоянную k в законе Кулона.

Можно измерить силу взаимодействия между одинаково заряженными шариками, прибегнув к опыту Кулона. В одном из подобных опытов было найдено, что два одинаково заряженных шарика на расстоянии 0,15 м отталкиваются друг от друга с силой $6{,}7\cdot10^{-4}$ Н. Заряд каждого шарика был определен посредством больших электрических весов, подобных описанным в предыдущем разделе. В этих весах сила, действующая на каждый элементарный заряд, была такая же, как между пластинами микро-микровесов, использованных в ранее выполненном опыте Милликена. Равенство этих сил было достигнуто путем увеличения расстояния между пластинами в 100 раз при увеличении числа последовательно включенных батарей тоже в 100 раз.

В опыте Милликена заряженный шарик поддерживался в состоянии покоя между пластинами, отстоящими друг от друга на $3{,}1\cdot10^{-3}$ м и подключенными к трем последовательно соединенным «анодным» батареям. Масса шарика составляла $2{,}9\cdot10^{-15}$ кг, так что вес его был $2{,}8\cdot10^{-14}$ Н. Таким образом, уравновешивающая вес электрическая сила должна была тоже равняться $2{,}8\cdot10^{-14}$ Н. Позже в том же опыте было установлено, что шарик имел два элементарных заряда. Следовательно, на каждый элементарный заряд приходилась сила в $1{,}4\cdot10^{-14}$ Н.

Сила, с которой на заряженный шарик действовали пластины в больших электрических весах, измерялась путем укрепления шарика на конце непроводящего коромысла (рис. 27.23, *а*). Сначала при незаряженных и отключенных от батареи пластинах шкала устанавливалась в такое положение, при котором указатель коромысла стоял на нуле шкалы. Затем, после подключения к пластинам трехсот 90-вольтовых батарей, регистрировалось отклонение указателя,

обусловленное действием электрической силы (рис. 27.23, *б*), которое, как оказалось, соответствовало силе в $3{,}55 \cdot 10^{-3}$ Н. Поскольку пластины действовали на каждый элементарный заряд силой в $1{,}4 \cdot 10^{-14}$ Н, заряд шарика должен был составлять

$$q = \frac{3{,}55 \cdot 10^{-3}\ \text{Н}}{1{,}4 \cdot 10^{-14}\ \text{Н/элем. зар.}} = 2{,}5 \cdot 10^{11}\ \text{элем. зар.}$$

Для опыта Кулона, описанного в начале этого раздела, мы теперь располагаем данными для всех экспериментально определяемых

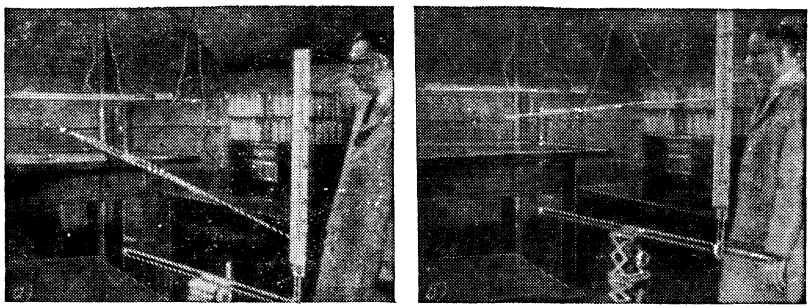


Рис. 27.23. Большие электрические весы. *а*) Шкала установлена так, что в отсутствие электрической силы указатель стоит на нуле. *б*) Когда к большим пластинам подключается группа батарей, электрическая сила давит на шарик вниз, заставляя пластмассовое коромысло, поддерживаемое вертикальным подвесом, поворачиваться в вертикальной плоскости. Все коромысло, его подвес и шкала смонтированы так, чтобы шарик находился в центре пространства между пластинами, где поле наиболее однородно. Шкала градуируется накладыванием на шарик крошечных грузиков известной массы (при незаряженных пластинах) с отсчетом числа делений, соответствующего известному весу грузика.

величин. Таким образом, теперь можно определить постоянную k в законе Кулона.

Имеем

$$k = \frac{Fr^2}{q_1 q_2} = \frac{(6{,}7 \cdot 10^{-4}\ \text{Н}) \cdot (0{,}15\ \text{м})^2}{(2{,}5 \cdot 10^{11}\ \text{элем. зар.}) \cdot (2{,}5 \cdot 10^{11}\ \text{элем. зар.})} =$$

$$= 2{,}4 \cdot 10^{-28}\ \text{Н} \cdot \text{м}^2/(\text{элем. зар.})^2.$$

Значение k может быть проверено путем повторения опыта Кулона с использованием больших электрических весов для измерения заряда. Как и следовало ожидать, величина k оказывается всегда одинаковой. Это одна из универсальных постоянных в природе. На точные измерения k затрачено много трудов в разнообразных опытах. Результаты всех этих опытов хорошо согласуются между собой. Значение, полученное в наиболее надежных опытах, составляет почти в точности $2{,}306 \cdot 10^{-28}$ Н·м^2/(элем. зар.)^2. Таким образом, закон Кулона можно писать в виде

$$F = 2{,}306 \cdot 10^{-28}\ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{(\text{элем. зар.})^2}\ \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где q_1 и q_2 — числа элементарных зарядов, а r — расстояние между элементарными зарядами q_1 и q_2.

Поскольку имеется принципиальная возможность измерять обычный заряд в виде числа элементарных зарядов, следует разработать методику измерения любого заряда в элементарных зарядах, не прибегая к крайнему средству помещения каждого заряда в большие электрические весы. Ключом к задаче измерения зарядов является знание величины константы k. Путем передачи зарядов от проводника к проводнику всегда есть возможность получить два равных заряда. После измерения силы их взаимодействия на известном расстоянии мы располагаем значениями как k, так и F и r в законе Кулона, после чего можно вычислить q в виде числа элементарных зарядов. Используя одно из одинаково заряженных тел в качестве эталона, можно вновь измерить число элементарных зарядов на любом другом теле посредством измерения силы его взаимодействия с эталоном.

Помимо практического средства подсчета числа элементарных зарядов методом измерения электрических сил между телами обычных размеров, константа $2{,}306 \cdot 10^{-28}$ Н·м^2/(элем. зар.)^2 непосредственно дает величину силы взаимодействия между двумя элементарными зарядами на расстоянии 1 м. Они действуют друг на друга с силой, в точности равной $2{,}306 \cdot 10^{-28}$ Н. Эта сила, разумеется, представляется нам неизмеримо малой. Но, в сущности говоря, она огромна. На этом расстоянии гравитационное притяжение между двумя атомами водорода равно всего лишь около $2 \cdot 10^{-64}$ Н. Сила электростатического взаимодействия между двумя элементарными зарядами в 10^{36} раз больше. (Чтобы назвать это число в виде миллион миллионов, придется повторить слово миллион шесть раз.) Эта сила настолько велика, что два моля элементарных зарядов (два набора по $6 \cdot 10^{23}$ элементарных зарядов), расположенных в диаметрально противоположных точках земного шара, отталкивали бы друг друга с силой в полмиллиона ньютонов. Два моля самых тяжелых атомов на таком же расстоянии друг от друга не оказывали бы никакого измеримого взаимного гравитационного притяжения.

27.8. Сохранение заряда

Представление о частицах заряда, к которому мы пришли, подсказывает вывод о сохранении заряда. Когда тела заряжаются путем трения, то заряженные частицы переносятся от одного тела к другому. Тот заряд, который приобретает одно тело, другое тело теряет. Когда пластины электрических весов заряжаются от батареи, то последняя переносит заряд от одной пластины к другой. Заряды пластин равны и противоположны.

При некоторых весьма необычных обстоятельствах можно «создавать» заряженные частицы, но мы увидим, что они всегда создаются парами и заряд одной частицы равен и противоположен заряду другой. Иногда природа сама «создает» заряженные частицы: например нейтрон превращается в протон и электрон. Полный

заряд равен нулю до и после превращения. Все имеющиеся в нашем распоряжении данные показывают, что полное количество заряда никогда не изменяется. Подобно сохранению энергии, сохранение заряда является законом природы, который распространяется на все известные нам явления.

27.9. Электрический заряд электронов

Нам уже известно, что электроны обладают отрицательным электрическим зарядом, но мы еще не выяснили, равен ли этот заряд одному или нескольким элементарным зарядам. Заряд электрона можно определить, если добавить к нейтральному телу электроны и найти их число, измерив заряд на теле и выразив его числом элементарных зарядов.

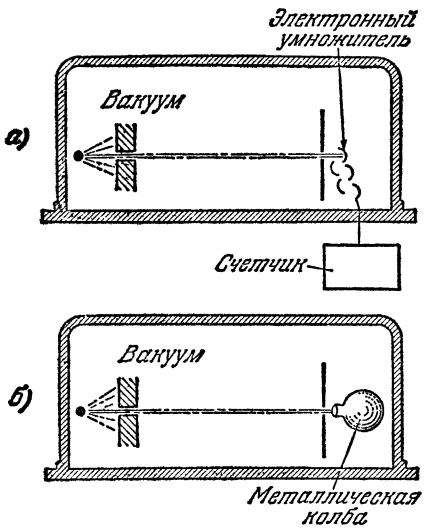


Рис. 27.24. *а*) Число электронов, проходящих в электронном пучке за секунду, можно измерить, направив пучок на счетчик. *б*) Можно определить заряд, переносимый этим пучком в секунду, направляя пучок в колбу с узким отверстием в течение достаточно продолжительного времени для накопления на колбе заряда, доступного измерению.

С помощью электронной пушки (см. раздел 26.13) можно создать пучок быстрых электронов, который даст светящееся пятно на флуоресцирующем экране. Если число электронов, проходящих в пучке за секунду, достаточно мало, то отдельные электроны вызовут отдельные сцинтилляции, подобные сцинтилляциям, с помощью которых в разделах 8.3 и 8.7 производился подсчет радиоактивных распадов. Хотя каждая сцинтилляция дает очень мало света, сцинтилляции можно обнаружить, наблюдая их с помощью фотоэлемента. Таким образом можно поодиночке сосчитать электроны. Электроны можно также считать непосредственно с помощью особого усилителя, называемого электронным умножителем. Путем такого счета можно определить экспериментально число электронов, проходящих в пучке за секунду (рис. 27.24, *а*).

Измерив число электронов в пучке за секунду, можно поймать пучок в металлическую колбу (рис. 27.24, *б*). Электроны, вошедшие в колбу, застревают в металлических стенках, и даже если они выбивают из внутренних слоев стенки другие электроны, то вряд ли какая-либо частица выберется наружу сквозь узкое горлышко колбы. Поэтому колба заряжается именно тем зарядом, который приносят электроны. По истечении достаточно долгого времени колба приобретает заряд, который можно измерить, и следовательно, можно определить заряд, который приносится в колбу за 1 се-

кунду. Разделив заряд, поступающий за секунду, на число электронов в пучке, проходящих за секунду, мы получим заряд электрона. Он в точности равен одному отрицательному элементарному заряду.

Можно воспользоваться измерением такого же рода для определения заряда частиц, выбрасываемых при радиоактивном распаде полония. Первый подобный опыт проделали Резерфорд и Гейгер в 1908 г. с целью определения заряда этих атомных осколков, обычно называемых альфа-частицами. Они нашли, что альфа-частица является носительницей в точности двух положительных элементарных зарядов. Последующие опыты показали, что альфа-частицу можно разложить на более основные частицы: на два протона и два нейтрона. Как нам уже известно, нейтроны электрически нейтральны. С другой стороны, каждый из протонов имеет один положительный элементарный заряд. В настоящее время известен ряд других заряженных частиц, которые отличаются по величине массы от электронов или протонов. Но если провести достаточно полное разложение вещества, то все обнаруженные электрические частицы всегда обладают одним положительным или одним отрицательным элементарным зарядом.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

1*. Два небольших наэлектризованных предмета A и B находятся на расстоянии 0,03 м и отталкивают друг друга с силой в $4 \cdot 10^{-5}$ Н. Если отодвинуть один из предметов дополнительно на 0,03 м, то чему после этого будет равна электрическая сила? (Раздел 27.1.)

2. Три одинаково заряженных предмета размещены, как показано на рис. 27.25. Электрическая сила, с которой A действует на B, равна $3 \cdot 10^{-6}$ Н.

а) Чему равна электрическая сила, с которой C действует на B?

б) Чему равна полная сила, действующая на B?

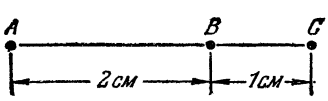


Рис. 27.25. К задаче 2.

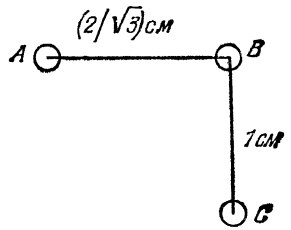


Рис. 27.26. К задаче 3.

3. Предположим, что три небольших заряженных шара с одинаковыми зарядами расположены, как показано на рис. 27.26. C действует на B с силой $4 \cdot 10^{-6}$ Н.

а) Чему равна сила, с которой A действует на B?

б) Чему равна полная сила, действующая на B?

4. Четыре одинаковых проводящих шара, посаженных на подвижные подушки из твердой углекислоты, удерживаются на гладкой горизонтальной площадке у ее четырех углов. Два из них имеют заряды по $+q$, а другие два по $-q$ каждый (рис. 27.27).

а) Начертите в масштабе векторную диаграмму электрических сил, действующих на шар *1*.

б) Если одновременно отпустить все подвижные подушки, то в каком направлении начнет двигаться каждая из них?

5. Два одинаковых и одинаково заряженных проводящих шара A и B отталкиваются друг от друга с силой $2 \cdot 10^{-5}$ Н (рис. 27.28, *а*). Другой такой же незаряженный шар C приведен в соприкосновение с A (рис. 27.28,*б*) и затем перенесен к B (рис. 27.28,*в*).

а) Чему равна полная электрическая сила, приложенная к A?

б) Чему равна полная электрическая сила, действующая на C (после соприкосновения с A), когда C находится на середине расстояния между A и B?

6. Два заряженных шара A и B с массой m каждый расположены, как показано на рис. 27.29. Шар A может свободно двигаться; B закреплен.

а) Как сила взаимодействия между ними F_e зависит от расстояния x?

б) Найдите соотношение между электрической силой F_e, весом mg и величинами x и l.

б) Если заряд остается без изменения, а расстояние уменьшено вдвое, то как должен измениться вес?

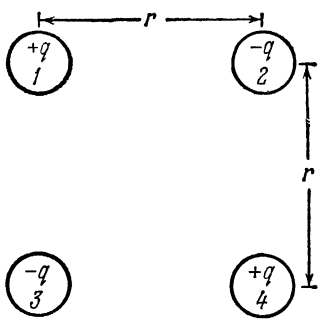


Рис. 27.27. К задаче 4.

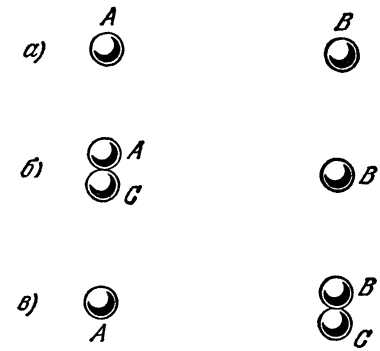


Рис. 27.28. К задаче 5.

7. На графике 27.30 представлена электрическая сила отталкивания, действующая на очень маленький заряженный проводящий шарик A, в функции расстояния его центра от центра большого проводящего шара B. Радиус большого шара 1 см, а его заряд в 10 раз больше заряда маленького шарика.

а) Как изменится сила при изменении расстояния с 5 до 3 см?

б) Объясните поведение силы для расстояний, лежащих между 2 и 1 см.

8*. Что произошло бы с силой, действующей на подвижный заряд на рис. 27.5, если бы заряд *3* изменил свой знак? (Раздел 27.3.)

9*. Сопоставьте поля, изображенные на рис. 27.8, с картиной полей, полученных с помощью семян камыша (рис. 27.9). (Раздел 27.3.)

10*. Могут ли электрические силовые линии пересекаться? (Раздел 27.3.)

11*. Если заряженная частица подвижна, будет ли она перемещаться по силовой линии электрического поля? (Раздел 27.3.)

12. Если продолжить опыт, иллюстрируемый рис. 27.18, то каких скоростей шарика можно ожидать в случаях, изображенных на рис. 27.31?

13. Предположим, что измерена скорость стандартных шариков (вес $2{,}8 \cdot 10^{-14}$ Н) между пластинами микро-микровесов, и оказалось, что она равна $^3/_2$ их скорости, развиваемой под действием одной только силы тяжести. Чему равна действующая на них электрическая сила:

а) если они движутся вверх;

б) если они движутся вниз?

14. Существует соотношение между зарядом двух параллельных пластин и силой их действия на заряженное тело, помещенное между ними. Существует также зависимость между этой силой и числом включенных в цепь одинаковых батарей. Какова зависимость между зарядом пластин и числом этих батарей?

15. Как повлияет увеличение размера пластмассовых шариков в опыте Милликена на их конечную скорость?

16*. Если в одном из опытов Милликена сила, приложенная к каждому элементарному заряду, составляла $1{,}4 \cdot 10^{-14}$ Н, то чему она стала бы равна, если бы расстояние между пластинами было увеличено в 10 раз? (Раздел 27.6.)

17. Обратимся к рис. 27.22,*б*.

а) Каким образом, не перемещая пластин, расстояние между которыми равно $2d$, можно увеличить силу, приложенную к элементарному заряду между

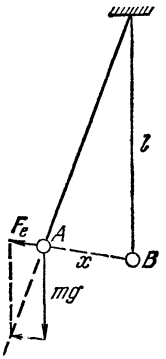


Рис. 27.29. К задаче 6.

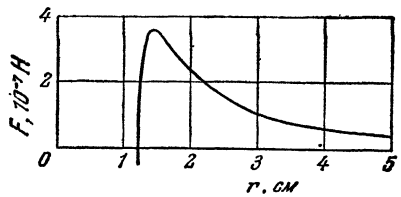


Рис. 27.30. К задаче 7.

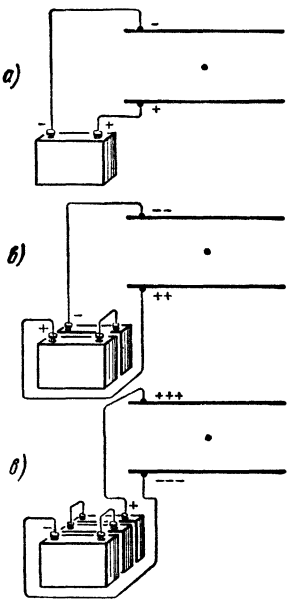


Рис. 27.31. К задаче 12.

ними, до такого значения, которое она имела бы при расстоянии d между пластинами?

б) Пластины, расстояние между которыми равно $2d$, изолированы таким образом, что при отключении их от батареи заряд пластин не изменяется. При отключении пластин от батареи и последующем разведении их до расстояния $3d$ оказалось, что сила действия на элементарный заряд не изменилась. Если вновь присоединить их к той же батарее, то какое число таких же батарей нужно включить последовательно, чтобы сила не изменилась?

18. Заряжен только один из нескольких одинаковых металлических шаров. На заряженный шар A, помещенный посередине между заряженными параллельными пластинами, действует сила $1 \cdot 10^{-4}$ Н.

а) Шар A приводится в соприкосновение с одним из незаряженных шаров (B). Какая сила действует теперь на шар A, если его поместить между теми же пластинами?

б) A приводится затем в соприкосновение с другим незаряженным шаром (C). Какая сила действует теперь на шар A?

в) Какая сила действует на шар B, когда он находится между пластинами? На шар C?

19. Две большие металлические пластины находятся друг от друга на расстоянии 0,1 м. Они присоединены к зажимам батареи. На небольшой заряженный шарик, находящийся посередине между ними, действует сила $3 \cdot 10^{-4}$ Н. Затем

пластины раздвигаются до расстояния между ними в 0,15 м. К ним присоединена та же батарея.

а) Какая сила действует теперь на шарик?

б) Чему будет равна сила, действующая на шарик, если при новом расстоянии добавить еще две такие же батареи, соединенные последовательно?

20*. Какова сила отталкивания между двумя маленькими шариками на расстоянии 1 м друг от друга, если на каждом шарике имеется избыток в 10^6 элементарных зарядов? (Раздел 27.7.)

21. Пластмассовый шарик массой $3{,}06 \cdot 10^{-15}$ кг находится в поле электрических сил, в котором на каждую положительную электрическую частицу действует сила, направленная вверх и равная $1 \cdot 10^{-14}$ Н. Электрическая сила, действующая на шарик, достаточна для уравновешивания приложенной к нему силы тяжести.

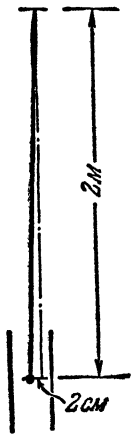


Рис. 27.32. К задаче 22.

а) Чему равен избыток электрических частиц на шарике?

б) Предположим, что масса каждой молекулы равна $3 \cdot 10^{-26}$ кг. Сколько молекул имеется в шарике?

в) Какая доля молекул в шарике потеряла или приобрела элементарный заряд?

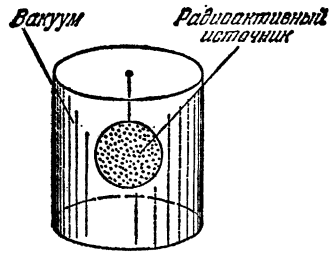


Рис. 27.33. К задаче 24.

22. Шарик массой $4{,}5 \cdot 10^{-3}$ кг подвешен на проволоке длиной 2 м между двумя противоположно заряженными параллельными пластинами, как показано на рис. 27.32. При достижении равновесия шарик сместился на 2 см из первоначального положения.

а) Чему равна величина электрической силы, действующей на шарик?

Электрическая сила действует на элементарный заряд между пластинами с силой $3 \cdot 10^{-14}$Н.

б) Чему равен избыток электрических частиц на шарике?

23. В одном из опытов на двух тонких непроводящих нитях длиной 82 см было подвешено два небольших проводящих шарика. При сообщении им равных зарядов они разошлись и пришли в равновесие при расстоянии в 10 см между их центрами. Каково было число элементарных зарядов на каждом шарике?

24. На небольшой проводящий шарик нанесен тонкий слой радиоактивного вещества, испускающего бета-частицы. Затем шарик подвешивался на изолирующей нити в откачанной камере (рис. 27.33). Через 50 дней был измерен заряд на шарике, который оказался равным $4{,}32 \cdot 10^{10}$ положительных элементарных зарядов. (Шарик находился в откачанной камере, так что могло утечь только очень малое число зарядов.) В отдельном опыте со счетчиком Гейгера оказалось, что бета-частицы вылетают со средней скоростью в $1 \cdot 10^4$ частиц в секунду.

а) Чему равен заряд одной бета-частицы?

б) Чем, по вашему мнению, являются бета-частицы?

ГЛАВА

28 ЭНЕРГИЯ И ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯДОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

В этой главе рассматривается движение зарядов в электрических полях. Оно используется для определения масс заряженных частиц и рассмотрения токов в электрических цепях. В частности, будут определяться масса положительных ионов водорода и масса электронов, так как эти заряженные частицы играют центральную роль в последующем изучении атомов. Когда заряженные частицы ускоряются, изменяется их кинетическая энергия. Энергия передается частицам. Превращение энергии (из химической энергии в энергию движущихся частиц и в тепловую энергию) позволяет рассматривать все виды электрических цепей с единой точки зрения.

28.1. Определение масс электрона и протона

В этом разделе мы покажем, каким образом можно экспериментально определить массу электрона или протона, ускоряя заряженную частицу на известном отрезке пути в известном однородном электрическом поле и измеряя ее конечную скорость. Как было показано в части III, если тело проходит путь d в направлении силы $\boldsymbol{F}$, то работа Fd, затраченная на перемещение тела, равна приращению его кинетической энергии. Если же движение начинается от состояния покоя, то эта работа равна также конечной кинетической энергии тела:

$$Fd=mv^2/2.$$

Таким образом, если известны F, d и v, то отсюда можно найти массу m.

В опытах, о которых пойдет речь, интересующие нас заряженные частицы ускоряются однородным силовым полем между двумя заряженными металлическими пластинами. Зная расстояние между пластинами и число заряжающих их батарей, можно определить электрическую силу, приложенную к каждому элементарному заряду. Опыты производятся в вакууме, чтобы исключить сопротивление воздуха, имевшее место в микро-микровесах, описанных в предыдущей главе. Кроме того, поскольку протоны и электроны более чем в 10^{11} раз легче пластмассовых шариков, использованных в микро-микровесах, в данных опытах можно пренебречь силой тяготения по сравнению с электрическими силами.

Некоторое количество водорода подвергается ионизации вблизи пары заряженных пластин (рис. 28.1), после чего некоторые из ионов заходят с пренебрежимо малой скоростью через небольшое отверстие в пространство между пластинами. По мере движения ионов от одной пластины к другой электрическое поле ускоряет ионы, сообщая им конечную кинетическую энергию $mv^2/2$. В правой пластине имеется небольшое отверстие, через которое некоторые из ионов могут попадать в камеру длиной 0,50 м (рис. 28.2). Эта камера изготовлена из проводящего материала, и, поскольку в ней нет электрического поля, ионы проходят всю ее длину без изменения своей скорости. На прохождение всего этого пути иону требуется всего лишь несколько микросекунд (1 мкс$=10^{-6}$ с). Хотя этот промежуток времени и очень мал, все же он доступен точному измерению посредством специального измерительного устройства. Это позволяет точно определить конечную скорость иона v.

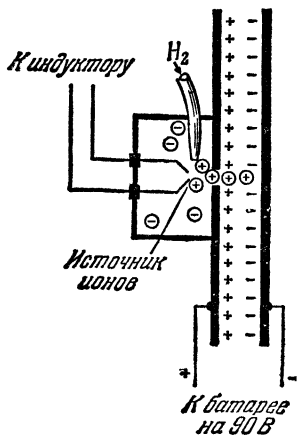


Рис. 28.1. Прибор для ускорения ионов водорода в поле электрических сил. Ионы образуются в камере слева, и некоторые из них проходят через отверстие между пластинами. Вся установка заключена в вакуумную камеру.

Для измерения времени прохождения ионами длинной камеры от одного конца до другого надо заметить момент, когда данный ион покинет данную точку слева, и время, когда этот же ион достигнет дальнего конца справа. Идею такого опыта можно понять, рассматривая опыты, описанные ниже мелким шрифтом. Чтобы заметить время, когда данный ион входит в длинную камеру, помещаем около входа пару небольших отклоняющих пластин (рис. 28.3). С их помощью можно управлять направлением пучка водородных ионов. Когда отклоняющие пластины заряжены, на ионы водорода действует боковая электрическая сила, которая отклоняет их в сторону от их траектории. Если же затем разрядить отклоняющие пластины, то по продольной оси камеры будут двигаться только те ионы, которые только что или позже попали в камеру; поэтому первыми ионами, прошедшими отверстие на дальнем конце, будут те, которые прошли весь путь в 0,50 м за время с момента разрядки пластин. Приход этих ионов регистрируется воспринимающим элементом, помещенным за отверстием.

Для измерения промежутка времени с момента разрядки пластин до момента прихода первых ионов на воспринимающий элемент отклоняющие пластины в камере соединяются с вертикальными отклоняющими пластинами осциллографа (рис. 28.4). Момент разряжения пластин в длинной камере отмечается пиком на кривой, вычерчиваемой на экране осциллографа. Воспринимающий элемент у дальнего конца длинной камеры присоединяется к тем же верти-

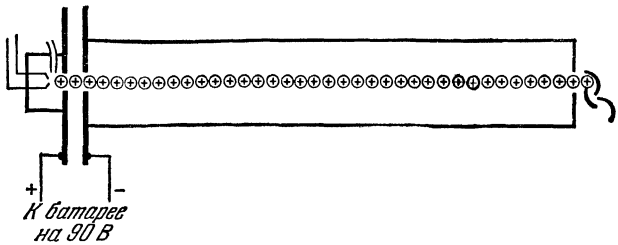


Рис. 28.2. Для измерения массы ионов водорода просверлим в правой пластине отверстие позволяющее некоторым ионам попадать в длинную камеру справа, где на их движение не влияют силы.

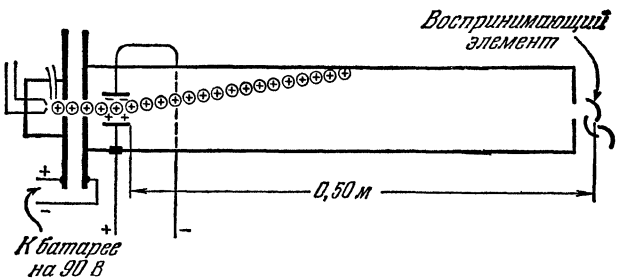


Рис. 28.3. Когда отклоняющие пластины заряжены, электрическая сила отклоняет пучок в сторону. Если пластины разряжены, ионы движутся прямо и их приход регистрируется воспринимающим элементом.

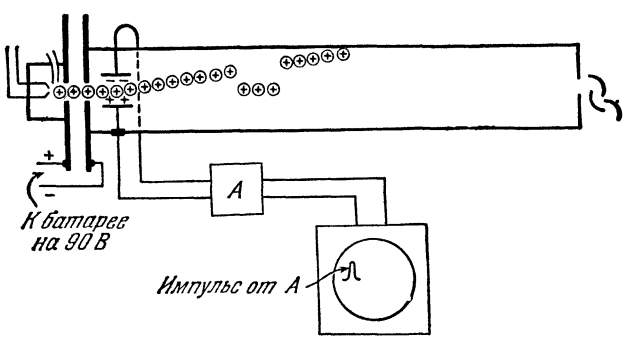


Рис. 28.4. Когда пластины мгновенно разряжаются, то пропускается короткий импульс ионов, движущийся прямо по длине камеры к воспринимающему устройству. Разряд отмечается в виде пика на экране осциллографа, что дает время начала прохождения импульса ионов.

кальным отклоняющим пластинам осциллографа (электрические соединения обоих концов камеры выполняются совершенно одинаково). Когда пучок ионов попадает в воспринимающий элемент, на экране осциллографа появляется второй пик (рис. 28.5). Два пика появляются в разных местах экрана, так как они возникли в разное время. В течение промежуточного времени между этими двумя моментами развертывающая цепь осциллографа вызывает горизонтальное перемещение электронного пучка на экране. Электронный

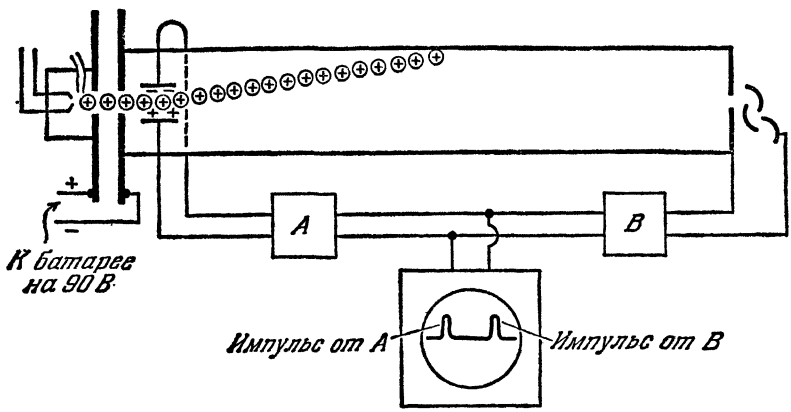


Рис. 28.5. Когда импульс ионов достигает воспринимающего устройства, на осциллографе появляется второй пик. По расстоянию между пиками можно определить время движения этой группы ионов.

пучок в осциллографе проходит расстояние между двумя пиками за то же время, за какое ионы водорода проходят 0,50 м в камере. (Для ясности можно снова проследить эти рассуждения на более простом опыте, который описан ниже мелким шрифтом.)

В современных осциллографах цепь развертки может вызвать горизонтальное перемещение электронного пучка на экране трубки от одного конца до другого за несколько сотых долей микросекунды. Для измерения скорости ионов цепь развертки настраивается так, чтобы вся кривая проходилась за 5 микросекунд. Тогда два пика на экране осциллографа будут заметно разделены. Измерением расстояния между пиками определяется время, за которое пучок пересекает длинную камеру. Находят промежуток времени от момента, когда пучок получает возможность двигаться прямо вперед, до момента, когда он попадает в воспринимающий элемент, с точностью до 0,01 микросекунды. В случае ионов водорода и 90-вольтовой батареи, создающей ускоряющую электрическую силу, время пролета равно 3,82 микросекунды. Отсюда можно вычислить скорость v ионов в длинной камере. Она равна $0{,}50\ \text{м}/(3{,}82 \cdot 10^{-6}\ \text{с}) = 1{,}31 \cdot 10^{5}\ \text{м/с}$.

С другой стороны, пластины здесь ровно втрое дальше друг от друга, чем в микро-микровесах, в которых производился опыт Милликена, описанный в предыдущей главе; кроме того, здесь исполь-

зуется втрое меньше таких же батарей. Поскольку сила, приходящаяся на элементарный заряд, пропорциональна числу одинаковых батарей и обратно пропорциональна расстоянию между пластинами, на каждый элементарный заряд теперь должна действовать в девять раз меньшая сила, т. е. $^1/_9 \cdot (1{,}4 \cdot 10^{-14})$. Если предположить, что один атом водорода несет один элементарный заряд, то каждый ион между пластинами испытывает только что выраженную силу. Двигаясь от одной пластины к другой, ион проходит путь $9{,}3 \cdot 10^{-3}$ м по направлению силы, так что произведенная работа по перемещению иона равна $Fd = {}^1/_9 \cdot (1{,}4 \cdot 10^{-14}\ \text{Н}) \cdot (9{,}3 \cdot 10^{-3}\ \text{м}) = 1{,}4 \cdot 10^{-17}$ Дж. Следовательно,

$$mv/2 = m\ (1{,}3 \cdot 10^5\ \text{м/с})^2/2 = 1{,}4 \cdot 10^{-17}\ \text{Дж}.$$

Отсюда для массы иона водорода m находим

$$m = 1{,}7 \cdot 10^{-27}\ \text{кг}.$$

Но ведь эта величина нам хорошо известна. В пределах точности наших измерений она совпадает с массой атома водорода. Эта масса была вычислена в гл. 8. Там были известны число молекул водорода в данном образце газообразного водорода и масса этого образца; отсюда было найдено, что масса молекулы водорода составляет $3{,}34 \cdot 10^{-27}$ кг, а масса атома, таким образом, равна $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг.

Теперь можно подвести итог. Если ион водорода заряжен однократно, то его масса почти равна массе атома водорода. Можно даже сделать дальнейший шаг и утверждать, что ион водорода действительно является носителем единичного заряда и что его масса практически равна массе атома. Это должно быть правильным, так как предположение, что ион несет больший заряд, приведет к абсурдному результату. Например, если ион несет два элементарных заряда, то действительная величина $mv^2/2$ должна быть в два раза больше принятого нами значения. Поскольку мы измеряли v, это может только значить, что масса иона в два раза больше найденной нами. Такой ион водорода обладал бы массой, в два раза превосходящей массу атома, осколком которого он является. Этот вывод настолько неправдоподобен, что мы его отбрасываем.

Ранее уже имелись указания, что электроны представляют собой строительные элементы, входящие во все атомы. По-видимому, ион водорода представляет собой атом водорода, потерявший один электрон. Кроме того, мы никогда ни в этом, ни в других опытах не встречали положительно заряженного осколка водорода с двумя положительными элементарными зарядами. Это одно из многих доказательств того, что положительно заряженный ион водорода является конечным строительным элементом. Это — протон. Как указывалось в гл. 27, протоны также обнаруживаются в альфа-частицах и осколках более тяжелых атомов. Когда водород расщепляется на заряженные частицы, то, как только что было установлено, протону принадлежит почти вся масса атома. Поэтому электроны должны быть очень легкими. Можно использовать те же приборы для измерения массы электрона и таким образом проверить этот вывод.

Если ион водорода получается удалением электрона из атома водорода, то в источнике ионов (в левой части нашего прибора) должны также получаться электроны. Переключением батареи можно ускорить электроны, которые пройдут через отверстие в левой пластине, и можно отбросить ионы водорода. Можно также использовать испускание электронов раскаленной нитью — с любым источником получаются одинаковые результаты. Так как электроны проталкиваются между пластинами той же силой на то же расстояние, то они приобретут ту же величину кинетической энергии $mv^2/2$, т. е.

$$mv^2/2 = 1{,}44 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}.$$

Поскольку они значительно легче положительно заряженных ионов, они будут двигаться быстрее, проходя через отверстие во второй пластине и через длинную камеру. Таким образом, при измерении скорости, с которой электроны проходят через длинную камеру, обнаруживается, что мы находимся ближе к пределам, ограничивающим возможности нашей аппаратуры. Если контур развертки настроен так, что скорость прохождения экрана трубки соответствует 0,12 микросекунды, то на экране осциллографа можно наблюдать два пика. Они находятся на расстоянии, которое проходится примерно за 0,09 микросекунды. Однако для точного измерения интервала между ними (с ошибкой менее 10%) требуются необычайно быстрый осциллограф и очень острые пики. Приняв 0,09 микросекунды за первое приближение, находим, что скорость составляет примерно $5{,}6 \cdot 10^6$ м/с. Следовательно, масса электрона (вычисленная так же, как масса положительного иона) равна приблизительно $0{,}9 \cdot 10^{-30}$ кг. При точном измерении для массы электрона получается значение $0{,}911 \cdot 10^{-30}$ кг, что составляет около 1/2000 массы атома водорода*).

При измерении массы ионов можно изменять отдельные условия опытов таким образом, чтобы пользоваться различными известными значениями электрической силы и различными расстояниями между пластинами. Тогда величина $mv^2/2$ принимает различные значения. Для определения масс можно использовать и другие методы — один из них будет описан в гл. 30. Результаты получаются те же самые. В настоящее время массы многих ионов установлены очень точно, что дает возможность точно определять массы атомов.

Только что описанные опыты дают сведения о двух основных строительных элементах атома: о протоне и электроне. При объяснении этих опытов мы, естественно, пользуемся ньютоновской механикой, которую изучали в части III. Поскольку получающиеся результаты разумны и согласуются между собой, можно сделать вывод, что ньютоновская механика может применяться в очень широких пределах. Она дает очень точное описание движения больших масс на больших

*) С современными быстрыми осциллографами и усилителями можно измерять интервалы времени дл 10^{-9} с. Поэтому в настоящее время можно использовать эти приборы для измерений с точностью до 1%. Раньше точные измерения проводились другими методами, которые будут рассмотрены в разделе 30.7.

расстояниях (планет в солнечной системе); она применима к обычным массам умеренных размеров, встречающимся в повседневной жизни; она также применима к электронам с малой массой, движущимся на относительно небольших расстояниях с огромной скоростью. Следовательно, имеет смысл попытаться применить ту же механику и те же силы к электронам внутри атомов. В частности, можно построить модель атома водорода, в которой отдельный электрон движется вокруг сравнительно массивного протона под действием кулоновской силы. Так как кулоновская сила, как и сила притяжения между Солнцем и планетой, обратно пропорциональна квадрату расстояния, то эту модель можно назвать планетарной моделью атома. В планетарной модели водорода электрон движется вокруг протона по эллиптической орбите, подобно движению планеты вокруг Солнца. Планетарная модель ,как мы увидим в разделе 32.5, встречает некоторые трудности, но она является хорошим первым приближением к реальному поведению атома. С тех пор как Резерфорд предложил ее в 1911 г., она играла центральную роль в нашем понимании атома.

Определение скорости по времени пролета. Чтобы понять идею этого опыта, обратимся к измерению скорости металлического шарика, равномерно движущегося по желобу (рис. 28.6). В двух точках траектории шарика в желобе имеются контакты; когда шарик проходит мимо каждого контакта, он замыкает цепь.

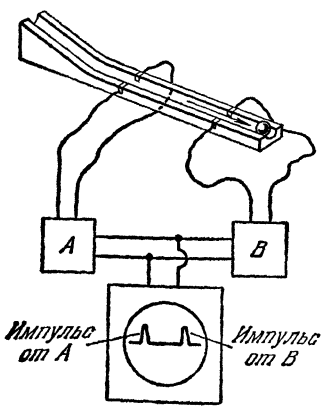


Рис. 28.6.

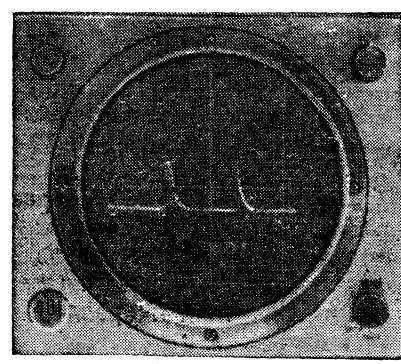


Рис. 28.7.

Когда шарик проходит мимо первого контакта, то на мгновение через шарик проходит ток от батареи, заключенной в ящике A. В тот же момент ящик A под действием тока посылает импульс в осциллограф, в результате чего на экране осциллографа появляется пик. Положение этого пика на горизонтали показывает момент, когда шарик прошел мимо первого контакта.

Во время движения шарика от первого контакта ко второму цепь развертки осциллографа продолжает чертить линию на экране слева направо. При прохождении шариком второго контакта такой же механизм в ящике B создает второй пик на экране осциллографа. Положение второго пика соответствует моменту, когда шарик проходит второй контакт. Расстояние между двумя пиками является мерой промежутка времени, «времени пролета» шарика между первым и вторым

контактами в желобе. На рис. 28.7 показан снимок с экрана осциллографа при таком измерении. Луч вычерчивает кривую, проходя от одной стороны сетки линий на экране к другой за 1 с. Таким образом, расстояние между пиками соответствует 0,38 с. За это время шарик прошел 24 см от одного контакта до другого. Следовательно, его скорость равна 0,63 м/с.

28.2. Электрический ток

Пучки протонов и электронов в опытах, описанных в предыдущем разделе, представляют собой электрические токи. Естественной мерой таких токов является число элементарных зарядов, переносимых за секунду.

Если пучок положительно заряженных частиц направлен в металлический сосуд, то сосуд с течением времени приобретает все больший и больший электрический заряд. По этому признаку можно сказать, что ток направлен внутрь сосуда. Направление тока совпадает с направлением движения положительно заряженных частиц.

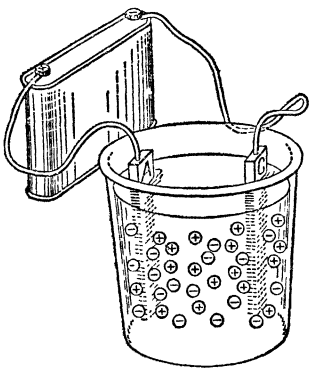


Рис. 28.8. Электролитическая ванна соединена последовательно с батареей. Ток в ванне создается положительными ионами, движущимися от A к C, и отрицательными ионами, движущимися от C к A.

Пучок отрицательно заряженных частиц также представляет собой электрический ток. Но когда мы ловим его в металлический сосуд, заряд сосуда уменьшается. Если мы одновременно ловим пучки положительно и отрицательно заряженных частиц, то они нейтрализуют друг друга. Если в сосуд за секунду поступает одинаковое число положительно и отрицательно заряженных частиц, то заряд сосуда не изменяется. Хотя пучок отрицательно заряженных частиц движется по направлению к сосуду, он образует ток, направленный от сосуда, опорожняя сосуд от положительно заряженных частиц столь же быстро, как положительно заряженный пучок наполняет его. Иначе говоря, пучок отрицательно заряженных частиц образует электрический ток, направление которого противоположно направлению движения отрицательно заряженных частиц. Вообще электрический ток может вызываться движением как положительно, так и отрицательно заряженных частиц. Общий электрический ток обусловлен суммой числа положительных элементарных зарядов, протекающих за секунду (вызывающих электрический ток в направлении их движения), и отрицательных элементарных зарядов, протекающих за секунду (вызывающих электрический ток в направлении, противоположном их движению).

Нам уже известен пример возникновения электрического тока с помощью заряженных частиц обоих знаков, движущихся в противоположных направлениях. В электролитической ванне, показанной на рис. 28.8, ионы движутся в обоих направлениях. Положительные ионы, движущиеся от A к C, составляют часть электрического тока

в направлении к C. Остальная часть этого тока создается отрицательными ионами, движущимися в противоположном направлении.

Полный электрический ток не начинается и не кончается в электролитической ванне. Он входит через проволоку от положительного зажима батареи к A, выходит через проволоку от C и идет к отрицательному зажиму батареи. В каждой из этих проволок движущимися заряженными частицами являются электроны, и эти отрицательные частицы движутся в направлении, противоположном направлению электрического тока. Например, они идут от A к положительному зажиму, вызывая перенос положительно заряженных частиц от зажима к A. Рассматривая всю цепь, мы видим, что электрический ток течет во внешней цепи от положительного к отрицательному полюсу батареи. С другой стороны, внутри батареи ток идет от отрицательного полюса к положительному. Батарея продолжает перемещать положительно заряженные частицы к положительно заряженному зажиму и отрицательно заряженные частицы к отрицательному зажиму, несмотря на электрическое отталкивание этих частиц от зажимов. В этом процессе батарея использует химическую энергию для насильственного перемещения заряженных частиц к зажимам.

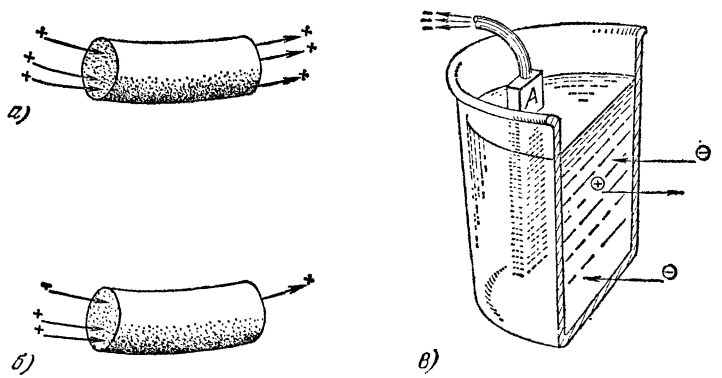


Рис. 28.9. *а*) Если одинаковое число элементарных зарядов входит через один конец и выходит через другой конец отрезка цепи, то в ней заряды не накапливаются. *б*) Если число входящих зарядов больше числа выходящих, то происходит накопление зарядов на данном участке цепи. Поэтому отсутствие накопления зарядов свидетельствует о том, что силы тока на концах участка цепи равны. *в*) В показанном на рисунке участке цепи электроны текут по проволоке, а ионы движутся в электролитической ванне. Так как заряды не накапливаются, то можно сказать, что сумма отрицательных и положительных ионов, проходящих через поперечное сечение ванны, должна быть равна числу электронов, проходящих через поперечное сечение проволоки.

Результирующая скорость течения элементарных зарядов одинакова во всей цепи. Так должно быть потому, что когда ток течет равномерно, заряды не скапливаются ни в каком участке цепи. Поэтому в один конец какого-либо участка входит столько же элементарных зарядов, сколько через другой конец выходит (рис. 28.9).

Постоянный электрический ток нельзя измерить, наблюдая изменение заряда. Но можно представить себе наблюдателя, который

может сосчитать элементарные заряды, проходящие мимо определенной точки цепи. Если проследить за частицами, проходящими по проволоке в определенном месте, то можно обнаружить I отрицательно заряженных частиц, или I электронов, проходящих за секунду. Если смотреть на заряженные частицы, проходящие через электролитическую ванну в определенном месте, то также будет обнаружено I элементарных заряженных частиц, проходящих в секунду. Но здесь надо подсчитать как число отрицательных частиц, движущихся в одном направлении, так и число положительных частиц, проходящих в противоположном направлении, и сложить эти числа для получения полного электрического тока, являющегося мерой полного переноса заряда (рис. 28.9 и 28.10). Из следующего раздела будет видно, как можно реально измерить постоянный ток.

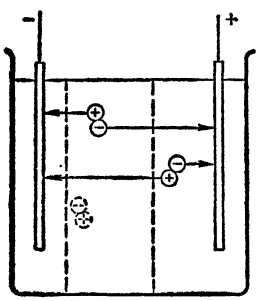


Рис. 28.10. Когда в ванне образуется некоторое число пар ионов, такое же число положительных ионов поступает на отрицательный электрод и такое же число отрицательных ионов — на положительный электрод. Стрелки показывают, как ионы движутся к электродам. Сосчитайте число стрелок, пересекающих пунктирные линии. Общее число положительных и отрицательных ионов, пересекающих любую границу между электронами, одинаково.

28.3. Электролитическое измерение электрических токов

Наблюдатель, который мог бы видеть протекающие элементарные заряды, является лишь продуктом воображения. Но при определенных обстоятельствах мы можем провести равноценные наблюдения. Например, мы уже считали число электронов в слабом пучке из электронной пушки. В этом разделе будет описан способ измерения числа элементарных зарядов посредством определения массы, переносимой ионами в растворе.

Для этой цели нужно взять несколько электролитических ванн, *последовательно* соединенных с батареей, как показано на рис. 28.11. При таком соединении через каждую ванну проходит одно и то же число заряженных частиц. Различные ванны содержат растворы солей разных металлов, например серебра и меди. Электроды сделаны из платины (или угля), которая химически не взаимодействует ни с одним из этих растворов. В систему входит также ванна, содержащая слабую кислоту, например соляную (HCl), молекулы которой вместо металла содержат водород, и ванна, содержащая Al в соединении Al_2O_3. Электролитические ванны с ионами серебра, меди и водорода можно изготовить самим. Ванна с ионами алюминия отлична от предыдущих. Окись алюминия Al_2O_3 растворяется в расплавленном криолите, и алюминий, который идет к отрицательному электроду, также находится в расплавленном состоянии. Ванны такого рода обычно применяются для очистки алюминия.

Когда ионы движутся через растворы, отрицательные электроды покрываются металлами, находящимися в растворенных солях.

Газообразный водород в виде пузырьков выделяется на отрицательном электроде в ванне, наполненной кислотой. Этот результат показывает, что если молекулы этих солей ионизованы, то положительные ионы переносят атомы металла (или, возможно, они являются положительно заряженными атомами металла). Когда эти ионы достигают отрицательных электродов, атомы металла обычно оседают на электродах. Видно также, что ионы водорода положительны,

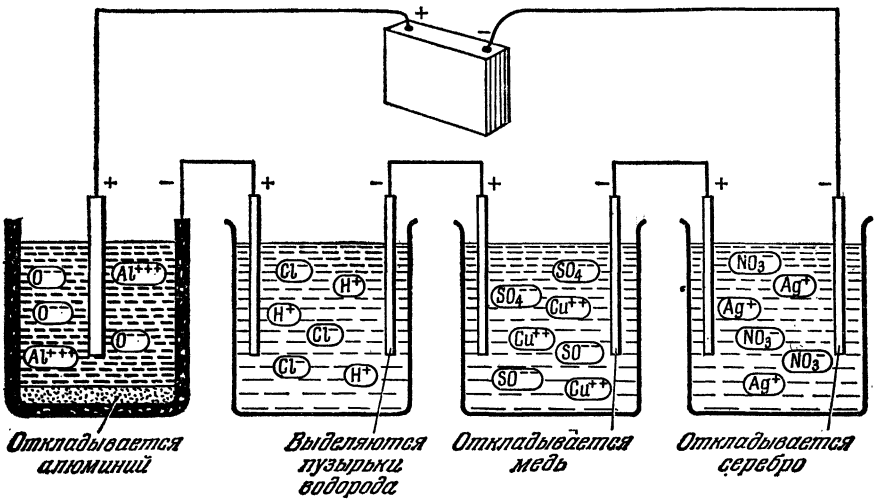


Рис. 28.11. Электролитические ванны, соединенные последовательно с батареей.

и при их нейтрализации на отрицательном электроде образуется газообразный водород.

Взвешиванием электродов до и после пропускания электрического тока через ванну можно определить массу осажденного в каждой ванне металла. Зная эту массу и массу моля металла, можно вычислить количество осажденных молей. Подобным же образом можно определить число молей водорода. В результате таких вычислений обнаруживается замечательный факт: на каждый моль осажденного серебра выделяется один моль атомов водорода, $^1/_2$ моля меди и $^1/_3$ моля алюминия.

Так как моль любого элемента содержит одно и то же число атомов, можно видеть, что заряд, переносимый одним ионом серебра, равен заряду, переносимому одним ионом водорода; заряд, переносимый одним ионом меди, в два раза больше заряда, переносимого одним ионом серебра, а заряд, переносимый одним ионом алюминия, в три раза больше. Вообще получается, что заряды всех ионов в растворе являются малыми целыми кратными единичного заряда, если за единицу принять заряд иона серебра (или иона водорода). Это крупнейшее открытие сделал Фарадей в 1833 г. Оно явилось первым убедительным доказательством существования элементарного заряда.

Наименьший заряд, переносимый ионом электролита — заряд иона серебра или иона водорода,— должен быть равен элементарному заряду, найденному в опытах Милликена (см раздел 27.5). В пользу этого имеется целый ряд доводов Например, если ион водорода движется в растворе электролита к отрицательному платиновому электроду, он нейтрализуется электроном платины. Затем нейтральные атомы водорода соединяются, образуя газообразный водород, который выделяется в виде пузырьков на отрицательном электроде. Поскольку платина дает обычные электроны — других не бывает — и поскольку образующийся газообразный водород тождествен водороду другого происхождения, ионы водорода в растворе должны быть тождественны с ионами водорода, масса которых определялась в разделе 28.1. Подобно тем ионам водорода, эти ионы также должны обладать в точности одним положительным элементарным зарядом, который может быть нейтрализован отрицательным элементарным зарядом электрона.

На другом электроде в этой же электролитической ванне нейтрализуются отрицательные ионы и образуется газ из нейтральных молекул. Отрицательные ионы теряют свой отрицательный заряд, отдавая обыкновенные электроны положительному электроду; эти электроны затем движутся по проводу к положительному зажиму батареи.

Вообще ионы любого вида, попадая на электроды электролитической ванны, превращаются в нейтральные атомы и молекулы, и эта нейтрализация осуществляется соединением с обычными электронами из платинового электрода или отдачей обычных электронов электроду. Поэтому все заряды ионов должны быть кратными элементарному заряду, и, вероятно, наименьший заряд иона тот же, что и элементарный заряд, который был обнаружен в опыте Милликена.

Приведенные данные сами по себе достаточно убедительны. Нет причины предполагать, что в мире имеется два вида элементарных зарядов; элементарный заряд, найденный при электролизе, по-видимому, точно соответствует элементарному заряду, обнаруженному в опытах Милликена. Другая проверка этого вывода будет предложена в следующем разделе. Кроме того, в конце этой части курса будет дано множество доказательств того, что атомы состоят из электронов и положительно заряженных частиц, которые в целом делают атомы нейтральными. Как уже известно, каждый электрон является носителем одного отрицательного элементарного заряда. Отсюда следует, что все построенное из атомов должно быть или нейтральным, или обладающим целым числом элементарных зарядов. Поскольку все, включая и ионы, построено таким образом, можно снова сделать вывод, что заряды ионов кратны элементарным зарядам.

Теперь нам известно, что каждый ион водорода и серебра несет один положительный элементарный заряд; каждый ион меди несет два положительных элементарных заряда и каждый ион алюминия

несет три положительных элементарных заряда. (Заряды некоторых отрицательных ионов указаны на рис. 28.11.) Можно использовать эти данные для измерения полного заряда, переносимого через электролитическую ванну. Например, если к отрицательному электроду приходят только ионы водорода, то число перенесенных зарядов равно числу прибывших ионов водорода. Следовательно, установив, выделившуюся массу водорода и разделив ее на массу одного атома, можно найти число элементарных зарядов.

Подобный метод можно использовать для измерения силы тока. Например, при пропускании электрического тока через электролитическую ванну, содержащую ионы серебра, и измерении *скорости*, с которой осаждается серебро, можно измерить силу электрического тока, выразив ее числом элементарных зарядов в секунду. Так как один элементарный заряд переносится каждым осажденным атомом серебра, электролитическая ванна становится прибором для измерения электрического тока. Действительно, электролитические ванны, в которых осаждается серебро, часто используются в качестве стандартного измерителя силы тока. Обычно, однако, удобнее применять другие виды приборов. Можно использовать любое устройство, которое воспроизводимо и в различной степени реагирует на различные силы тока, но нужно проградуировать по крайней мере один из этих новых измерительных приборов. Они градуируются путем последовательного соединения с электролитической ванной. Так как один и тот же ток протекает через оба измерительных прибора, на новый измерительный прибор можно нанести шкалу, по которой можно измерить величину силы тока, выраженную числом элементарных зарядов в секунду, измеренным по скорости осаждения серебра в электролитической ванне.

28.4. Опыты Томсона. Превращения энергии. Электрическая сила. Элементарные заряды

В разделе 28.1 рассматривалось ускорение ионов на пути d под действием известной электрической силы F. Ионы начинают двигаться из состояния покоя и достигают конечной скорости v. Для вычисления их кинетической энергии после ускорения применялось соотношение $Fd=mv^2/2$. Теперь, когда мы в состоянии измерять силу электрического тока или полный переносимый заряд, выраженный числом элементарных зарядов, можно провести опыт, который покажет, что величина Fd в точности дает кинетическую энергию $mv^2/2$, приобретаемую ионами.

Для этого опыта пользуются электронами, испускаемыми раскаленной проволокой. Они ускоряются в поле определенной электрической силы между двумя параллельными металлическими пластинами, как уже делалось при измерении массы электрона в разделе 28.1. Электроны, которые ускорялись от отрицательно заряженной пластины, вторгаются в положительно заряженную пластину и теряют свою кинетическую энергию. Эта энергия превращается в тепловую энергию, нагревающую пластину. При соответствующей силе

тока пластина может нагреваться настолько быстро, что за несколько секунд будет достигнуто заметное повышение температуры. Измеряя это повышение температуры, можно определить количество переносимой энергии. С другой стороны, измеряя силу тока, можно определить число элементарных зарядов. Таким образом можно получить кинетическую энергию, отнесенную к элементарному заряду. Результаты этих опытов подтверждают предсказание, что кинетическая энергия, отнесенная к элементарному заряду, определяется электрической силой F, действующей на элементарный заряд, умноженной на расстояние d, на котором заряженные частицы ускоряются.

Может показаться, что такое подтверждение того, что произведение Fd выражает кинетическую энергию, является излишним. Конечно, это не является неожиданностью, но из этого можно сделать два ценных вывода. Во-первых, при вычислении работы Fd, которая является мерой энергии, превращенной в кинетическую энергию движения электронов, использовалась сила F, действующая на элементарный заряд, ранее измеренная нами при рассмотрении элементарных зарядов в состоянии покоя или при медленном движении в микро-микровесах в разделе 27.7. До сих пор мы предполагали, не имея экспериментального подтверждения, что та же сила действует на быстро движущийся элементарный заряд. Только что описанные опыты показали, что электрическая сила, действующая на движущийся заряд, действительно не зависит от его скорости. Так как электроны, ускоряемые между заряженными пластинами в опыте, описанном в разделе 28.1, достигают скорости около 10^7 м/с, мы видим, что электрическая сила, действующая на элементарный заряд, должна быть одна и та же при всех скоростях от нуля до этого огромного значения.

Во-вторых, эти опыты показывают, что единичный заряд, найденный в опытах с электролитами, тот же, что и элементарный заряд в опытах Милликена. Сила тока измеряется приборами, проградуированными по электролитическим ваннам. Поэтому число заряженных частиц, превращающих свою кинетическую энергию в теплоту на положительно заряженной пластине, выражается числом единичных зарядов, полученных при электролизе. Следовательно, в этих опытах измеряется кинетическая энергия, отнесенная к единичному заряду, полученному при электролизе. С другой стороны, кинетическая энергия выражалась через силу, полученную из опыта Милликена. Следовательно, вычисленная кинетическая энергия равна кинетической энергии, отнесенной к элементарному заряду Милликена. Согласие между вычисленным и экспериментальным результатами показывает теперь, что единичный заряд, полученный при электролизе, должен быть тождественным с элементарным зарядом, найденным в опыте Милликена. Имеется только одна элементарная единица электрического заряда.

Измерения, подобные тем, которые рассматривались в этом разделе, были выполнены Дж. Дж. Томсоном в 1897 г. Определяя массу электрона, он провел тепловые измерения кинетической энергии, от-

несенной к элементарному заряду, в потоке движущихся электронов. Затем для завершения определения массы он провел другой опыт. Он исследовал движение под действием определенной силы. Хотя подробности этого опыта были совершенно иными, он был эквивалентен опыту, описанному в разделе 28.1, где определялась скорость электронов. В его опытах фактически измерялось количество движения электрона mv и затем определялась масса m и скорость v из известных значений mv и кинетической энергии $mv^2/2$. Примененный им метод мы изучим в гл. 30.

28.5. ЭДС и энергия, доставляемая батареей

В предыдущих разделах мы говорили о направлении электрического тока и об измерении его силы. Мы также установили, что энергия передается заряженным частицам и может быть отнята от них в виде тепловой энергии. Не может быть электрического тока без некоторого превращения энергии.

Несомненно, что поток энергии в цепи часто представляет собой сложное явление. Электрическое поле служит посредником, осуществляющим передачу кинетической энергии заряженным частицам во внешней цепи, а внутри батареи заряженные частицы движутся против электрической силы, создаваемой зарядами на зажимах. В оставшейся части этой главы мы более подробно остановимся на электрических полях и энергии. Хотя мы не стремимся к установлению точной картины электрических полей для большинства цепей, но мы достигнем общего понимания превращений энергии в цепях различных видов.

До сих пор в этой главе батареи использовались в качестве источника энергии, рассеиваемой в виде тепловой энергии во внешней цепи. Сколько энергии отдает батарея и от чего зависит это количество? Мы увидим, что батарея, превращающая скрытую химическую энергию в электрическую энергию, обычно передает каждому элементарному заряду одинаковую энергию.

Рассмотрим, например, энергию, передаваемую батареей каждому элементарному заряду в пучке ионов, ускоряющихся на пути от одной заряженной металлической пластины к другой. В гл. 27 было установлено, что поле электрических сил между пластинами однородно и при соединении с батареей величина силы обратно пропорциональна расстоянию между пластинами. Следовательно, произведение силы, действующей на элементарный заряд, на расстояние между пластинами получается всегда одинаковым. Как было только что установлено в разделе 28.4, это произведение Fd дает энергию, сообщенную элементарному заряду. Отсюда следует, что, как бы ни изменялось расстояние между пластинами, энергия, сообщаемая каждому элементарному заряду данной батареей, всегда одна и та же.

Измерять можно не только расстояние между пластинами, но и площадь пластин. При этом электрическая сила, действующая на один элементарный заряд между пластинами, не изменяется и, как

можно предположить, энергия, передаваемая каждому иону, проходящему между пластинами, остается такой же. При заряжении пластин батарея приводит в движение большое число заряженных частиц, но это не влияет на энергию, передаваемую элементарному заряду, движущемуся через ванну в пучке ионов.

Энергия, сообщаемая элементарному заряду, не зависит от величины силы тока. Применяя более мощный источник водорода или получая из нити накала больше электронов, можно увеличить ионный ток по сравнению с применявшимся в наших предыдущих опытах. Энергия, отнесенная к элементарному заряду, которую дает батарея, не изменяется. (Позже будет приведено много доказательств того, что энергия, отнесенная к элементарному заряду, не зависит от силы тока.)

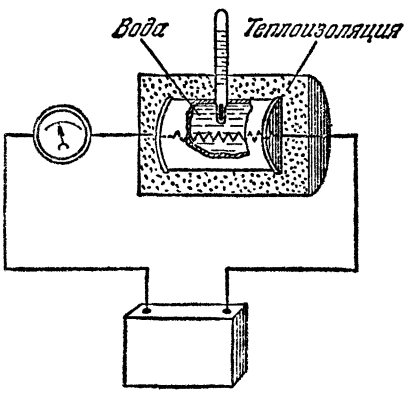


Рис. 28.12. Мы можем определить энергию, рассеиваемую в виде тепла проволочным сопротивлением, по повышению температуры воды, окружающей проволоку. Так как амперметр указывает число элементарных зарядов, проходящих за секунду, то можно вычислить энергию, передаваемую батареей элементарному заряду.

Мы пользовались ионными токами, так как это легче для понимания, но это не влияет на конечный результат. Если включить измеритель тока и проволоку высокого сопротивления последовательно между положительным и отрицательным полюсами батареи, то можно измерить число элементарных зарядов, переносимых через любую точку цепи за определенное время. В такой цепи почти вся энергия, которую движущиеся заряды получили от электрического поля, немедленно превращается в тепловую энергию в проволоке высокого сопротивления. Измеряя тепло, рассеиваемое в проволоке, можно вычислить энергию, передаваемую батареей и отнесенную к одному элементарному заряду (рис. 28.12). При этом окажется, что энергия, сообщаемая элементарному заряду, в этой цепи такая же, как в ионном пучке между параллельными металлическими пластинами, при условии, что используется одна и та же батарея.

Все эти опыты показывают, что батарея представляет собой устройство, которое сообщает элементарному заряду определенное количество энергии. Например, как было подсчитано в разделе 28.1, 90-вольтовая батарея сообщает энергию в $1{,}4 \cdot 10^{-17}$ Дж на элементарный заряд. Энергия, сообщаемая одному элементарному заряду, называется ЭДС батареи. Старое название электродвижущая сила, из начальных букв которого образовался этот сокращенный термин, вводит в заблуждение, так как мы не имеем дела с силой в обычном значении этого слова. Почти все называют теперь энергию,

отнесенную к элементарному заряду, ЭДС, вместо старого названия. Будем обозначать ЭДС буквой $\mathscr{E}$.

Предположим, что взяты три одинаковые батареи, каждая из которых дает ЭДС$=1{,}4\cdot10^{-17}$ Дж/элем. зар. Если их включить в цепь последовательно, то каждая будет давать $1{,}4\cdot10^{-17}$Дж на элементарный заряд. Полная ЭДС, т. е. полное количество энергии, сообщаемое всеми тремя батареями одному элементарному заряду, поэтому должно быть равно

$$3\cdot(1{,}4\cdot10^{-17}\text{ Дж/элем. зар.})=4{,}2\cdot10^{-17}\text{ Дж/элем. зар.}$$

Этот результат совпадает с ранее найденным значением, и, конечно, этого следовало ожидать на основании упомянутых в разделе 27.6 опытов с последовательно соединенными батареями и большими электрическими весами. Там при последовательном соединении стандартных 90-вольтовых батарей сила между двумя параллельными металлическими пластинами возрастала пропорционально числу батарей. Следовательно, энергия, сообщаемая батареями элементарному заряду, также пропорциональна их числу. Теперь мы в состоянии ответить на вопрос: Какое количество энергии сообщает батарея электрической цепи? Эта энергия представляет собой произведение числа переносимых элементарных зарядов на ЭДС батареи: $q\mathscr{E}$=(элем. зар.)·(Дж/элем. зар.)=Дж.

Если элементарные заряды не переносятся, то батарея не расходует энергию. При наличии тока I батарея доставляет энергию со скоростью $I\mathscr{E}$=(элем. зар./с)·(Дж/элем. зар.)=Дж/с.

Скорость, с которой энергия сообщается цепи, называется отдаваемой мощностью, а единица мощности 1 джоуль в секунду называется *ваттом* (Вт) по имени Джемса Уатта, изобретателя паровой машины. За промежуток времени t батарея доставляет полную энергию $I\mathscr{E}t$; иными словами, доставляемая батареей энергия равна произведению мощности на время.

28.6. Электрическое поле и потенциал

В качестве основного источника энергии нами использовались батареи. Эта энергия тратится на скопление зарядов, а поля электрических сил, образуемые скоплениями зарядов, в свою очередь передают энергию ионам, движущимся между металлическими пластинами, или электронам, движущимся по металлическим проводам. Поля электрических сил возникают всякий раз, как образуются скопления заряженных частиц, независимо от того, чем это вызывается — действием батареи, трением или другими причинами. Таким образом, нам следует рассматривать энергию элементарного заряда в поле электрических сил, не учитывая особенностей источника ЭДС. Поэтому вернемся к электрическому полю.

В разделе 27.3 рассматривалось поле электрических сил, созданное определенным распределением заряженных частиц. Поле электрических сил характеризует электрические силы, которые действовали бы при данном распределении зарядов на другое

заряженное тело («пробный заряд»). Мысленно будем помещать этот пробный заряд последовательно в каждую точку пространства и либо измерять, либо вычислять силу, действующую на него в разных точках.

Величина и направление электрических сил в любой точке зависят как от распределения зарядов, создающих силы, так и от величины заряда, на который эти силы действуют. Определим теперь напряженность электрического поля $\boldsymbol{E}$ как равнодействующую электрических сил, действующих на один положительный элементарный заряд. Иными словами, в любой точке пространства сила, приложенная к одному элементарному заряду, выражается произведением этого заряда на напряженность электрического поля $\boldsymbol{E}$, создаваемую всеми прочими зарядами. Отсюда следует, что электрическая сила $\boldsymbol{F}$, действующая на тело, несущее заряд q, где q может составлять любое число элементарных зарядов, равна произведению q на напряженность поля $\boldsymbol{E}$:

$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E}.$$

Поскольку произведение q на напряженность $\boldsymbol{E}$ поля дает силу $\boldsymbol{F}$, приложенную к заряду q, единицей напряженности электрического поля является ньютон на элементарный заряд (Н/элем. зар.).

Векторное уравнение $\boldsymbol{F}=q\boldsymbol{E}$ означает, что напряженность электрического поля имеет то же направление, что и сила, действующая на положительный заряд, или направление, противоположное силе, действующей на отрицательный заряд. Электрическое поле вектора напряженности можно изображать теми же линиями, которыми мы пользовались в гл. 27 для изображения поля электрических сил, обуславливаемых заряженными телами, так как эти электрические силовые линии тоже показывают направление силы, приложенной к положительному заряду. Например, напряженность электрического поля, создаваемого положительным точечным зарядом, направлена от него, а напряженность от отрицательного точечного заряда направлена к нему.

Пусть нам известно, что микро-микровесы действуют с силой $3\cdot10^{-14}$ Н на каждый элементарный заряд, находящийся между пластинами. Это можно сформулировать иначе: напряженность электрического поля между пластинами микро-микровесов составляет $3\cdot10^{-14}$ Н/элем. зар. (и направлена от положительно заряженной пластины к отрицательной). Если между пластинами этих микро-микровесов помещен пластмассовый шарик, несущий два элементарных заряда, действующая на него электрическая сила составляет $6\cdot10^{-14}$ Н, но напряженность электрического поля микро-микровесов по-прежнему равна $3\cdot10^{-14}$ Н/элем. зар. Напряженность зависит только от самих микро-микровесов, а не от заряда пластмассового шарика, на который действует поле.

Напряженность электрического поля микро-микровесов создается суммарным действием всех зарядов, распределенных по пластинам весов. Рассмотрим гораздо более простой пример: напряжен-

ность электрического поля вокруг тела с зарядом q_1, помещенного в заданную точку пространства. Согласно закону Кулона другое тело с зарядом q_2, расположенное на расстоянии r от первого, должно испытывать силу, равную по абсолютной величине

$$F=kq_1q_2/r^2=Eq_2,$$

откуда напряженность электрического поля, создаваемого первым телом на расстоянии r, равна $E=kq_1/r^2$. Вектор $\boldsymbol{E}$ направлен от первого тела, если его заряд положителен, и к нему, если он отрицателен. Важно отметить, что абсолютная величина вектора $\boldsymbol{E}$ изменяется в этом случае от точки к точке, тогда как между заряженными параллельными пластинами микро-микровесов она одинакова во всех точках (поскольку мы уже видели, что сила, действующая там на заданный заряд, везде одинакова). Вообще же говоря, значение напряженности электрического поля, создаваемого заряженным телом в той или иной точке, зависит от положения этой точки относительно этого тела.

Мы видим, что напряженность электрического поля позволяет определять, чему будет равна сила, приложенная к любому заряду в любой точке. Если поле обусловлено сгустком зарядов, сосредоточенных в одной точке, то выражение напряженности является просто другой формой закона Кулона. Даже если электрическое поле создается совокупностью зарядов, распределенных по разных точкам, векторная сумма кулоновских сил, с которыми все заряды этой совокупности действуют на заряд q, равна $q\boldsymbol{E}$.

Хотя при рассмотрении напряженности электрического поля мы не получаем каких-либо новых сведений, это понятие очень удобно. Иногда напряженность поля можно определять без вычисления сил, основанного на знании величины и расположения зарядов. Дальше мы установим, что это очень важно. Например, в гл. 31 будут рассмотрены электрические поля, возникающие иначе.

Мы здесь ввели электрическое поле для того, чтобы рассмотреть энергию элементарного заряда при его движении от одной точки пространства к другой. Мы уже кое-что знаем об энергии в случае движения элементарного заряда от одной точки к другой вблизи заряда. Эта энергия нам знакома, поскольку поле кулоновских сил имеет точно такую же форму линий, как и поле сил тяготения, изучавшегося в части III. В разделе 24.5 установлено, что две массы, притягивающиеся друг к другу гравитационной силой $F_g=Gm_1m_2/r^2$, имеют соответствующую потенциальную энергию тяготения

$$U_g=-Gm_1m_2/r.$$

Нулевая потенциальная энергия приписывается бесконечно удаленной точке, а знак минус указывает, что потенциальная энергия тогда отрицательна при любых значениях r. Потенциальная энергия отрицательна потому, что массы *притягиваются* друг к другу. Теперь нам известно, что два заряженных тела действуют друг на друга с электрической силой $F_e=kq_1q_2/r^2$, являющейся силой отталки-

вания при зарядах одного знака, и должны также обладать электрической потенциальной энергией

$$U_e = kq_1q_2/r.$$

В этом выражении нет знака минус, поскольку заряды одного знака отталкиваются, в отличие от взаимного притяжения тяготеющих масс. Потенциальная энергия электрического взаимодействия двух одинаковых частиц, принятая за нуль при бесконечно большом расстоянии, будет иметь положительное значение для любого конечного значения r. Потенциальная энергия двух разноименных зарядов при бесконечном удалении их друг от друга тоже принимается за нуль, но при конечных значениях r она отрицательна, так как заряды взаимно притягиваются.

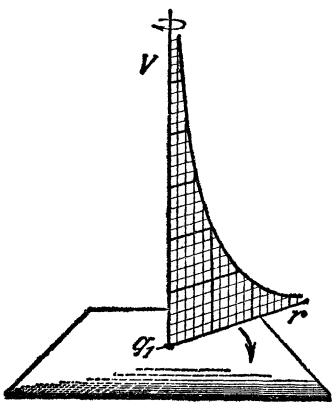


Рис. 28.13. График зависимости электрического потенциала V от расстояния r до заряда q_1.

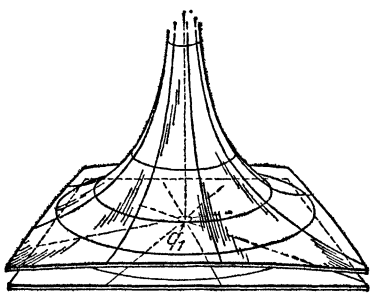


Рис. 28.14. Высота потенциального «холма» над каждой точкой плоскости выражает электрический потенциал этой точки.

Далее, поскольку при расстоянии r между зарядами q_1 и q_2 потенциальная энергия равна kq_1q_2/r, потенциальная энергия на элементарный заряд в поле заряда q_1 равна

$$V = kq_1/r.$$

Эту потенциальную энергию, приходящуюся на элементарный заряд, будем называть *электрическим потенциалом* V на расстоянии r или разностью потенциалов между r и бесконечностью (падением потенциала между r и бесконечностью). Если заряд q_1 удерживается на месте, а q_2 перемещается от r до бесконечности под действием только кулоновской силы, то приращение его кинетической энергии будет равно Vq_2. Поскольку V есть потенциальная энергия на элементарный заряд, эта величина измеряется в джоулях на элементарный заряд (Дж/элем. зар.) Подобно напряженности электрического поля, электрический потенциал данной точки зависит только от зарядов, создающих поле, и от положения точки. Однако электрический потенциал есть скаляр, а не вектор. Он положителен, когда q_1 положительно, и отрицателен при отрицательном q_1.

Подобно тому, как мы можем выразить напряженность электрического поля в любой точке пространства, мы можем также выразить электрический потенциал V для каждой точки пространства. Для того чтобы показать это поле вокруг положительного заряда q_1, рассмотрим график зависимости V от r. Чтобы представить поле электрического потенциала во всех точках плоскости, проходящей через заряд q_1, будем вращать график вокруг вертикальной оси, проходящей через точку, в которой $r=0$ (рис. 28.13). Другими словами, мы поворачиваем график вокруг точки, в которой расположен заряд q_1. При этом вращении вычерчивается потенциальный «холм», высота которого над любой точкой плоскости дает потенциал в этой точке. Потенциальный «холм» для плоскости, проходящей через заряд, сконцентрированный в какой-нибудь точке, показан на рис. 28.14. Такой потенциальный «холм» будет очень полезен в гл. 32 при обсуждении движения одной заряженной частицы в кулоновском поле другой частицы.

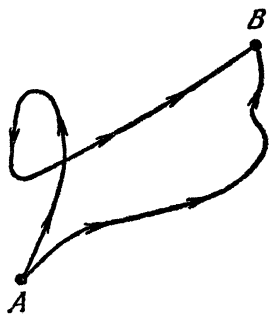


Рис. 28.15. При движении заряда из точки A в точку B в электрическом поле, создаваемом закрепленными зарядами, изменение потенциальной энергии не зависит от выбора пути перехода.

Понятие электрического потенциала можно распространить на случаи, когда потенциал обусловлен более чем одним точечным зарядом. В любой точке пространства потенциал V системы нескольких точечных зарядов в точности равен алгебраической сумме потенциалов этой точки, обусловленных каждым из точечных зарядов. Потенциальный «холм» можно построить и для такой системы, но его поверхность оказалась бы гораздо сложнее изображенной на рис. 28.14. Если бы заряд q был перенесен из бесконечности в любую точку P, а остальные заряды были бы удержаны на местах, то изменение потенциальной энергии всей системы, включая q, составило бы Vq, где V — потенциал точки P.

Иногда представляет интерес знать, как изменяется потенциальная энергия системы при движении заряда из одной точки в другую внутри системы. Мы знаем, что сила кулоновского взаимодействия между каждыми двумя заряженными телами зависит не от положения каждого тела, а только от расстояния между ними. В гл. 24 было показано, что для сил этого вида изменение потенциальной энергии системы при перемещении одного из тел из точки A в точку B зависит только от положения A и B, а не от выбора пути (рис. 28.15). Допустим, что закреплены все заряды системы, кроме одного, равного q, и что этот заряд движется из A в B. Тогда приращение электрической потенциальной энергии, равное потенциальной энергии в момент, когда q находится в B минус потенциальная энергия в момент, когда q находилось в A, ровно в q раз больше разности электрических потенциалов точек B и A, обусловленных всеми остальными зарядами. Таким образом, $\Delta U=q(V_B-V_A)$. Величина

(V_B—V_A) называется разностью электрических потенциалов точек B и A в поле закрепленных зарядов.

Пусть, например, в опыте Милликена положительный электрический заряд приобретает кинетическую энергию $5 \cdot 10^{-17}$ Дж в процессе ускорения при движении от положительной к отрицательной пластине. Это говорит о том, что разность электрических потенциалов между пластинами равна $5 \cdot 10^{-17}$ Дж/элем. зар. Поскольку заряд имеет выигрыш в кинетической энергии, а система имеет проигрыш в потенциальной энергии, потенциал отрицательной пластины ниже потенциала положительной пластины. Если бы, наоборот, заряд перемещался от отрицательной к положительной пластине, то он двигался бы в область большего потенциала. Положительный заряд, испытывающий действие только кулоновских сил, стал бы при этом замедляться и терять кинетическую энергию, тогда как потенциальная энергия системы возрастала бы.

28.7. Батареи. Вольты и амперы

В разделе 28.5 были рассмотрены некоторые доказательства того, что батарея передает элементарному заряду определенное количество энергии, но не было выяснено, почему и как батарея поддерживает постоянную ЭДС. Хотя здесь не делается попытки дать подробное объяснение, но мы попробуем изложить в общих чертах идею того, как это происходит.

Батареи получаются при соединении в ряд некоторого числа гальванических элементов. В простом гальваническом элементе заряженные частицы гонятся к полюсам против сил электрического отталкивания, существующих между заряженными частицами. Поэтому их электрическая потенциальная энергия увеличивается. Эта увеличенная потенциальная энергия зарядов у полюсов поддерживается химической энергией, освобождающейся в процессе химической реакции между компонентами элемента. В каждом отдельном акте химического взаимодействия между частицами химическая потенциальная энергия уменьшается на определенную величину. А поскольку каждый отдельный акт химического взаимодействия вовлекает в движение через сосуд определенное число атомов или ионов, это количество энергии используется для проталкивания определенного числа элементарных зарядов к электрическим холмам у полюсов. Поэтому гальванический элемент сообщает элементарному заряду определенное количество энергии. Энергия, сообщаемая элементарному заряду батареей, состоящей из ряда последовательно соединенных элементов, прямо пропорциональна числу элементов в батарее.

До тех пор, пока химический состав и положение составных частей элемента остаются в основном неизменными, химическая реакция протекает без изменений. Таким образом сохраняется постоянная ЭДС. Однако если перенесено слишком большое количество зарядов, то состав гальванического элемента претерпевает изменения.

Когда элемент перестает обеспечивать протекание тех же химических реакций с теми же ионами, проходящими те же расстояния, ЭДС уменьшается, и мы говорим, что батарея садится. В некоторых электрических элементах, заставляя ток протекать в противоположном направлении, можно изменять направление химической реакции и таким образом «перезаряжать» батарею. Здесь перезаряжать значит восстанавливать химическую энергию. Электрический заряд батареи не изменяется.

Реакции, которые идут в различного вида электролитических элементах, дают примерно одно и то же число джоулей на каждый отдельный акт химического взаимодействия между частицами (т. е. одинаковое число джоулей на элементарный заряд), во многих случаях около $1 \cdot 10^{-19}$ или $2 \cdot 10^{-19}$ Дж на элементарный заряд. Поэтому практически удобно принимать за единицу ЭДС примерно такую же величину. Обычно применяемая на практике величина называется *вольтом* (В). Мы определяем вольт как $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *джоуля на элементарный заряд* (Дж/элем. зар.). Например, батарея карманного фонарика дает 1,5 В, или $2{,}4 \cdot 10^{-19}$ Дж/элем. зар., и, как мы уже знаем, 90-вольтовая батарея дает $90 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} = 4{,}34 \cdot 10^{-17}$ Дж/элем. зар.*).

Мы определили вольт как некоторое число джоулей на элементарный заряд. Поэтому, если мы хотим измерить число вольт, которым обладает батарея, необходимо провести опыт, в котором эта батарея использовалась бы для сообщения энергии определенному числу элементарных зарядов. Однако это необходимо проделать только один раз, так как можно сохранять эту прокалиброванную батарею в качестве эталона, так же как сохраняется точный метровый отрезок для измерения расстояний.

Использование вольта в качестве единицы ЭДС окажется удобным не только в практической работе с электрохимическими элементами или батареями, но также при изучении строения атомов. Химические реакции, которые позволяют получить несколько вольт (т. е. в несколько раз больше, чем $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж/элем. зар.), являются перестройками атомов и молекул. Поэтому энергия, необходимая для вырывания электрона или для его переноса от одного атома к другому, приблизительно равна вольту, умноженному на элементарный заряд. По этой причине физики часто выражают энергию в электрон-вольтах (эВ). Электрон-вольт равен $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж и пригоден для измерения энергий химических реакций между отдельными частицами или энергий, требуемых для ионизации отдельных атомов. Ниже мы установим энергию, необходимую для ионизации атома: это — величина порядка электрон-вольта.

Мы выбрали в качестве основной единицы ЭДС джоуль на элементарный заряд; тогда, если заряд измеряется числом элементарных

---

*) Мы установили, что вольт равен $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж/элем. зар. Часто сначала определяется практическая единица силы тока, и уже через нее определяется вольт. Как будет видно, оба эти определения согласуются.

зарядов, $q\mathcal{E}$ дает энергию в джоулях. Нам бы хотелось продолжать измерять энергию в джоулях, даже когда мы заменим единицу ЭДС практической единицей — вольтом или $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж/элем. зар. Для этого введем новую единицу заряда — *кулон* (Кл). Выберем ее так, чтобы произведение одного кулона на ЭДС в один вольт дало один джоуль:

$$1 \text{ Кл} \cdot 1 \text{В} = 1 \text{ Дж}.$$

Так как 1 В равен $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж/элем. зар., то

$$1 \text{ Кл} \cdot (1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/элем. зар.}) = 1 \text{ Дж}.$$

Следовательно,

$$1 \text{ Кл} = 1 \text{ Дж}/(1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/элем. зар.}) = 6{,}25 \cdot 10^{18} \text{ элем. зар.}$$

Единица силы тока при таком выборе единиц заряда называется *ампером* (А). Ампер — это поток 1 кулона зарядов в секунду. Поэтому 1 ампер $= 6{,}25 \cdot 10^{18}$ элементарных зарядов в секунду ($1\text{А} = 6{,}25 \cdot 10^{18}$ элем. зар./с).

Если мы имеем дело с электрической лампочкой или электроутюгом, то ампер является более подходящей единицей, чем основная единица — элементарный заряд в секунду (1А = 1Кл/с). Сила тока, проходящего через обычную электрическую лампочку, равна примерно 1 амперу. Будет непривычно услышать, что сила тока в электролампе равна $6{,}25 \cdot 10^{18}$ элементарных зарядов в секунду. Поэтому обычное название измерителя силы тока — амперметр.

Вольт и ампер совместимы в такой же мере, как джоуль на элементарный заряд с силой тока, измеряемой в элементарных зарядах в секунду. Другими словами, когда сила тока измеряется числом элементарных зарядов в секунду, а ЭДС — в джоулях на элементарный заряд, мощность равна $I\mathcal{E}$ ваттам (Вт.). Точно таким же образом, при измерении тока в амперах (кулон в секунду) и ЭДС в вольтах (джоуль на кулон) мощность также выражается в ваттах. Практические единицы совместимы друг с другом таким же образом, как и естественные, так как мы приняли за кулон такую величину, при протекании которой при ЭДС в 1В передается 1 Дж энергии.

Электродвигатели, электрические лампочки и другие электрические приборы конструируются таким образом, чтобы они поглощали энергию с определенной скоростью. Прибору приписывается определенная мощность, которая представляет собой энергию, расходуемую в единицу времени, и напряжение, при котором должна потребляться эта мощность. Зная мощность и напряжение, можно определить силу протекающего тока. Например, через 60-ваттную лампочку при напряжении 110 В протекает ток, равный $60/110 = 0{,}545$А.

Хотя вольт является удобной единицей для ЭДС, а ампер — для силы тока, кулон оказывается чрезмерно большой единицей для заряда. Если два заряда, каждый из которых равен кулону, находятся на расстоянии метра друг от друга, то сила их взаимодействия составляет примерно десять миллиардов ньютонов. Поэтому если

речь идет о силах между зарядами, то часто значительно удобнее применять в качестве единицы заряда микрокулон (10^{-6} кулона). Игрушечный воздушный шар, заряженный трением о шерстяную материю, может обладать зарядом в несколько десятков микрокулонов.

Вольты и атомы. Можно видеть, что и вольт ($1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж/элем. зар.) и электрон-вольт ($1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж) являются удобными единицами для рассмотрения атомных явлений, при вычислении электрической потенциальной энергии внешнего электрона в атоме. Так как атомы нейтральны, то на такой электрон должна действовать электрическая сила от одного элементарного заряда на расстоянии порядка атомного радиуса. Для водорода эта сила создается протоном. При этом мы знаем, что атомные размеры имеют порядок ангстрема, т. е. 10^{-10} м. Тогда, поскольку заряды имеют противоположные знаки и каждый является элементарным зарядом, электрическая потенциальная энергия равна

$$U_e = k\frac{q_1 q_2}{r} = (2{,}3 \cdot 10^{-28}\ \text{Н}\cdot\text{м}^2/\text{элем. зар.})\ \frac{(1\ \text{элем. зар.})\,(-1\ \text{элем. зар.})}{10^{-10}\ \text{м}} =$$

$$= -2{,}3 \cdot 10^{-18}\ \text{Дж}.$$

Эта величина может не выражать всей энергии электрона. Например, в планетарной модели, как нам известно из гл. 24, кинетическая энергия электрона (положительная) равна половине приведенной величины. Но как бы то ни было, эта электрическая потенциальная энергия позволяет оценить порядок величины энергии, которую мы должны затратить, чтобы вырвать электрон из атома. Поэтому энергия связи или ионизации атома имеет порядок 10^{-18} Дж. Так как электрон-вольт равен $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж, эта оценка дает около 6 электрон-вольт.

Общее количество энергии, необходимое для ионизации атома, зависит от сорта атома и меняется от 2 до 20 электрон-вольт. Это показывает, что электрические силы, создающие атом как целое, определяют энергию, необходимую для перегруппировки или разъединения составляющих его электрических частиц.

28.8. Состояние вопроса, рассмотренного в данной главе

До сих пор в этой главе мы рассматривали движущиеся заряды и энергию, передаваемую под влиянием кулоновских сил, создаваемых зарядами, находящимися в покое. В разделе 28.4 мы установили, что до тех пор, пока заряды, создающие силу, находятся в покое, электрическая сила, действующая на движущийся заряд, не отличается от силы, действующей на неподвижный заряд. Поскольку кулоновские силы зависят только от расстояния между зарядами, существует совершенно определенная электрическая потенциальная энергия.

За исключением сил, возникающих в батареях или генераторах, в этой главе мы рассматривали те же самые электрические силы, что и в предыдущей главе. Теперь при рассмотрении сил остаются неясными два вопроса. В первую очередь: что мы можем сказать о силах, действующих на заряды, которые движутся через батареи и генераторы,— силах, которые, по-видимому, движут заряды против кулоновских сил, оказываемых скоплениями неподвижных зарядов? Во-вторых, что происходит, если заряд, оказывающий действие на другой заряд, сам находится в движении?

В гл. 30 мы увидим, что закон Кулона не определяет силу, действующую между двумя зарядами, когда оба они находятся в дви-

жении. Затем мы найдем, что кроме кулоновской силы появляется новая сила — сила, зависящая от такого движения. Эта добавочная сила имеет большое практическое значение, так как она движет бóльшую часть наших электрических машин. Кроме того, как мы увидим в гл. 31, эта же добавочная сила порождает ЭДС электрических генераторов. Что касается электрических и электродвижущих сил ЭДС в батареях, то, как здесь указывалось, их объяснение может быть дано только с точки зрения превращений энергии, имеющих место при химических реакциях. Другими словами, понять происхождение энергии, доставляемой батареями, можно только, заглянув внутрь атома. Мы будем в состоянии приступить к рассмотрению внутренней энергии атомов в последней главе курса.

В следующей главе мы более подробно рассмотрим передачу энергии и электрические токи. Особое внимание будет обращено на применение этих представлений к электрическим цепям.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

1*. Пусть в приборе (рис. 28.1) используются двухзарядные ионы и 90-вольтовая батарея. Какова будет энергия каждого иона при ударе об отрицательно заряженную пластину? (Раздел 28.1.)

2. Две большие параллельные металлические пластины, расположенные на расстоянии 5,2 см друг от друга в вакуумной трубке, присоединены к зажимам батареи на 90 В. Двукратно ионизованный ион кислорода выходит из состояния покоя на поверхности одной пластины и, двигаясь к другой пластине, ускоряется.

а) С какой кинетической энергией $mv^2/2$ ион кислорода ударится о другую пластину?

б) Если ион начнет двигаться с полпути между пластинами, то с какой кинетической энергией ударится он об отрицательно заряженную пластину?

3*. Если бы через прибор (рис.28.4) пропускались однозарядные ионы гелия, каково было бы время пролета? (Раздел 28.1.)

4. В опыте по определению времени пролета, подобном описанному на стр. 65, вы отрегулировали контур развертки осциллографа таким образом, что пучок пересекал трубку за 0,5 секунды. Общая длина пути, пройденного за это время, составляла 10 см. Контактные точки на пути катящегося шарика расположены через 1,2 м. Какова скорость шарика, если пики на экране осциллографа расположены на расстоянии 8 см?

5. В приборе, использованном в разделе 28.4 для измерения массы положительно заряженного иона водорода (протона), в качестве источника ионов примените тяжелый водород и наблюдайте пики, которые соответствуют ионам, приходящим со временем пролета, в 1,4 раза превышающим время пролета обычных положительно заряженных ионов водорода.

а) Какова их масса при однократной ионизации?

б) При двукратной ионизации?

в) Могут ли они быть однозарядными ионами гелия? Двухзарядными ионами гелия?

(Учтите, что масса атома гелия равна 4 а.е.м., а масса атома водорода — 1 а.е.м.)

6*. Если в секунду образуется $2 \cdot 10^{16}$ пар однозарядных ионов, которые достигают пластины (рис. 28.10) без рекомбинации, какой ток течет через батареи, соединенные с пластинами? (Раздел 28.2.)

7*. Дефектный ламповый диод содержит значительные остатки газа. При нагреве нити накала и включении батареи между нитью и анодом в лампе течет ток из электронов и положительных ионов. Рассмотрим некоторую плоскость

вблизи нити. За каждую секунду нить испускает $3 \cdot 10^{16}$ электронов, которые пересекают данную плоскость, двигаясь к аноду. Через ту же поверхность проходят также $0{,}6 \cdot 10^{16}$ однозарядных положительных ионов в обратном направлении. Каков ток, протекающий через данную плоскость? (Раздел 28.2.)

8. Предположим, что вы ионизуете какой-нибудь газ между параллельными металлическими пластинами, создавая одинаковое число отрицательно и положительно заряженных ионов в каждом небольшом объеме между пластинами. Имеются батареи и измеритель силы тока, соединенные последовательно с пластинами. Через цепь протекает постоянный ток. Положительно заряженная пластина находится слева, отрицательно заряженная — справа.

а) Каково, по вашему мнению, направление тока между пластинами?

б) Сколько положительных элементарных зарядов проносится за секунду ионами, приходящими к отрицательно заряженной пластине, если измеритель силы тока показывает, что за секунду проходит 10^{16} элементарных зарядов?

в) Сколько отрицательных элементарных зарядов приходит за секунду к отрицательно заряженной пластине?

г) Сколько положительных ионов проходит за секунду вправо через плоскость, расположенную на полпути между пластинами?

9. Имеется металлическая проволока, батареи и градуированный амперметр. Как вы можете проградуировать второй амперметр?

10. Имеется шесть одинаковых амперметров, один из которых имеет единственную калиброванную точку, т. е. отметку, правильно указывающую прохождение тока в 1 А (т. е. тока силой в $6{,}25 \cdot 10^{18}$ элементарных зарядов в секунду). У вас

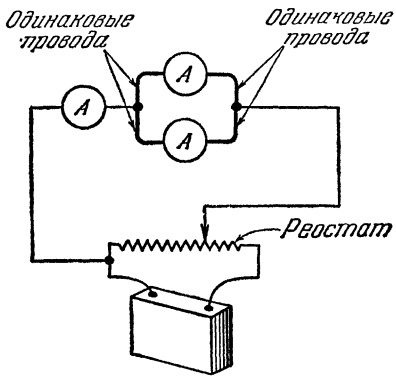


Рис. 28.16. К задаче 10.

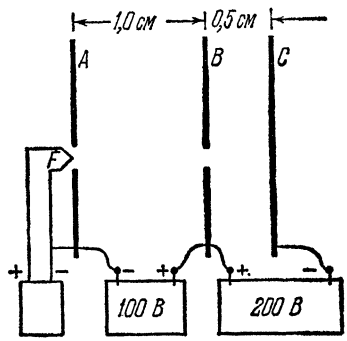


Рис. 28.17. К задаче 15.

также имеется несколько батарей и большое число одинаковых металлических проволок. В связи с задачей градуировки амперметра ответьте на следующие вопросы:

а) Предположим, что вы прокалибровали некоторое количество амперметров только на отметку в 1 А. Затем вы соединили три амперметра, как показано на рис. 28.16. Объясните, как вы можете на одном из амперметров установить точку, соответствующую 2 А.

б) Сделайте эскизы, показывающие способ соединения амперметров для установления на одной шкале точек, соответствующих 3 А и 4 А.

в) Как вы будете соединять амперметры, чтобы прокалибровать один из них на $^1/_2$ А и $^1/_3$ А? (Сделайте эскизы.)

11*. Если в приборе (рис. 28.11) отлагается $3 \cdot 10^{22}$ атомов алюминия, сколько в нем отложится атомов меди? (Раздел 28.3.)

12. Требуется проградуировать шкалу амперметра. Он включен последовательно с батареей и электролитической ванной, содержащей раствор азотнокислого

серебра ($Ag^+NO_3^-$). В течение получаса пропускается постоянный ток, отклоняющий стрелку к верхнему концу шкалы. В конце этого промежутка времени посредством взвешивания находят, что на отрицательном электроде отложилось 1,92 г серебра.

а) Сколько элементарных зарядов в секунду проходит через цепь? (Моль серебра весит 108 г.)

б) Что еще надо сделать, чтобы закончить градуировку прибора?

13*. Двухзарядный ион ускоряется из состояния покоя силой $3{,}1 \cdot 10^{-15}$ Н на пути в 9,3 мм. Какую кинетическую энергию приобретет ион? (Раздел 28.4.)

14*. Другие измерения, выполненные для иона предыдущей задачи после его ускорения, позволили определить его количество движения, которое оказалось равным $1{,}24 \cdot 10^{-21}$ кг·м/с. Какова масса этого иона? (Раздел 28.4.)

15. Электроны, испускаемые нитью F (рис. 28.17) ускоряются по направлению к B.

а) Чему равна энергия электрона в момент удара о пластину B?

б) Найти напряженность электрического поля между A и B, а также между B и C?

в) Некоторые из электронов пролетают через отверстие в B. Куда они направляются?

16. С помощью тех же приборов, что и в задаче 2, определите, сколько двухзарядных ионов кислорода перейдет от положительно заряженной пластины к отрицательно заряженной, прежде чем эта пластина нагреется 1 джоулем рассеиваемой кинетической энергии ионов.

17. Предположим, что двухзарядные ионы кислорода в предыдущей задаче были получены отделением электронов от атомов кислорода, расположенных на полпути между пластинами. Затем ионы кислорода ускорялись в одном направлении, а электроны — в противоположном от точки, находящейся посередине между пластинами. Какое количество энергии будет рассеиваться электронами, нагревающими положительно заряженную пластину, за то время, за которое на отрицательно заряженной пластине рассеивается 1 Дж энергии?

18. Обдумайте имеющиеся у вас доказательства, что все элементарные заряды одинаковы. Приготовьтесь к обсуждению этого вопроса в классе.

19*. Три 90-вольтовые батареи соединены последовательно с парой параллельных пластин, расположенных на расстоянии 1 мм друг от друга. Чему равна сила, действующая на элементарный заряд между пластинами? (Раздел 28.5.)

20*. Батарея с ЭДС в $2{,}9 \cdot 10^{-17}$ Дж/элем.зар. дает ток в $6 \cdot 10^{16}$ элем.зар./с. Какова мощность, расходуемая батареей? (Раздел 28.5.)

21*. Единичный элементарный заряд находится на расстоянии r от неподвижного заряда q. Если рассматриваемый элементарный заряд имеет возможность свободно двигаться под действием кулоновского отталкивания, какова будет его кинетическая энергия после очень большого удаления? (Раздел 28.6.)

22*. Небольшому телу сообщен избыток в $1 \cdot 10^{10}$ отрицательных элементарных зарядов. Чему равны напряженность электрического поля и электрический потенциал на расстоянии 0,5 м от этого тела? (Раздел 28.6.)

23. а) Найти электрическую и гравитационную силы, действующие на электрон и протон, которые находятся между двумя большими параллельными металлическими пластинами, расположенными на расстоянии 20 см друг от друга. Между пластинами поддерживается разность потенциалов в 20 000 В. Пластины расположены горизонтально; считайте верхнюю пластину заряженной положительно.

б) Поднимите частицы на 1 см. Каковы теперь силы?

в) Как изменяются при таком движении потенциальная энергия тяготения и электрическая потенциальная энергия?

24. Ядро атома урана U^{238} иногда делится всего на два осколка в результате кулоновского отталкивания между входящими в состав ядра протонами. Представим себе, что расщепление только что произошло и что осколки все еще соприкасаются (при расстоянии между их центрами в 10^{-14} м) и находятся в покое. Требуется найти их полную кинетическую энергию после расхождения на очень большое расстояние, если один содержит $Z_1=42$, а другой $Z_2=50$ элементарных зарядов. Ответ нужно выразить в джоулях и в мегаэлектрон-вольтах (МэВ).

25. а) Два протона, находившиеся в состоянии покоя на расстоянии 10^{-10} м друг от друга, получают возможность двигаться. Какова будет их кинетическая энергия, когда они разойдутся на большое расстояние?

б) Предположим, что один из этих протонов неподвижен. Какова будет кинетическая энергия другого при большом расстоянии?

26. Две вертикальные металлические пластины установлены параллельно друг другу (рис. 28.18). Обе смонтированы на изолирующих площадках, но пластина A прикреплена болтом к столу, а пластина B помещена на ползуне из твердой углекислоты, так что может свободно перемещаться. Они соединены непроводящей пружиной, которая может растягиваться или сжиматься.

а) Пластина B удерживается в таком положении, что пружина не напряжена, и при этом пластина заряжается присоединением к батарее. Затем батарея отключается и пластина B отпускается. Опишите последующее движение в качественном виде, но подробно.

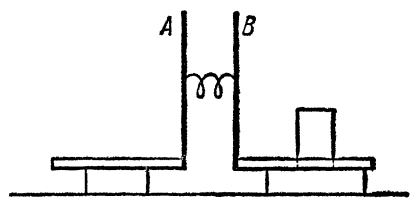


Рис. 28.18. К задаче 26.

б) Можно ли представить себе чисто механическую систему, которая будет вести себя подобным образом?

27. Два тождественных заряда q закреплены в некоторых точках оси Y на равном расстоянии a выше и ниже начала координат.

а) Найдите выражение для потенциальной энергии элементарного заряда, находящегося на оси X на расстоянии x от начала координат, для его взаимодействия с одним из закрепленных зарядов q и для его полного взаимодействия с обоими закрепленными зарядами. (При нахождении потенциальной энергии примите, что ее значение равно нулю при бесконечно большом расстоянии между зарядами. Выразите свой ответ через постоянную k из закона Кулона, величины зарядов q и расстояния a и x.)

б) Какова была бы энергия взаимодействия элементарного заряда с закрепленными зарядами q, если бы они были равными и разноименными?

28*. Батарея, питающая электронагревательный прибор, доставляет $3{,}12 \cdot 10^{19}$ элементарных зарядов в секунду и затрачивает мощность в 60 Дж/с. Какова ЭДС батареи в Дж/элем.зар. и в вольтах? (Раздел 28.7.)

29*. Чему равен ток в амперах, если в цепи проходит $3{,}12 \cdot 10^{19}$ элементарных зарядов в секунду? (Раздел 28.7.)

30*. Найдено, что энергия связи электрона с протоном равна $2{,}3 \cdot 10^{-18}$ Дж. Сколько электрон-вольт (эВ) это составляет? (Раздел 28.7.)

ГЛАВА

29 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

29.1. Проводники, батареи и разность потенциалов

В этом разделе мы рассмотрим некоторые применения понятия электрического поля и, в особенности, понятия разности потенциалов. В частности, рассмотрим поля и потенциалы электрических проводников как в тех случаях, когда они изолированы, так и в тех случаях, когда они присоединены к батареям.

При заряжении проводника электрические заряды движутся; но, как мы выяснили в разделе 27.3, после того, как заряды перераспределились (под действием электрических сил, создаваемых находящимися по соседству заряженными телами), все линии электрического поля встречают поверхность проводника под прямым углом. В противном случае заряды двигались бы вдоль поверхности до тех пор, пока не обратится в нуль составляющая электрического поля в этом направлении. Таким образом, электрическое поле внутри проводника отсутствует, так как если бы оно существовало, то под его действием заряды перемещались бы до тех пор, пока поле внутри не исчезнет. Что же тогда представляет собой разность потенциалов как между двумя точками на поверхности, так и внутри заряженного проводника? При отсутствии электрического поля на поверхности или внутри проводника сила, действующая на элементарный заряд, равна нулю на всем протяжении любой линии между любыми двумя точками проводника. Следовательно, элементарный заряд может перемещаться без затраты энергии. Проводник имеет на всем своем протяжении один и тот же электрический потенциал; разность потенциалов между любыми двумя точками проводника равна нулю. Тело, у которого потенциал одинаков в любой точке, или поверхность, находящаяся при одном и том же потенциале, называются *эквипотенциальными*. На языке разности потенциалов мы можем сказать, что любой проводник, в котором отсутствует движение зарядов, является эквипотенциальным телом.

Мы рассмотрели, что происходит, когда батарея движет заряды по замкнутой электрической цепи. Теперь рассмотрим, что происходит, когда цепь разомкнута. Предположим, например, что мы присоединяем по проводнику к каждому зажиму батареи, как показано на рис. 29.1. Тогда под действием батареи отрицательные заряды будут скапливаться на проводнике, присоединенном

к отрицательному зажиму, а положительные заряды – на проводнике, присоединенном к положительному зажиму. Заряды будут двигаться, пока энергия, необходимая для переноса одного положительного элементарного заряда от отрицательно заряженного проводника к положительно заряженному проводнику, будет меньше ЭДС батареи. Однако по мере того, как концентрация зарядов увеличивается, любой положительный заряд, движущийся между проводниками, притягивается к отрицательно заряженному проводнику и отталкивается от положительно заряженного проводника со все большей и большей силой. Следовательно, пока батарея заряжает проводники, энергия, необходимая для движения элементарного положительного заряда, увеличивается. Если бы процесс зарядки продолжался неограниченно долго, то энергия, необходимая для перемещения одного элементарного заряда от одного проводника к другому, в конце концов превысила бы энергию, которую способна сообщить элементарному заряду батарея. Поэтому заряды перестают перемещаться и их распределение перестает изменяться как только будет перенесено такое количество электричества, что энергия, необходимая для переноса элементарного заряда, станет равной ЭДС батареи, умноженной на величину элементарного заряда.

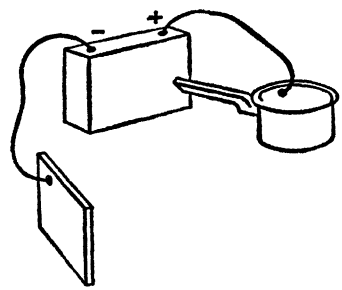


Рис. 29.1. Батарея, соединенная с двумя проводниками.

Энергию, движущую положительный элементарный заряд от отрицательно заряженного проводника к положительно заряженному, мы и называем электрической разностью потенциалов (или падением потенциала) между положительно заряженным и отрицательно заряженным проводниками. Когда заряжение проводников закончено, разность потенциалов между ними остается постоянной вне зависимости от того, какие точки мы выбрали на проводниках, так как мы уже знаем, что в этом случае каждый проводник является после окончания зарядки эквипотенциальным телом. Таким образом, если проводники присоединены к батарее, они всегда заряжены до одной и той же разности потенциалов, равной ЭДС батареи, независимо от размеров и местонахождения проводников. Эту разность потенциалов можно измерить прибором, называемым электрометром (рис. 29.2, *а*). Этот прибор будет рассмотрен в следующем разделе. К зажимам батареи можно присоединить сколько угодно проводников; на результате это не отразится.

Даже при подсоединении другой батареи, как показано на рис. 29.2 *б*, разность потенциалов, поддерживаемая первой батареей, не изменяется. Таким образом, при отсутствии тока в батарее, эту последнюю можно рассматривать как машину для поддержания определенной разности потенциалов — той, которую дает ЭДС батареи.

Проводник, в котором прекращается течение зарядов, является эквипотенциальным телом. А что представляет собой проводник, такой, как проволока, присоединенная к обоим зажимам батареи? Под действием электрического поля заряды текут через нее непрерывно. Установление для этого случая полной картины поля является задачей слишком сложной, чтобы это можно было здесь сделать, но тем не менее мы постараемся дать об этом поле некоторое представление. Поле внутри проводника не может выходить за пределы его поверхности. Если бы это происходило, то заряды притекали бы к поверхности до тех пор, пока не было бы образовано компенсирующее поле. И действительно, как только цепь замыкается, на поверхности появляется определенная концентрация зарядов. С этого момента поле внутри проволоки проходит только от положительного

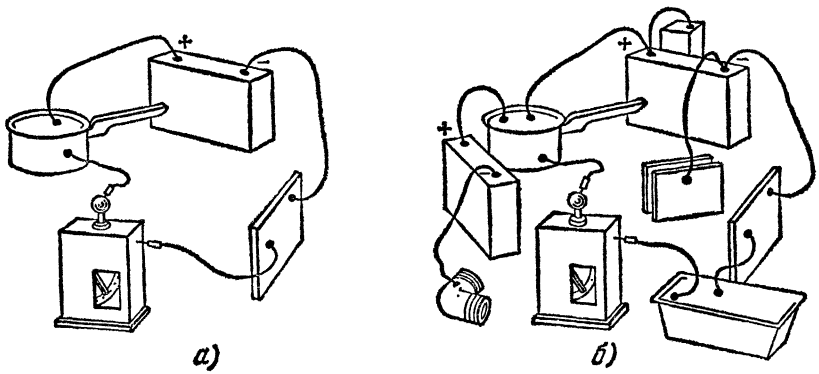


Рис. 29.2. *а*) Измеренная электрометром разность потенциалов между любыми двумя проводниками, соединенными с батареей, зависит только от ЭДС батареи. *б*) Электрометр дает такое же показание, как и в случае *а*), даже если один из проводников соединен с другой батареей, а также если подключены другие проводники.

зажима батареи к отрицательному. Независимо от того, как изогнут проводник, поле внутри него повторяет все его изгибы (рис. 29.3). Таким образом, поле внутри проводника относительно просто по сравнению с внешним полем проводника.

От зарядов, образовавшихся на поверхности, внешнее поле может распространяться в любом направлении. В противоположность внутреннему полю, оно зависит от расположения батареи, формы проводника и положения других заряженных тел. Вектор напряженности $\boldsymbol{E}$ в проводе направлен вдоль провода. Для того чтобы обеспечить один и тот же ток во всех сечениях, модуль вектора $\boldsymbol{E}$ должен быть постоянен на протяжении каждого отрезка провода однородного сечения, как будет показано в разделе 29.4. Следовательно, работа, приходящаяся на элементарный заряд при перемещении положительного заряда от одного до другого конца однородного отрезка провода длиной l, равна этой длине, умноженной на силу, приложенную к элементарному заряду, т. е. El. Поскольку энергию для за-

рядки сообщает батарея, работа по перемещению элементарного заряда должна равняться энергии, отдаваемой одному элементарному заряду батареей, т. е. ЭДС ($\mathcal{E}$). Таким образом,

$$\mathcal{E} = El.$$

Для данной батареи, подключенной к концам провода, $\mathcal{E}$ постоянно, так что величина напряженности электрического поля в проводе зависит от длины провода. Если провод не однороден по сечению, то модуль вектора $\boldsymbol{E}$ изменяется от точки к точке. Но если построить график E как функции расстояния вдоль проволоки от положительного зажима батареи до отрицательного, то площадь под кривой между концами провода будет равна энергии на элементарный заряд, сообщаемой положительному заряду на всем его пути, т. е. разности потенциалов между зажимами. Например (рис. 29.4), если проволока является хорошим проводником на длине

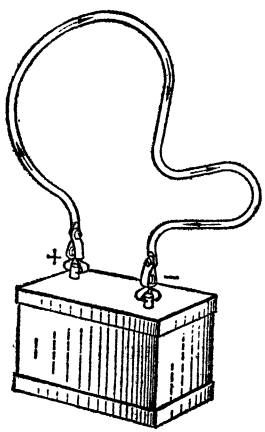


Рис. 29.3. Когда проводник присоединяется к батарее, внутри проводника образуется электрическое поле, линии которого идут от положительного зажима батареи к отрицательному.

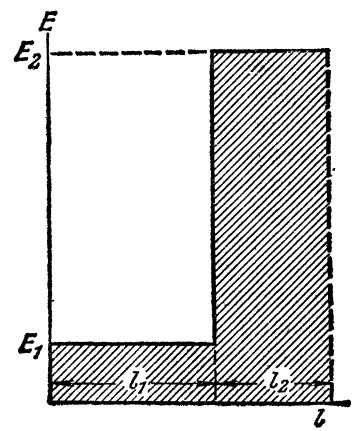


Рис. 29.4. График зависимости модуля E вектора напряженности электрического поля в проводе от расстояния l, отсчитываемого вдоль провода. В изображенном случае проволока представляет собой хороший проводник на одной части своей длины и плохой — на другой. Площадь El под каждым участком кривой выражает энергию, переданную элементарному заряду на данном отрезке провода. Вся площадь графика выражает разность потециалов между концами провода.

l_1 и плохим на длине l_2, то заряд будет накапливаться на стыке между двумя проводниками, пока поле E_2 на длине l_2 значительно не увеличится, а поле E_1 на длине l_1 заметно не ослабеет настолько, чтобы сила тока в каждой из частей стала одинаковой. Сумма $E_1l_1+E_2l_2$ составляет разность потенциалов между положительным и отрицательным зажимами батареи. Это и есть полная энергия на элементарный заряд, сообщаемая зарядам, проходящим по проводу от зажима к зажиму и выражаемая электродвижущей силой $\mathcal{E}$ батареи. Если бы эта энергия была меньше $\mathcal{E}$, батарея быстро увеличила бы ее, увеличивая положительный заряд на положительном

зажиме и отрицательный заряд на отрицательном зажиме; если бы энергия была больше $\mathscr{E}$, батарея не могла бы разделять заряды, пока зажимы не разрядятся и энергия, отнесенная к элементарному заряду, не станет опять равной $\mathscr{E}$.

Как мы только что видели, ЭДС батареи представляет собой полную разность потенциалов между положительным и отрицательным зажимами батареи:

$$\mathscr{E} = E_1 l_1 + E_2 l_2.$$

Разность потенциалов в правой части равенства состоит из двух частей: $E_1 l_2$ (разность потенциалов на хорошем проводнике длиной l_1) и $E_2 l_2$ (разность потенциалов на плохом проводнике длиной l_2). В действительности, когда мы движемся вдоль проводника от положительного зажима батареи к отрицательному, разность потенциалов, измеряемая от положительного зажима до любой точки проволоки, изменяется постепенно. На любом отрезке проволоки на длине Δl потенциал изменяется на величину $\Delta V = E\Delta l$, где E — напряженность электрического поля на данном участке проволоки.

Для каждого элементарного заряда, протекающего через отрезок проволоки длиной Δl, энергия $(\Delta V) \cdot 1$ элем. зар. преобразуется прежде всего из электрической потенциальной энергии в энергию движущегося заряда. Затем, при столкновении заряда с атомами проволоки, энергия преобразуется в тепловую энергию, нагревающую участок проволоки. Эти утверждения можно будет проверить экспериментально после того, как мы обсудим измерение разности потенциалов (раздел 29.2). Мы тогда найдем, что наши заключения подтверждаются экспериментальными фактами.

Поскольку энергия, сообщаемая одному элементарному заряду при его движении между двумя точками с разностью потенциалов ΔV, равна $(\Delta V) \cdot 1$ элем. зар., можно заключить, что энергия, сообщаемая любому заряду q, равна $(\Delta V)q$. Часто этот вывод оказывается правильным. Но он основан на предположении, что соседние заряды, создающие электрическое поле, остаются на своих местах и таким образом действуют с такими же силами, с какими они действовали бы, если бы мы двигали только отдельный элементарный заряд.

Вспомним (см. предыдущую главу), что если бы создающие поле заряды были закреплены, то эта энергия действительно была бы равна $(\Delta V)q$. Однако, если эти заряды находятся в проводнике, их невозможно закрепить; они будут перемещаться под действием кулоновских сил, испытываемых ими со стороны заряда q. Даже отдельный элементарный заряд при перемещении около проводящего тела из одного положения в другое вызывает перераспределение зарядов. Действительно, при приближении заряженного тела к *незаряженному* проводнику происходит перераспределение зарядов и заряженное тело испытывает силу притяжения (рис. 29.5, *а*). С другой стороны, если на проводнике имеется достаточно большой избыток зарядов какого-либо знака, изменение электрического поля за счет

наведенных зарядов незначительно (рис. 29.5, *б*). В этом случае мы можем пользоваться потенциалом, обусловленным зарядом на проводнике, чтобы, пренебрегая перераспределением зарядов, выразить изменение потенциальной энергии в виде $(\Delta V)q$.

Потенциал в каждой точке есть по существу разность потенциалов между этой точкой и бесконечностью, поскольку потенциал бесконечно удаленной точки нами принят за нуль. Для выражения разности потенциалов между любыми двумя точками мы в дальнейшем будем пользоваться просто символом V вместо ΔV независимо от того, находится ли одна из точек в бесконечности.

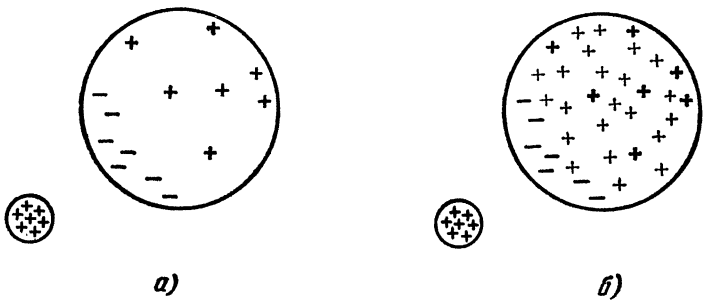


Рис. 29.5. *а*) Если около незаряженного проводника поместить заряженное тело, то оно вызовет перераспределение зарядов. Наведенные заряды действуют на заряженное тело с некоторой силой, что доказывает существование электрического поля индуцированных зарядов. *б*) Заряженное тело поднесено к проводнику с большим избытком зарядов одного знака. Если оба тела расположены не слишком близко друг к другу, наведенные заряды мало изменяют первоначальное электрическое поле проводника.

Помимо того случая, когда наведенные заряды незначительны, мы имели дело с примером другого рода, в котором qV дает правильные результаты. Если определенная разность потенциалов V между проводниками поддерживается батареей или каким-либо другим источником ЭДС, движение заряда q от одной точки к другой сопровождается именно таким перераспределением зарядов, которое сохраняет неизменную разность потенциалов. В этом случае источник ЭДС доставляет недостающую энергию или поглощает избыток энергии. Передача энергии точно выражается как qV, так как потенциал не может изменяться.

Закончим этот раздел применением идей, которые мы обсудили, к движению иона в пространстве от положительно заряженного к отрицательно заряженному проводнику. При удалении иона от положительно заряженного проводника в последнем постепенно перемещается положительный заряд. По мере приближения иона к отрицательно заряженному проводнику отрицательные компенсирующие заряды постепенно концентрируются непосредственно перед ионом. Если два проводника соединены через батарею, положительный заряд постепенно переносится через батарею от отрицательного к положительному электроду. Таким образом, к концу процесса компенсирующий отрицательный заряд сообщается

отрицательно заряженному проводнику, а положительный заряд восстанавливается на положительно заряженном проводнике. Кроме того, при протекании заряда через батарею последняя доставляет энергию, равную той, которая переходит в кинетическую энергию положительного заряда, движущегося между проводниками. Когда весь этот процесс заканчивается, положение в проводниках остается таким же, как в начале процесса. Изменяются только химическая энергия батареи и тепловая энергия проводников. Следующий заряд, проходящий через проводники, получает в точности такую же энергию, как и предыдущий, и если сумма всех прошедших зарядов равна q, то эти заряды в общем получают энергию qV.

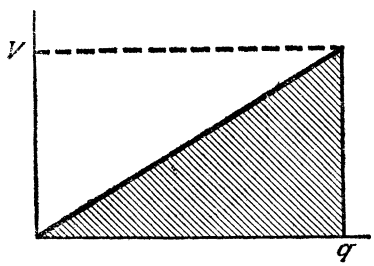


Рис. 29.6. По мере того, как заряд переходит с одной заряженной металлической пластины на другую, противоположно заряженную, разность потенциалов пластин уменьшается одновременно с уменьшением избыточного заряда на каждой пластине. Разность потенциалов, соответствующая каждому количеству электричества на пластинах, показывает, сколько энергии сообщается элементарному заряду при переходе заряда с одной пластины на другую. После перехода всех зарядов вся полученная ими энергия выражается заштрихованной площадью.

С другой стороны, если батарея отсутствует, положительно заряженный проводник один за другим теряет заряды ионов, а в отрицательном проводнике все время нейтрализуются отрицательные заряды. Разность потенциалов между этими проводниками падает. Следующий заряд, протекающий между проводниками, получит поэтому несколько меньшую энергию, и каждый последующий заряд будет получать все меньше энергии. Следовательно, q протекших зарядов получат энергии меньше qV, где V — первоначальный потенциал.

В качестве последнего примера рассмотрим две противоположно заряженные металлические пластины. Когда элементарные заряды протекают между ними, пластины разряжаются; потенциал стремится к нулю, оставаясь пропорциональным зарядам пластин. Следовательно, хотя первый заряд получает энергию $V \cdot 1$ элем. зар., где V — разность потенциалов между полностью заряженными электродами, последующие заряды получают все меньшие и меньшие порции энергии и, наконец, последний заряд не получает вовсе никакой энергии. Средняя величина энергии, полученная элементарным зарядом, составляет как раз половину первоначальной разности потенциалов. Таким образом, полная энергия, полученная всеми q зарядами за время прохождения от одной пластины до другой, равна $qV/2$.

Рис. 29.6 показывает, что это правильно. На этом рисунке затрата энергии на элементарный заряд отложена как функция заряда пластин. После перетекания всех q элементарных зарядов полная сообщенная энергия выразится площадью под кривой. Поскольку эта площадь является площадью треугольника, она равна $qV/2$. Она выражает энергию, запасенную первоначально, когда

все заряды были сконцентрированы на пластинах. Другими словами, $qV/2$ есть электрическая потенциальная энергия всех зарядов, расположенных на двух пластинах. Мы видим, что полная электрическая потенциальная энергия отличается от разности электрических потенциалов V и от энергии qV, которая передается q зарядам, протекающим между пластинами, когда батарея поддерживает постоянную разность потенциалов.

29.2. Измерение разности потенциалов

Для измерения разности потенциалов можно использовать экранированный электрометр (рис. 29.2). Электрометр дает определенное показание, когда сила, действующая между неподвижной и подвижной частями его стержня, достигает определенного значения; эта сила зависит от заряда стержня и индуцированного заряда на внутренней стороне защитного кожуха. Данному заряду на стержне отвечает данное электрическое поле между стержнем и внутренней стороной кожуха; тогда и разность потенциалов имеет определенное значение. Следовательно, каждое показание электрометра соответствует определенному значению разности электрических потенциалов. И наоборот, всякий раз, когда разность потенциалов между стержнем и кожухом будет иметь одно и то же значение, поле и заряды внутри электрометра должны быть одними и теми же, и электрометр дает одно и то же показание.

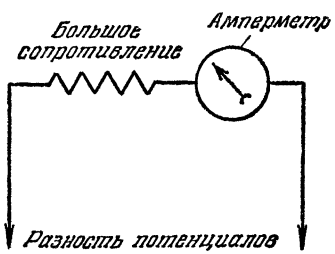


Рис. 29.7. Вольтметр, предназначенный для измерения разности потенциалов, состоит из амперметра и большого сопротивления, соединенных последовательно. Часто это сопротивление монтируется внутри футляра амперметра.

Вместо измерения разности потенциалов электрометром более удобно использовать амперметр с последовательно присоединенным большим сопротивлением (рис. 29.7). При приложении различных разностей потенциалов V к концам этой цепи электрические поля, движущие заряды по цепи, пропорциональны разностям потенциалов. Например, если разность потенциалов поддерживается концентрацией зарядов на проводниках с двух сторон, поле и разность потенциалов пропорциональны этим зарядам. Таким образом, увеличение потенциала означает возрастание сил, действующих на заряды, способные перемещаться по проволоке высокого сопротивления и через амперметр. Такое возрастание сил приводит к увеличению силы тока в цепи, которая, следовательно, является мерой разности потенциалов. В обычных проводах, как мы увидим в разделе 29.4, сила тока пропорциональна разности потенциалов, но так или иначе амперметр вместе с его добавочным большим сопротивлением можно проградуировать на разность потенциалов, пользуясь известными разностями потенциалов, поддерживаемыми батареями. После такой градуировки амперметра с большим добавочным сопротивлением он

становится измерителем разности потенциалов. Обычно такие приборы называются вольтметрами.

Вольтметрами удобно пользоваться только тогда, когда их сопротивление настолько велико, что ток через вольтметр мал по сравнению с любыми другими токами, которые мы хотим поддерживать в цепи, или тогда, когда мы можем измерить разность потенциалов настолько быстро, что ток не может значительно изменить концентрацию, которую мы хотим сохранить. Если эти условия не обеспечиваются, необходимо использовать более сложные цепи, например цепи, называемые потенциометрами, которые вы можете изучить в лаборатории.

29.3. Дальнейшая проверка сведений о разности потенциалов и энергии

Батарея сохраняет постоянную разность потенциалов, а в отсутствие токов любой хороший проводник целиком находится под одним и тем же электрическим потенциалом. Следовательно, сохраняя с помощью батареи постоянную разность потенциалов, мы можем разгонять заряженные тела в электрическом поле до заранее заданной кинетической энергии между любыми двумя проводниками. Проводники не должны быть обязательно большими параллельными пластинами.

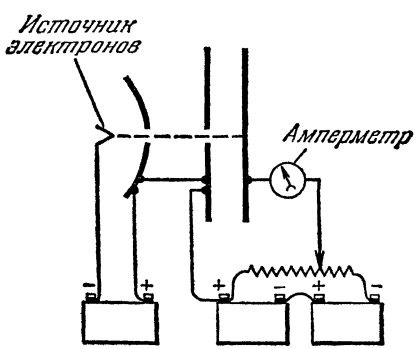


Рис. 29.8. Опыт, показывающий, что энергия, полученная заряженными частицами, зависит только от пройденной ими разности потенциалов и не зависит от формы заряженных пластин. Ток, протекающий в амперметре, прекращается, как только разность потенциалов между пластинами становится больше разности потенциалов, наложенной на электронную пушку.

Можно допустить наличие некоторого тока в проводниках без того, чтобы разность потенциалов существенно изменилась. Поскольку заряды движутся в проводниках свободно, для перемещения заряда от одной точки к другой почти не требуется затраты энергии, и проводник может находиться приблизительно при одном потенциале, хотя зарядам и нужна небольшая сила для перемещения. (Более подробно эти выводы будут рассмотрены в разделе 29.5.)

Мы можем применить эти идеи для проверки наших сведений о разности потенциалов и энергии. Например, можно подсчитать энергию электронов, испускаемых электронной пушкой, описанной в гл. 26. Эта пушка состоит из нагретой нити, которая испускает электроны с незначительными скоростями, и пластины (анода), находящейся под постоянной разностью потенциалов по отношению к нити. Электроны ускоряются между нитью и пластиной. Затем они проходят через отверстие в пластине с кинетической энергией,

определяемой разностью потенциалов. Разность потенциалов между нитью и пластиной в 1000 В передает каждому электрону кинетическую энергию $1000 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж, так как заряд каждого электрона равен одному элементарному заряду. Нам не обязательно точно знать структуру электрического поля между нитью и пластиной. Фактически напряженность поля очень велика около нити и мала у пластины. Однако при прохождении частиц от нити к пластине энергия, приходящаяся на один элементарный заряд, зависит только от разности потенциалов.

Мы можем проверить это экспериментально, рассматривая движение электронов от электронной пушки в равномерно замедляющем электрическом поле между параллельными пластинами, где известна тормозящая сила (рис. 29.8). Электроны будут пересекать пространство между двумя параллельными пластинами, поскольку замедляющая разность потенциалов между пластинами меньше ускоряющей разности потенциалов между нитью и пластиной электронной пушки. Они останавливаются, достигая дальнего конца системы, и ток через амперметр прекращается, как только замедляющая разность потенциалов превзойдет ускоряющую разность потенциалов. Этот опыт показывает, что энергию определяет разность потенциалов, созданная батареей; форма проводников не имеет значения.

29.4. Зависимость силы тока от разности потенциалов

Как зависит сила тока в ионизованных газах, сила тока электронов, выбитых из металла, и сила тока в металлах от разности потенциалов, поддерживаемой на концах этих элементов цепи? Рассмотрим этот вопрос.

Начнем со случая ионизованных газов. Экспериментальная установка показана на рис. 29.9. Две параллельные металлические пластины соединены с источником регулируемого напряжения; чувствительный амперметр включен в один из соединительных проводов. Пластины находятся на расстоянии нескольких сантиметров друг от друга, и пространство между ними заполнено исследуемым газом. Когда ионизующее излучение (рентгеновские лучи или лучи от радиоактивного источника) проходит через газ, амперметр показывает наличие тока. Рис. 29.10 дает зависимость силы тока от разности потенциалов между металлическими пластинами в одном из таких опытов. В данном опыте использовался аргон при атмосферном давлении и излучение от препарата радия. При увеличении разности потенциалов между пластинами сила тока сначала быстро увеличивается, затем увеличивается медленнее и в конце концов достигает некоторого предельного значения, называемого током насыщения.

Ток насыщения достигается, когда все образующиеся ионы отсасываются из газа электрическим полем, и осаждаются на соответствующих пластинах. Для однозарядных ионов, которые и образуются в аргоне, ток ионизации (выраженный числом элементарных

зарядов в секунду) равен числу положительных ионов, достигающих отрицательного электрода за секунду (это число такое же, как число отрицательных ионов — в данном случае электронов,— достигающих положительного электрода). Следовательно, ток насыщения является мерой общего числа пар ионов, образующихся в газе между пластинами за секунду.

Почему, когда разность потенциалов между пластинами мала, сила тока меньше силы тока насыщения? Поле, движущее ионы к пластинам, слабее, и ионы движутся к пластинам медленнее. Хотя они постепенно и продвигаются к пластинам, все же вследствие хаотического теплового движения и случайных столкновений положительных и отрицательных ионов они движутся во всех направлениях. Время от времени ионы даже соединяются, образуя нейтральный атом. Если направленное движение ионов к пластинам очень медленное, многие положительные и отрицательные ионы воссоединяются («рекомбинируют»), не достигая пластин.

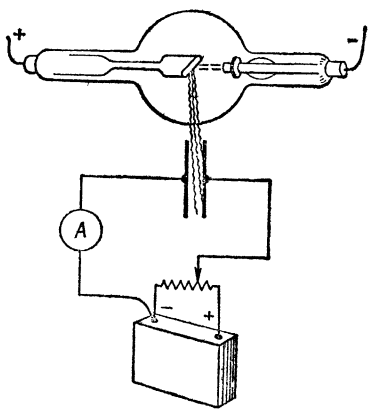


Рис. 29.9. Установка для исследования электрических токов в ионизованных газах.

При увеличении разности потенциалов между пластинами намного выше значения, необходимого для тока насыщения, обнаруживается, что сила тока начинает опять увеличиваться. В этом случае при небольшом увеличении разности потенциалов сила тока возрастает до очень большой величины (рис. 29.10, *б*). При этих разностях потенциалов газ между пластинами светится, и часто наблюдается потрескивание. То, что мы наблюдаем на этой стадии, зависит в сильной степени от давления, природы газа и расстояния между электродами. При низких давлениях ток и свечение более или менее постоянны. При атмосферном же давлении наблюдаются прерывистые искры.

Газовые разряды очень сложны, но основную причину наблюдаемых явлений мы сможем понять. Электрическое поле ускоряет положительные и отрицательные ионы ионизованного газа в противоположных направлениях. Каждый ион набирает энергию до тех пор, пока не столкнется с молекулой газа. В среднем при этих столкновениях ионы теряют избыточную энергию, приобретенную со времени предыдущего столкновения. Эта энергия переходит в тепловую энергию газа. Газ нагревается.

Положение, однако, меняется в случае очень сильного электрического поля. Тогда за короткое время между столкновениями некоторые ионы приобретают достаточную кинетическую энергию, чтобы разрушать молекулы газа, с которыми они сталкиваются.

Образующиеся осколки молекул представляют собой новые ионы, которые тоже ускоряются электрическим путем. Они в свою очередь способны разрушать молекулы газа, встречающиеся на их пути. Так образуется лавина размножающихся ионов. Газ внезапно приобретает огромную электрическую проводимость, и наблюдается внезапный разряд. Используя подобные лавины, счетчики Гейгера

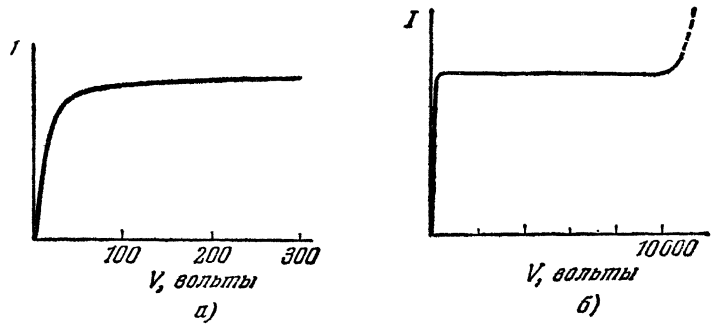


Рис. 29.10. *а*) Зависимость силы тока от разности потенциалов для аргона при низких напряжениях. *б*) Зависимость силы тока от разности потенциалов для аргона вплоть до высоких напряжений.

обнаруживают отдельные заряженные частицы, превращая слабую ионизацию вдоль пути частицы в заметный электрический импульс.

Почти аналогичная зависимость между силой тока и разностью потенциалов наблюдается для электронов, вырвавшихся из нагретого куска металла (рис. 29.11). Когда разность потенциалов между нагретой нитью и окружающей коллекторной поверхностью (анодом) велика, получаем ток насыщения. При дальнейшем повышении разности потенциалов число электронов, летящих от нити к аноду, не изменяется, так как все электроны, вылетающие из нити за секунду при данной температуре, попадают на анод. Однако, когда разность потенциалов достаточно низка, сила тока падает ниже силы тока насыщения. Очевидно, электроны, испускаемые нитью, не отлетают от нее достаточно быстро, и пока они находятся около нити, вновь испускаемые электроны отталкиваются обратно. Подробные вычисления показывают, что наблюдаемые кривые зависимости силы тока от разности потенциалов объясняются именно действием «пространственного заряда».

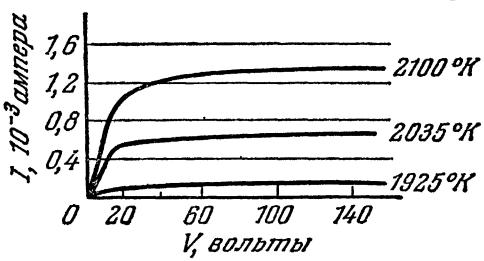


Рис. 29.11. Кривые зависимости силы тока от разности потенциалов для электронной эмиссии с нагретой проволоки при различных температурах накала нити в диоде.

Если разность потенциалов между нитью накала и анодом уменьшить до нуля, то можно наблюдать явление, также представляю-

щее интерес: сила тока не падает до нуля. Некоторое количество электронов продолжает достигать «анода», даже если он становится слабо отрицательным по сравнению с нитью накала. Очевидно, некоторые электроны испускаются нитью накала с достаточной кинетической энергией, чтобы дойти до анода, несмотря на замедляющую разность потенциалов. Тщательные измерения показывают, что необходимая для прекращения тока разность потенциалов — около 0,2 В *). Это соответствует тепловой энергии частицы при температуре нити накала.

В качестве последнего примера зависимости между силой тока и разностью потенциалов рассмотрим металлический проводник. Здесь связь между силой тока и разностью потенциалов очень проста: эти две величины пропорциональны друг другу, т. е.

$$V=RI.$$

Закон, выраженный этим равенством, называется законом Ома, а коэффициент пропорциональности R называется *электрическим сопротивлением* проводника. Если V измерять в вольтах, а I — в амперах, то R измеряется в единицах, называемых омами.

Закон Ома гласит, что сила тока в металлическом проводнике пропорциональна разности потенциалов между концами проводника. Так как напряженность электрического поля в данном куске металла пропорциональна разности потенциалов на его концах, можно также сказать: сила тока пропорциональна напряженности электрического поля. Можно понять этот закон, вернувшись к модели проводимости, в которой мы представляли себе электроны свободно движущимися внутри металла, аналогично молекулам газа (раздел 26.12). Вследствие чрезвычайной легкости электронов они при нормальных температурах имеют громадные скорости — около 10^5 м/с. Они носятся внутри металла, очень часто сталкиваясь с положительными ионами металла. Средний промежуток времени между последовательными столкновениями одного электрона с тем или иным металлическим ионом очень мал: около $3\cdot10^{-15}$ с. Он определяется расстоянием между ионами и *тепловой скоростью* электронов. Кроме того, при каждом столкновении электрон отражается в новом направлении. Таким образом, каждый электрон носится во всех направлениях в своем беспорядочном тепловом танце.

Теперь к нашей картине добавим электрическое поле. За короткое время между столкновениями оно ускоряет электрон вдоль проволоки. Небольшая добавочная скорость, которую электроны приобретают вдоль проволоки, пропорциональна напряженности поля и времени между столкновениями.

---

*) Для этих измерений необходимо, чтобы весь нагретый металл был при одном и том же потенциале. Иначе разность потенциалов между двумя участками металла может быть порядка разности потенциалов, которую мы хотим измерить. Поэтому пользуются отдельным нагревателем вместо пропускания тока накала непосредственно через нагреваемый металл.

Полная картина выглядит так: электроны носятся во всех направлениях с огромными скоростями; однако на эти случайные движения накладывается небольшая упорядоченная скорость, направленная вдоль проволоки. Эта упорядоченная скорость пропорциональна напряженности поля и времени между столкновениями. При разности потенциалов в несколько вольт на 1 м проволоки упорядоченная скорость равна приблизительно 1 см/с. Эта упорядоченная скорость и обусловливает ток. Чем больше упорядоченная скорость, тем больше сила тока; отсюда сила тока пропорциональна напряженности электрического поля. Наша модель, таким образом, предсказывает экспериментальный результат, выражаемый законом Ома.

Эта модель, кроме того, позволяет предсказать некоторые особенности электрического сопротивления. Оно должно увеличиваться с увеличением температуры. При возрастании температуры растет и скорость электронов. Следовательно, время между столкновениями уменьшается и при постоянной напряженности поля получается меньшая сила тока. Этот вывод согласуется с экспериментальным наблюдением, что сопротивление металлов обычно увеличивается с ростом температуры. Однако согласие является неполным: тщательные опыты показали, что сопротивление увеличивается пропорционально температуре, в то время как из модели вытекает, что сопротивление должно быть пропорционально корню квадратному из нее. Несоответствие объясняется двумя обстоятельствами: во-первых, вследствие высокой плотности электронного газа мы не должны ожидать, что он будет вести себя как идеальный газ. Электроны настолько близки друг к другу, что силы между ними влияют на их движение. Во-вторых, когда плотность газа, состоящего из одинаковых частиц, велика, становятся существенными квантовые эффекты, которые мы рассмотрим позже. Если принять во внимание эти эффекты, то усовершенствованная модель будет точно соответствовать экспериментальным данным. Впрочем, и наша модель полезна как необходимый шаг к более полному описанию.

29.5. Общее представление об электрической цепи

Когда батарея зажигает электрическую лампочку карманного фонаря, заставляет работать электромотор или поддерживает ток в электролитической ванне, она передает энергию внешней цепи (лампе, мотору или электролитической ванне). Там энергия преобразуется в теплоту или в механическую энергию. Если цепь содержит электронную лампу с нагретой нитью, электроны при прохождении от нити через вакуум получают большую кинетическую энергию и ударяются об анод. В электронной лампе, сконструированной так, что электроны ударяются о небольшую область анода, эту часть анода можно довести до белого каления. В металлической проволоке энергия, переданная батареей, также преобразуется в кинетическую энергию движения электронов по проволоке. После столкновения электронов с атомами проволоки кинетическая энергия

преобразуется в энергию хаотического движения атомов. Вследствие частых столкновений электроны никогда не приобретают большой кинетической энергии. Получаемая электронами энергия почти сразу же превращается в теплоту. Если в цепи есть электродвигатель, бóльшая часть энергии может быть использована для поднятия тяжестей, хотя часть энергии обязательно превратится в теплоту.

Рассмотрим цепь, изображенную на рис. 29.12. Каждый электрон, проходя от нити к аноду, ускоряется, приобретая кинетическую энергию, равную разности потенциалов между нитью и анодом, создаваемой батареей. Проходящий электрон уносит один отрицательный заряд от нити и нейтрализует один положительный заряд на аноде. Если мы выключим батарею, ток сразу же прекратится. Когда же батарея подключена, то пока один электрон движется от нити к аноду, другой должен двигаться вдоль проволоки от отрицательного полюса батареи, чтобы занять место, покинутое первым электроном. Таким образом, по проводу течет ток, равный току от нити к аноду. Небольшое электрическое поле в проводе вынуждает электроны двигаться. Таким образом, при наличии тока различные точки проводящей проволоки находятся не точно при одном и том же потенциале. Если проволока достаточно длинна и тонка и если сила тока достаточно велика, то разность потенциалов на концах проволоки будет достаточно большой, чтобы ее можно было измерить.

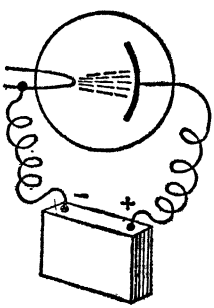


Рис. 29.12. Бóльшая разность потенциалов в диоде движет электроны от нити накала к аноду. Меньшая разность потенциалов движет электроны по проволоке.

Разность потенциалов между полюсами батареи, т. е. энергию на единичный заряд, сообщенную батареей, можно разложить на разности потенциалов различных элементов цепи. Небольшая разность потенциалов гонит электроны от отрицательного полюса батареи до нити. Она обусловливает ту энергию электронов, которая при их движении по проволоке переходит в теплоту. Большая разность потенциалов разгоняет электроны от нити к аноду и соответствует той кинетической энергии, с которой они ударяются о пластину. И, наконец, опять небольшая разность потенциалов гонит электроны по проводу к положительному полюсу батареи. Сумма этих разностей потенциалов и есть энергия, сообщаемая каждому элементарному заряду, движущемуся через батарею. Вся эта энергия рассеивается, нагревая провода и анод. И вся эта энергия исходит от батареи.

Распределение разности потенциалов, создаваемой батареей, между различными элементами цепи и величина силы тока при данной разности потенциалов зависят от физической природы элементов цепи. Связь между наблюдаемой силой тока и разностью потенциалов для нескольких элементов цепи мы рассмотрели в разделе 29.4.

То, что мы там выяснили, можно применить к более сложным цепям, состоящим более чем из одного элемента.

Пусть мы имеем два элемента цепи, для которых известны кривые зависимости силы тока от разности потенциалов. Пусть, например, это будут элементы, графики которых приведены на рис. 29.13. Если эти элементы соединены параллельно, как на рис. 29.14, то разность потенциалов между концами A и B одинакова для обоих элементов. Ток, который подходит к A и выходит из B, разветвляется, и только часть его проходит через каждый элемент цепи. Полная сила тока в цепи равна сумме сил токов, проходящих через каждый элемент. Она может быть найдена сложением силы тока I_1, протекающего через элемент *1* при определенном значении разности потенциалов, и силы тока I_2, протекающего через элемент *2* при том же значении разности потенциалов. Складывая значения сил двух токов, определяемых в схеме рис. 29.13 при каждом

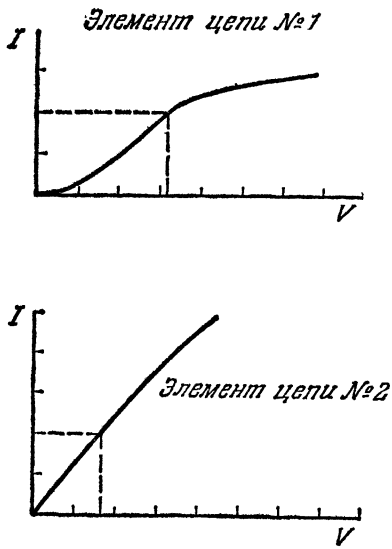


Рис. 29.13. Кривые зависимости силы тока от разности потенциалов для двух элементов цепи.

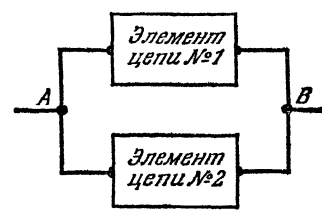


Рис. 29.14. Два элемента цепи, соединенных параллельно.

значении разности потенциалов, можно построить график полной силы тока $I=I_1+I_2$ между A и B в зависимости от разности потенциалов V (рис. 29.15). Таким образом мы объединяем два элемента цепи, соединенных параллельно, в новый элемент цепи, представленный графической зависимостью силы тока I от V. Этот метод может быть распространен на большее число параллельно соединенных элементов цепи с суммированием отдельных сил токов при каждой разности потенциалов.

Следовательно, мы всегда можем заменить группу элементов цепи, соединенных параллельно, эквивалентным элементом цепи, действующим совершенно так же, как вся совокупность параллельно соединенных элементов.

При любой разности потенциалов, приложенной к точкам разветвления параллельных элементов цепи, энергия на элементарный заряд по-прежнему равна разности потенциалов. Следовательно,

мощность, расходуемая при параллельном соединении, равна IV, где I — полная сила тока, т. е. сила тока, который течет через всю группу параллельных элементов при рассмотрении ее как одного элемента. Эта мощность складывается из мощности каждого отдельного элемента.

Например, для двух элементов.

$$IV = I_1V + I_2V,$$

где I_1 и I_2 — силы тока в каждом из элементов, соединенных параллельно. В этом равенстве каждый из членов справа равен мощности, расходуемой каждым отдельным элементом цепи, а их сумма слева является полной мощностью, потребляемой всей группой параллельно соединенных элементов.

Если отдельные элементы цепи соединить последовательно, рассуждение будет несколько отличаться от предыдущего. Через каждый элемент цепи будет протекать ток одинаковой силы. Начнем с предположения, что эта сила тока имеет определенное значение. Используя графики зависимости силы тока от разности потенциалов для каждого элемента, можно получить соответствующие разности потенциалов. Затем, чтобы найти разность потенциалов на концах последовательной цепи, мы должны сложить падения потенциалов на отдельных последовательно соединенных элементах этой цепи. На рис. 29.13 отмечены точки, соответствующие одинаковым силам тока на каждой из кривых зависимости силы тока от разности потенциалов, и пунктирными линиями указано, как найти соответствующие падения потенциалов. При последовательном соединении двух элементов падение потенциала на всей цепи дается суммой двух падений потенциалов, которые мы считываем с горизонтальных осей каждой из двух зависимостей I от V для каждого элемента. Применяя эту процедуру ко всем возможным силам тока, можно установить связь между силой тока и разностью потенциалов на концах цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов. Можно также составить график зависимости силы тока от разности потенциалов (рис. 29.16). Таким путем удается превратить последовательно соединенные элементы цепи в один эквивалентный элемент цепи, представленный этой новой кривой зависимости тока от разности потенциалов.

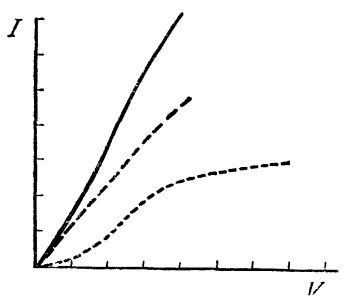


Рис. 29.15. Кривая I (V) для эквивалентного элемента цепи, полученного при параллельном соединении элементов цепи (см. рис. 29. 13). Она получается сложением сил токов обоих элементов цепи для одинаковых разностей потенциалов.

После того как мы установили поведение одного эквивалентного элемента цепи, можно определить силу тока, который протекал бы через данные последовательно соединенные элементы цепи при при-

ложении к ее концам определенной разности потенциалов. Как всегда, эта разность потенциалов представляет энергию, затрачиваемую на перемещение единичного элементарного заряда по цепи. Расходуемая мощность по-прежнему равна IV, где V — разность потенциалов между концами последовательно соединенных элементов цепи. В данном случае, однако, V есть сумма отдельных падений потенциала на каждом из элементов, образующих последовательную цепь. Если цепь состоит из двух элементов, сумма падений равна $V=V_1+V_2$.

Следовательно,

$$IV=IV_1+IV_2.$$

В этом уравнении каждое слагаемое справа представляет собой мощность, расходуемую в соответствующем элементе, а полная мощность IV является просто суммой мощностей, расходуемых в каждом элементе.

Таким образом, мы рассмотрели, как связаны между собой токи и разность потенциалов в реальной цепи. Эти результаты согласу-

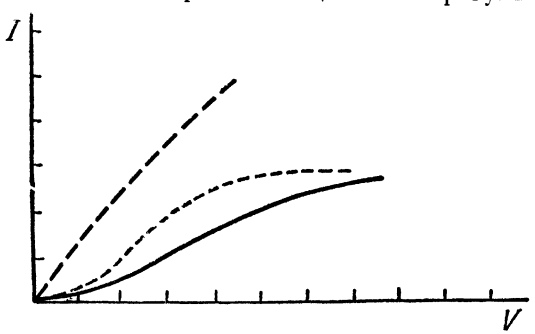


Рис. 29.16. Кривая $I(V)$ для эквивалентного элемента цепи, когда элементы цепи рис. 29.13 соединены последовательно. Она получается сложением разностей потенциалов обоих элементов цепи при одинаковых значениях силы тока. Вы можете наглядно представить себе это сложение, начиная рассматривать график слева. Если вы выберете определенное значение силы тока, то разность потенциалов, необходимая для получения этого тока в первом элементе цепи, выразится расстоянием до первой пунктирной кривой (расстояние откладывается параллельно оси V). Для получения такой же силы тока во втором элементе цепи разность потенциалов определяется расстоянием до второй пунктирной кривой. Сумма этих двух потенциалов является разностью потенциалов, которая должна быть на внешних концах элементов цепи, соединенных последовательно, чтобы вызвать во внешней цепи такой же ток.

ются с нашими представлениями о поведении всей цепи в целом. В каждом случае сумма разностей потенциалов, распространенная на всю совокупность последовательно соединенных элементов цепи, соответствует суммарной ЭДС батарей или генераторов, поставляющих энергию элементарному заряду. Энергия, расходуемая на элементарный заряд элемента цепи, равна для каждого элемента цепи разности потенциалов на концах этого элемента.

Таким образом, источником энергии, преобразуемой в другие виды, такие как скрытая химическая энергия, механическая энергия или теплота, является приложенная ЭДС; и сохранение энергии требует, чтобы сумма разностей потенциалов была всегда равна приложенной ЭДС.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

1*. Какое заключение можно сделать относительно поля в проводе под током из того, что ток всегда течет вдоль провода? (Раздел 29.1.)

2*. Высокоомный провод однородного сечения длиной 10 м замыкает батарею с ЭДС в 30 В, как показано на рис. 29.3. Чему равна напряженность поля в этом проводе? (Раздел 29.1.)

3*. Как изменится электрическое поле в предыдущей задаче, если параллельно с первым проводом включить совершенно такой же второй? (Раздел 29.1.)

4*. Высокоомный провод однородного сечения длиной 20 м замыкает цепь 30-вольтовой батареи. Какова разность потенциалов между точками, отстоящими на 3 и 15 м от одного из концов провода? (Раздел 29.1.)

5. а) Как надо соединить анодную батарею ($\mathcal{E}=90$ В) и батарейку карманного фонаря ($\mathcal{E}=1{,}5$ В), чтобы получить максимальную разность потенциалов?

б) Чему равна эта разность потенциалов?

в) Предположим, вы отсоединили 90-вольтовую батарею, поменяли ее зажимы и снова подсоединили. Какую разность потенциалов вы получите?

6. а) Постройте график напряженности электрического поля в зависимости от координаты, отсчитываемой вдоль AB для случаев, изображенных на рис. 29.17.

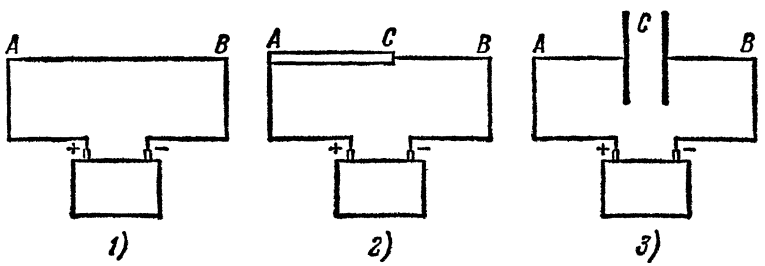


Рис. 29.17. К задаче 6.

Цепи в случаях 2) и 3) отличаются от случая 1) только тем, что в случае 2) AC состоит из двух параллельно включенных одинаковых отрезков одного и того же провода, а в случае 3) включены две параллельные пластины C, расстояние между которыми составляет $^1/_5$ расстояния от A до B. ЭДС батареи одна и та же во всех трех случаях.

б) Постройте график разности потенциалов по сравнению с потенциалом в B для промежуточных точек между A и B в зависимости от координаты, отсчитываемой вдоль AB, для всех трех случаев.

7. Две незаряженные параллельные пластины включены в цепь, изображенную на рис. 29.18. После замыкания ключей, включающих 270-вольтовую батарею, заряды текут, пока каждая пластина не зарядится до $6{,}4\cdot10^{-9}$ Кл.

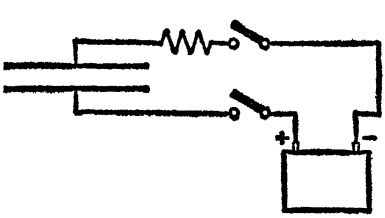


Рис. 29.18. К задаче 7.

а) Определить работу, совершенную батареей при зарядке пластин.

б) Какова энергия, накопленная на заряженных пластинах?

в) Куда идет остальная энергия?

8. Пластины задачи 7 заряжены той же батареей так, что каждая пластина имеет заряд в $6{,}4\cdot10^{-9}$ Кл, или $4\cdot10^{10}$ элементарных зарядов. Затем батарея отключается, и отрицательно заряженная пластина нагревается, после чего с поверхности испускаются электроны, ускоряемые на пути к положительно заряженной пластине.

а) Какую кинетическую энергию в джоулях имеет электрон, достигающий положительно заряженной пластины в самом начале процесса?

б) Какой величины достигает эта энергия, когда на отрицательно заряженной пластине остается $3 \cdot 10^{10}$ элементарных зарядов?

в) Какова суммарная кинетическая энергия, приносимая всеми электронами на положительно заряженную пластину за все время до полной разрядки пластин?

9*. Почему желательно, чтобы электрометр не отнимал большого количества электричества от исследуемого тела? (Раздел 28.2.)

10*. При каком условии можно пользоваться вольтметром в виде измерителя тока с добавочным сопротивлением для измерения разности потенциалов двух точек замкнутой цепи? (Раздел 29.2.)

11. Предположим, что вам даны два электрометра для измерения разности потенциалов в области 10 000 В. Кроме этого у вас есть стеклянная палочка и кусок материи. Один из электрометров градуирован, другой — нет. Пользоваться батареями не разрешено. Можете ли вы проградуировать второй электрометр, подсоединив его к первому?

12. Электронная пушка испускает пучок электронов в пространство между отклоняющими пластинами длиной $l=6$ см (рис. 29.19). Масса электрона $0{,}91 \cdot 10^{-30}$ кг. Разность потенциалов между нитью и анодом пушки — 2500 В

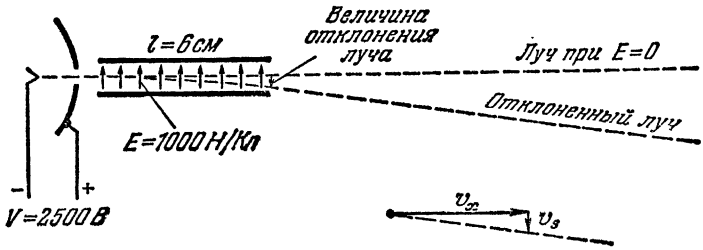


Рис. 29.19. К задаче 12.

($2{,}5 \cdot 10^3 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж/элем.зар.) Напряженность электрического поля между отклоняющими пластинами равна 1000 Н/Кл (1000 Н$=6{,}25 \cdot 10^{18}$ элем. зар.).

а) Чему равна разность потенциалов между пластинами, если расстояние между ними 0,2 см?

б) Какова скорость электронов, покидающих пушку?

в) За какое время электроны проходят расстояние l?

г) Когда электроны проходят между отклоняющими пластинами, они приобретают поперечную скорость, так как на них действует электрическое поле. Чему равна поперечная составляющая скорости, когда электроны покидают отклоняющие пластины?

д) Насколько электроны отклоняются в сторону при прохождении между пластинами?

13. а) Для установки, использованной в задаче 12, найти формулу для поперечного перемещения любого иона, ускоряющегося такой же разностью потенциалов V в пушке и отклоняющегося тем же отклоняющим полем E. Выразите искомую величину через E, V и длину отклоняющего промежутка l.

б) Как влияет масса иона?

в) Как влияет заряд иона?

14*. Предположим, что в опыте, изображенном на рис. 29.8, к источнику электронов подключена 45-вольтовая батарея. Какова будет кинетическая энергия электронов, проходящих через отверстие в дуговой пластине? (Раздел 29.3.)

15*. Предположим, что в опыте, изображенном на рис. 29.8, электроны ускоряются 45-вольтовой батареей, а делитель напряжения и две батареи между параллельными пластинами заменены 30-вольтовой аккумуляторной батареей. Опишите, что происходит с кинетической энергией электрона, прошедшего через отверстие в пластине слева и ударившегося о правую пластину. (Раздел 29.3.)

16*. Допустим, что диод, вольтамперная характеристика которого представлена на рис. 29.11, соединен последовательно через реостат с 90-вольтовой батареей. Каким должно быть сопротивление реостата, чтобы при нагревании нити накала до 2100°К ток ограничивался величиной $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ А? (Раздел 29.4.)

17. На рис. 29.20 показана установка для градуировки амперметра A. Она состоит из изолированного сосуда с проволочной катушкой внутри. Сверху подается вода, которая проходит мимо термометра T_1, затем обтекает проволочную катушку и вытекает, проходя мимо термометра T_2. Разность потенциалов на концах катушки в калориметре измеряется градуированным электрометром, так что мы знаем разность потенциалов между точками α и β. В эксперименте вода течет со скоростью 1 г/с, термометр T_2 дает показание температуры на 1°С выше, чем термометр T_1, и электрометр показывает разность потенциалов, равную 2,09 В.

а) Какова сила тока, протекающего через амперметр?

б) Как можно было бы проградуировать амперметр на этой установке?

18. Цепь (рис. 29.21) состоит из двух проволочных сопротивлений R_1 и R_2, диода, электродвигателя и электролитической ванны, соединенных последовательно с батареей. Измеряется разность потенциалов на концах каждого из этих элементов и оказывается, что она одинакова для всех элементов.

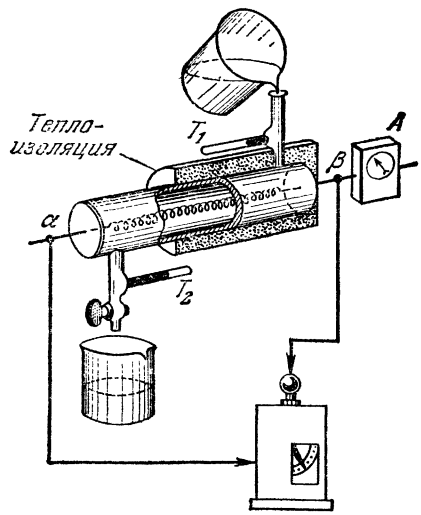


Рис. 29.20. К задаче 17.

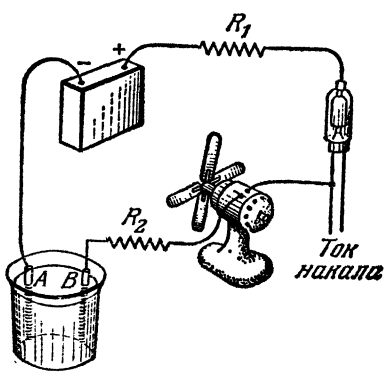


Рис. 29.21. К задаче 18.

В первом сопротивлении рассеивается в секунду некоторое количество тепла. Сравните его с количеством тепла, рассеиваемым в секунду:

а) во втором сопротивлении;

б) в диоде;

в) в двигателе, который вращает вентилятор.

г) Если в электролитической ванне рассеивается тепла меньше, чем в сопротивлении R_1, какой из зажимов, A или B, будет положителен, когда ванна используется как источник энергии (как аккумулятор)?

19. а) Чему равно сопротивление катушки (в омах) в задаче 17?

б) Докажите, что мощность, рассеиваемая в катушке, выражается формулой I^2R.

20. Какова была бы средняя тепловая скорость электронов в металле при 27 °С, если бы они двигались в нем свободно, как молекулы газа?

21. а) На единицу объема медной проволоки приходится n электронов проводимости. По проволоке течет ток I, создаваемый постоянным дрейфом электронов проводимости со скоростью v вдоль проволоки. Площадь поперечного сечения проволоки равна A. Сколько электронов проходит мимо фиксированной точки проволоки за время Δt?

б) Если заряд электрона q, чему равна сила тока в проволоке?

в) Допустим, что каждый атом меди в проволоке доставляет один электрон проводимости. Вычислите число электронов проводимости в кубическом сантиметре, исходя из массового числа меди (63) и ее плотности (8,9 г/см^3).

г) Средняя площадь поперечного сечения проволоки составляет 0,83 мм^2. Какова постоянная скорость дрейфа электронов вдоль проволоки при вполне допустимой силе тока, составляющей для этой проволоки 5 ампер?

22*. Если цена деления на графике рис. 29.13 составляет 1В на оси абсцисс и 1А на оси ординат, то какой вольтаж потребуется для силы тока в 2А? (Раздел 29.5.)

23. Имеем две проволоки одинакового поперечного сечения из одного и того же металла. Одна проволока в два раза длиннее другой.

а) Чему будет равно отношение сил токов, проходящих по проволокам, при одинаковой разности потенциалов на концах обеих проволок?

б) Как сопротивление проволоки зависит от длины?

24. а) Имеем две проволоки одинаковой длины и одинакового поперечного сечения из одного и того же материала. Каково отношение сил токов, проходящих по проволокам, если к их концам приложена одинаковая разность потенциалов?

б) Если параллельно соединенные проволоки рассматривать как один проводник, каково отношение силы тока, проходящего через этот объединенный проводник, к силе тока, проходящего через одну из этих проволок, если разность потенциалов на его концах такая же?

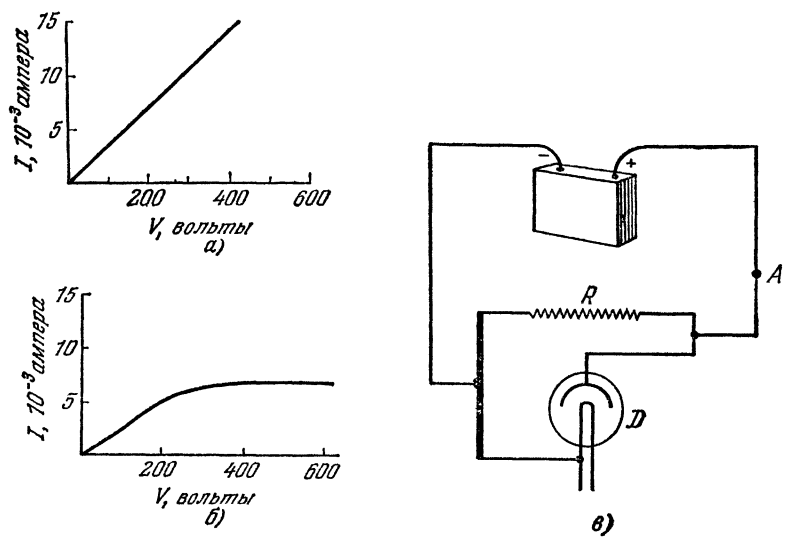


Рис. 29.22. К задаче 25.

в) Возьмем проволоку такой же длины и из того же материала, но с удвоенным поперечным сечением. Какой ток потечет через нее по сравнению с током через первоначальные проволоки при той же разности потенциалов на концах?

г) Какой должна быть зависимость сопротивления проволоки от ее поперечного сечения?

25. На рис. 29.22,*а* сила тока, протекающего по цепи металлического сопротивления, нанесена как функция от разности потенциалов на концах цепи. На рис. 29.22,*б* сила тока через диод представлена как функция от разности потенциалов между электродами.

а) Через оба этих последовательно соединенных элемента цепи протекает ток силой в $5 \cdot 10^{-3}$ А. Чему равна разность потенциалов на концах металлического сопротивления? Разность потенциалов на диоде?

б) Какова сила тока в каждом элементе цепи, если диод и металлическое сопротивление соединены параллельно, как показано на рис. 29.22,*в*, и разность потенциалов на диоде равна 100В?

в) Чему равна полная сила тока в этом случае в точке A?

г) Чему равно металлическое сопротивление (в омах)?

26. Диод и металлическое сопротивление задачи 25 соединяются последовательно (рис. 29.23). Разность потенциалов на концах цепи 1000 В.

а) Чему равна сила тока в цепи?

б) Какова разность потенциалов на концах металлического сопротивления?

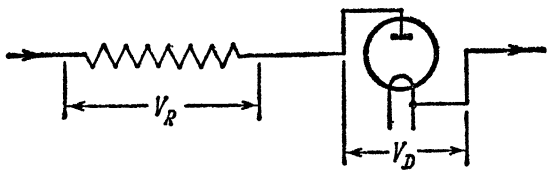


Рис. 29.23. К задаче 26.

27. Соедините батарею на 270 В последовательно с сопротивлениями в 1 МОм и 2 МОм (1 мегаом = 1МОм = 10^6 Ом).

а) Какую разность потенциалов вы получите на концах сопротивления в 1 МОм?

б) На концах сопротивления в 2 МОм?

Предположим, что мы затем измеряем разность потенциалов вольтметром.

в) Если вольтметр имеет сопротивление $R_m = 10$ МОм, какую разность потенциалов вы получите на концах сопротивления в 2 МОм?

г) Какую разность потенциалов вы получите на концах сопротивления в 1 МОм?

ГЛАВА

30 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Когда Альберт Эйнштейн в возрасте 67 лет писал историю своей жизни, он вспомнил день, когда четырехлетним ребенком он получил от отца новую игрушку — компас. Навсегда сохранил Эйнштейн удивление перед этим чудом. Многие из нас детьми испытали это чувство, и нашим воображением владела тайна подковообразного магнита, притягивающего к себе железо. В этой главе мы и собираемся рассказать о магнитных силах и о магнитном поле, которое объясняет действие магнитных сил.

30.1. Магнитная стрелка

Стрелка компаса, способная свободно вращаться вокруг вертикальной оси, стремится устанавливаться в направлении север — юг. Мы говорим, что она устанавливается в магнитном поле Земли (которое создается глубоко внутри земного шара). Мы называем кончик стрелки, указывающий на север, северным концом *). Если в некоторой области на компасную стрелку действуют силы, стремящиеся установить ее в определенном направлении, то мы говорим, что там имеется *магнитное поле* (рис. 30.1). Направление поля указывается направлением компасной стрелки, которая может свободно в нем устанавливаться. Мы говорим, что в пространстве вне стрелки поле имеет направление от южного к северному кончику стрелки. Точно так же, как мы пользовались семенами травы, чтобы показать направление электрического поля, мы применяем магнитную стрелку для исследования направления магнитного поля.

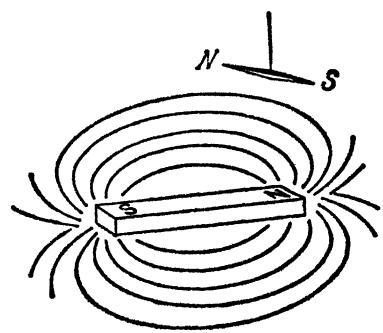


Рис. 30.1. Магнитная стрелка в магнитном поле устанавливается в направлении поля.

*) В действительности северный кончик указывает *приблизительно* на географический северный полюс, пока мы находимся южнее северного полярного круга (и севернее южного). В северном полушарии северный конец магнитной стрелки, посаженной на горизонтальную ось, направлен вниз под углом «наклонения», определяющим наклон вектора напряженности магнитного поля Земли.

В том, что магнитная стрелка сама создает магнитное поле, можно убедиться, поднося к ней другую магнитную стрелку и наблюдая их действие друг на друга: каждая оказывает направляющее воздействие на другую. Каждая создает магнитное поле и стремится расположить другую стрелку вдоль линий этого поля.

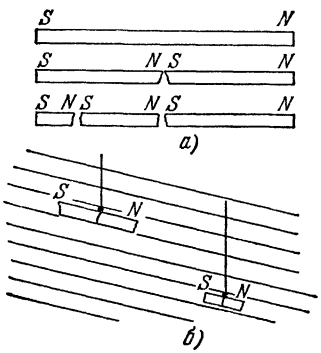


Рис. 30.2. *а*) Если разломать магнит, то каждый кусок имеет на своих концах противоположные полюсы. *б*) Каждый из этих кусков будет устанавливаться вдоль линий магнитного поля.

Магнетизм был известен древним грекам еще в 600 г. до начала нашей эры. Фалес Милетский, которого нередко называют отцом античной науки, знал о существовании минерала (магнетита), притягивающего обычное железо, и установил, что само железо способно намагничиваться после соприкосновения с этим магнитным минералом. То, что магнит может служить компасом, было обнаружено китайцами, по-видимому, в XI столетии. Обобщающая мысль о том, что сама Земля представляет собой магнит, появилась у Уильяма Гильберта, работавшего при дворе английской королевы Елизаветы, в 1600 г., т. е. примерно в то время, когда Шекспир писал свою трагедию «Гамлет».

Одно из самых удивительных свойств магнитов заключается в том, что если разломать магнит, то каждый обломок остается магнитом (рис. 30.2). Можно задать вопрос: до какого предела возможно повторять разламывание магнита прежде, чем «половина магнита» перестанет быть магнитом? Ответ заключается в том, что такого предела нет. Можно продолжать дробление до субатомных масштабов, и мы убедимся, что электроны, протоны и нейтроны сами остаются магнитами.

30.2. Магнитные поля магнитов и токов. Линии магнитного поля

Магнетит и намагниченное железо — не единственные источники магнитных полей. Проделаем опыт по получению магнитного поля без использования этих материалов. Присоединим длинный отрезок проволоки к зажимам батареи через ключ, как показано на рис. 30.3. При открытом ключе держим проволоку над стрелкой компаса и параллельно ей. Затем замкнем ключ. Если ток в проволоке достаточно силен, то мы увидим, как компасная стрелка внезапно отклонится. Теперь она стоит поперек проволоки. Отсюда мы приходим к выводу, что электрические токи создают в окружающем пространстве магнитные поля.

В настоящее время этот факт общеизвестен, и поэтому трудно оценить значение того переворота в представлениях о магнетизме, который был вызван этим открытием, сделанным датским школьным учителем Эрстедом в начале XIX столетия. До того времени электрические и магнитные явления рассматривались как совершенно раз-

дельные. Открытие Эрстеда вскрыло неожиданную связь между ними: оно связало происхождение магнитных полей с движением электрических зарядов.

Вы сами можете проделать только что описанный опыт, и он, вероятно, достаточен для того, чтобы убедить вас, что движущиеся электрические заряды создают магнитные поля. Но имеется еще один, более прямой опыт, хотя и значительно более трудный. Его проделал Генри Роуланд в 1876 г. в Балтиморе. Он сообщил диску из твердой резины диаметром в 20 см самый большой электрический заряд, какой мог получить. Затем он привел диск во вращение со скоростью около 60 оборотов в секунду. Можно было ожидать, что

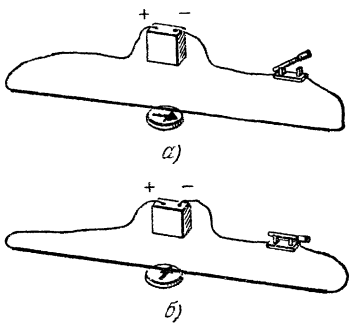


Рис. 30.3. *а*) Над магнитной стрелкой параллельно ей расположен провод. Ключ разомкнут, и по проводу ток не течет. *б*) Когда ток включен, стрелка отклоняется и становится поперек провода.

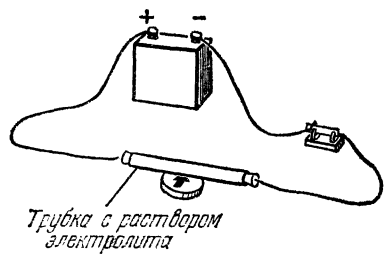


Рис. 30.4. Если заменить часть провода (рис. 30.3) трубкой с раствором электролита, то магнитная стрелка будет продолжать отклоняться на тот же угол, если сила тока остается прежней.

это даст возможность наблюдать прямое магнитное действие движущихся зарядов. Он обнаружил, что вращающийся электрический заряд действительно создает магнитное поле, хотя и слабое.

В гл. 28 мы узнали, что движущиеся положительные заряды имеют такое же электрическое действие, как отрицательные, движущиеся в противоположном направлении. Опыт показывает, что и магнитное действие у них одинаково. Заменим часть цепи, изображенной на рис. 30.3, трубкой с раствором электролита, как показано на рис. 30.4. Если ток во втором случае остался прежним как по величине, так и направлению, то стрелка компаса сохраняет как угол, так и направление своего отклонения. В первой цепи (рис. 30.3) ток обусловлен только движением отрицательных зарядов, между тем как во второй (рис. 30.4) он создается движением как отрицательных, так и положительных зарядов. Таким образом, при описании магнитного действия постоянных токов знак движущихся зарядов не имеет значения.

Магнитные поля характеризуются линиями магнитного поля совершенно так же, как электрические поля характеризуются линиями электрического поля. При достаточно сильном магнитном

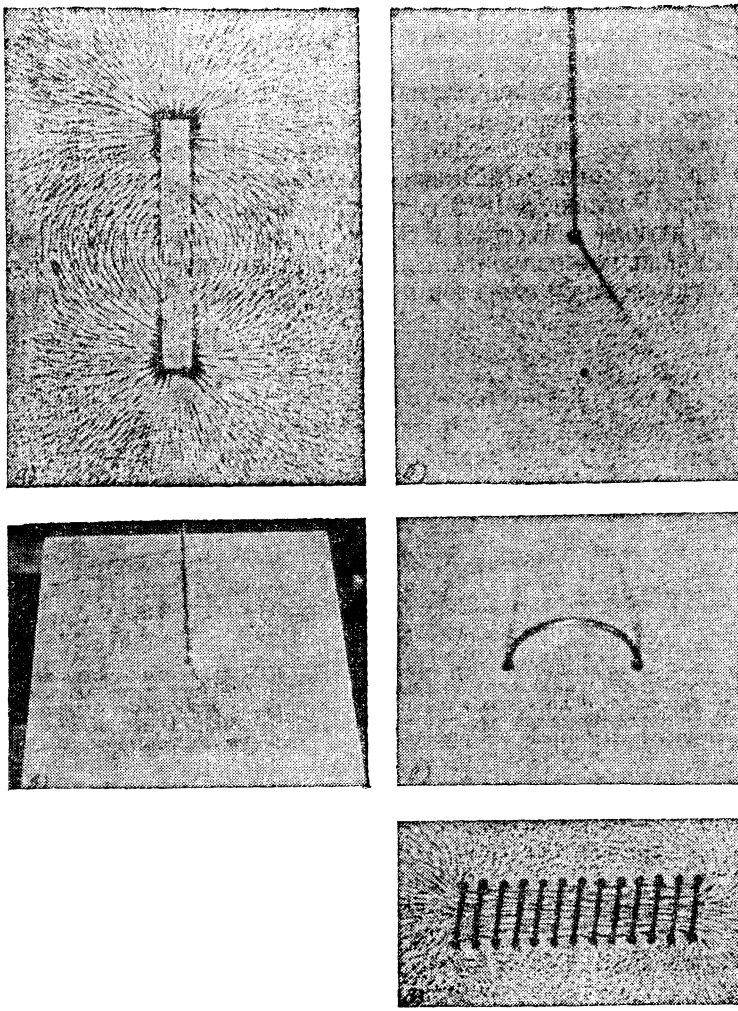


Рис. 30.5. Фотоснимки магнитных спектров, полученных с помощью железных опилок: *а* — полосовой магнит; *б* — ток в длинном прямом проводе; *в* — общий вид установки для получения *б*; *г* — ток в проволочном витке; *д* — ток в соленоиде.

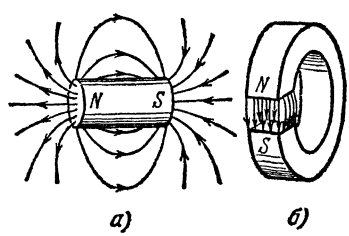


Рис. 30.6. Расположение линий магнитного поля постоянных магнитов: *а* — стержневой магнит; *б* — подковообразный магнит.

поле, если не гнаться за большой точностью, можно «видеть» линии магнитного поля, насыпав некоторое количество мелких железных опилок на лист бумаги. Частицы железа располагаются вдоль линий поля подобно семенам камыша в электрическом поле (см. раздел 27.3). Если опилки прилипают, надо слегка пощелкать по бумаге. Получающиеся «магнитные спектры» изображены на рис. 30.5. Таким методом мы, разумеется, не узнаем направления магнитных линий, а только определяем их форму. Направление магнитного поля можно определять, помещая магнитную стрелку в различные точки поля. Тогда можно зарисовывать линии поля с указанием их направления стрелками. Магнитные поля, создаваемые различными магнитами и токами, показаны на рис. 30.6 и 30.7. Можно сравнить их с рис. 27.8 и 27.10, изображающими различные электрические поля.

Линии электрического поля от покоящихся зарядов начинаются

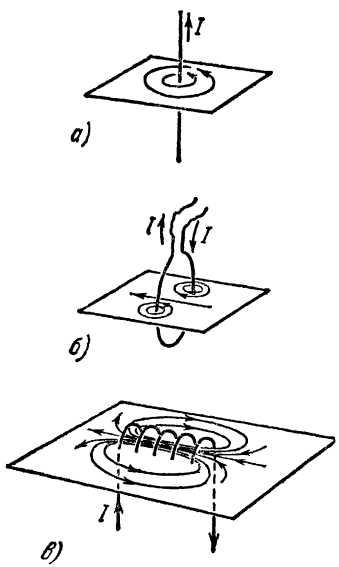


Рис. 30.7. Расположение линий магнитного поля вокруг проводов, по которым течет ток: *а* — длинный прямой провод; *б* — проволочный виток; *в* — соленоид.

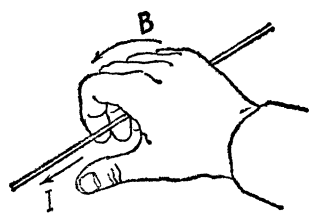


Рис. 30.8. «Правило правой руки». Когда большой палец указывает направление тока в проводе, остальные пальцы, охватывающие провод, показывают направление магнитного поля вокруг провода.

и кончаются на зарядах, создающих поле; но линии магнитных полей, создаваемых токами, не имеют ни начала, ни конца. Они окружают провода, по которым течет ток (рис. 30.7). На рис. 30.6 линии магнитных полей, создаваемых постоянными магнитами, выглядят так, как будто они начинаются и кончаются на поверхностях магнитов, но это только потому, что мы не изобразили линии внутри магнитов, куда мы не в состоянии поместить обычную магнитную стрелку. Применяя в качестве магнитных стрелок нейтроны, мы можем исследовать внутреннюю область постоянного магнита. При этом мы убеждаемся, что линии не прерываются на поверхности.

Вспомним, что направление магнитного поля связано с направлением тока «правилом правой руки». Мысленно расположим правую руку так, чтобы отогнутый большой палец указывал направление

тока; тогда остальные пальцы, согнутые вокруг провода, покажут направление магнитного поля (рис. 30.8). Следует отметить, что это правило годится также для определения направления магнитного поля проволочного витка с током.

30.3. Сложение векторов, характеризующих магнитные поля

Как мы уже видели, свободно вращающаяся магнитная стрелка устанавливается в магнитном поле своим северным концом в определенном направлении, которое мы и принимаем за направение магнитного поля. Кроме того, можно составить ясное представление о способе количественной характеристики магнитного поля: когда магнитная стрелка расположена вблизи большого магнита, требуется большее усилие, чтобы отклонить стрелку от направления поля, чем в случае, когда она находится в слабом поле, как, например, магнитном поле Земли. Если магнитное поле можно характеризовать как направлением, так и величиной, то естественно предположить, что два совместно действующих магнитных поля должны складываться векторно. Проверим это экспериментально *).

Начнем с исследования простого случая — сложения двух полей одинаковой «силы». Чтобы наблюдать результирующее поле, используем магнитную стрелку, посаженную на вертикальную ось. Поскольку магнитное поле Земли присутствует везде, используем его в качестве одного из испытуемых полей. Для получения другого испытуемого поля можно воспользоваться любой подходящей формой проводника, для которой направление магнитного поля известно. Воспользуемся круглым витком, так как поле в его центре достаточно однородно и направлено по оси витка (рис. 30.5, *г*). Чтобы получить в центре круглого витка поле, равное по величине полю Земли, поместим компас в центре витка и, в отсутствие тока, повернем виток так, чтобы его ось совпадала с направлением стрелки. Прибегнув к правилу правой руки, дадим току такое направление, чтобы его магнитное поле было противоположно земному. Увеличивая ток, найдем такое его значение, при котором стрелка одинаково легко принимает любое положение. Сила, вытягивающая стрелку в определенном направлении, исчезла; своим поведением стрелка свидетельствует об отсутствии магнитного поля. Таким образом, магнитное поле Земли как раз уравновешено равнопротивоположным магнитным полем тока, протекающего по витку.

Затем займемся сложением этих двух равных по величине полей, когда они взаимно перпендикулярны. Для этого повернем виток вокруг его вертикального диаметра так, чтобы его ось повернулась на 90°. Если при этом ток нами не изменялся, мы убедимся, что теперь стрелка направлена под углом в 45° к направлению магнитно-

*) Не все, что имеет величину и направление, может быть названо вектором. Поверните книгу на 90° вокруг горизонтальной оси, а затем на 90° вокруг вертикальной. Затем повторите эти повороты в обратном порядке. Конечный результат окажется другим. Повороты не складываются векторно. (Нам известно, что порядок сложения векторов не имеет значения.)

го поля Земли (рис. 30.9). Именно этого и следовало ожидать, если магнитные поля складываются как векторы. Но одной опытной проверки недостаточно. Можно исследовать случаи других углов между направлениями двух полей: 30°, 45°, 60°; магнитная стрелка всегда делит точно пополам угол между направлениями двух одинаковых по силе полей.

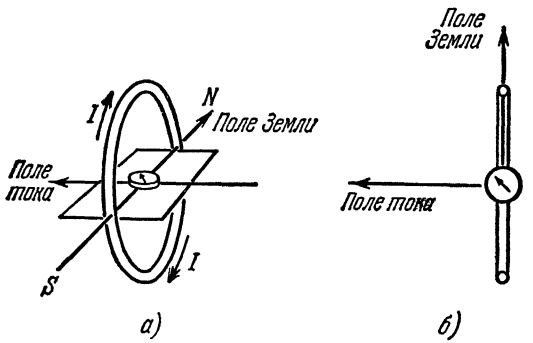


Рис. 30.9. *а*) С магнитным полем Земли складывается поле, равное ему по силе на основании показаний горизонтальной магнитной стрелки и перпендикулярное по направлению. *б*) Горизонтальная магнитная стрелка отклонена на 45° от направления магнитного поля Земли. При любых других углах между направлениями двух одинаковых магнитных полей магнитная стрелка всегда устанавливается по биссектрисе. Магнитные поля ведут себя как векторы.

Таким образом, векторное сложение полей оправдывается, по крайней мере для полей одинаковой «силы». Но как обстоит дело с полями разной «силы»? Здесь мы сталкиваемся с новой задачей, поскольку мы еще не располагаем методом измерения «силы» поля. Однако можно рассуждать следующим образом. Если один виток под током создает поле, в точности равное по «силе» магнитному полю Земли, то два витка, сложенные вплотную, должны дать удвоенное поле Земли, если только поля складываются как векторы. Действительно, один виток с удвоенным током должен дать поле удвоенной «силы». Будем в дальнейшем обозначать величину, характеризующую «силу» магнитного поля, символом B, подразумевая некоторую величину, пропорциональную *) силе тока, и вновь проверим, подчиняется ли эта величина правилу сложения векторов. Вернемся к расположению витков, при котором их магнитное поле перпендикулярно к полю Земли. При первоначальной силе тока стрелки располагаются под углом в 45° к направлению поля Земли; после удвоения силы тока угол возрастает до 63,5°. Это именно то значение,

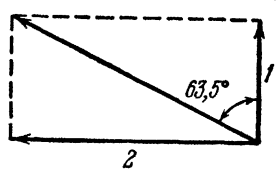


Рис. 30.10. Два взаимно перпендикулярных вектора, абсолютные величины которых относятся как один к двум, дают равнодействующий вектор, отклоненный на 63,5° от меньшего вектора. Если «силу» магнитного поля считать пропорциональной силе создающего его тока, то мы найдем, что магнитные поля складываются точно таким же образом Следовательно, магнитные поля характеризуются векторами.

*) При прочих равных условиях. (*Прим. перев*).

которое получается при сложении взаимно перпендикулярных векторов, один из которых вдвое больше другого (рис. 30.10). Как бы мы ни изменяли силу тока и направление оси витков, мы каждый раз будем убеждаться, что результирующее магнитное поле правильно выражается по правилу сложения векторов, если считать, что «сила» магнитного поля пропорциональна силе вызывающего это поле тока. Теперь величину и направление магнитного поля можно обозначить вектором $\boldsymbol{B}$, называемым индукцией магнитного поля или магнитной индукцией.

30.4. Силы, действующие на токи в магнитных полях. Единица магнитной индукции

Электрические заряды создают электрические поля, которые порождают силы, действующие на другие электрические заряды. Но теперь мы выяснили, что электрические токи создают магнитные поля, и мы можем предположить, что соответственно магнитные поля действуют с определенными силами на электрические токи. Так это и есть в действительности, причем при обычных полях и токах эти силы вполне ощутимы. Именно эти магнитные силы вращают электрические двигатели во всем мире.

Предположим для начала, что мы подвесили в магнитном поле гибкий проводник (рис. 30.11). Магнитное поле может быть полем

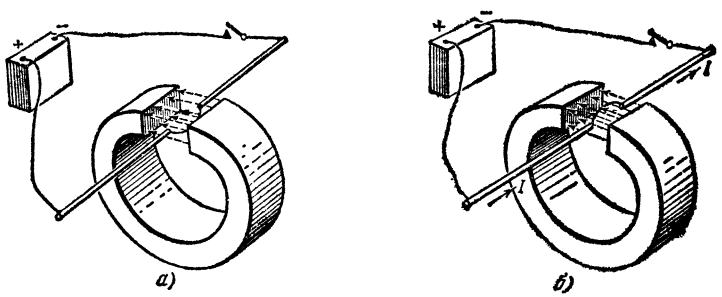


Рис. 30.11. *а*) Гибкий проводник в магнитном поле. Цепь разомкнута, ток не течет, проводник провисает вниз. *б*) Когда течет ток, появляется магнитная сила, действующая на проводник и выталкивающая его вверх.

постоянного магнита или полем тока, который мы можем регулировать. Если мы включим ток в гибкий проводник, то на него будут действовать силы, стремящиеся вытолкнуть его за пределы магнитного поля. Попробуем установить правила, описывающие силу, испытываемую током в магнитном поле. Эту силу можно найти, измеряя силу, необходимую для того, чтобы удержать на месте подвижную часть проводника, когда начинает действовать магнитное поле. Применяя экспериментальное устройство, подобное изображенному на рис. 30.12, мы установим следующее:

1. *Сила перпендикулярна как к магнитному полю, так и к току.* Вот простое правило, позволяющее запомнить взаимное направление силы, магнитного поля и тока. Расположите пальцы *правой*

руки так, чтобы большой палец был перпендикулярен к остальным вытянутым пальцам. Поверните правую ладонь в такое положение, чтобы большой палец указывал направление тока, а остальные пальцы — направление магнитного поля. Тогда сила, действующая на

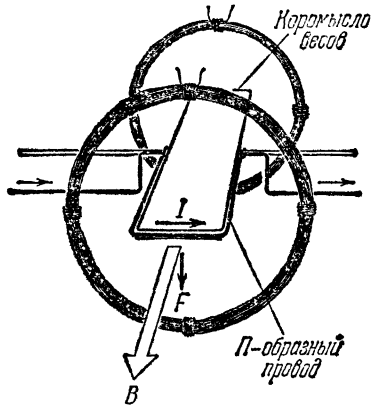


Рис. 30.12. П-образный провод огибает край легкого коромысла весов в центре магнитного поля двух больших плоских катушек. Если катушки разведены на расстояние, равное их радиусу, магнитное поле в центре почти однородно. (Подобные катушки носят название «катушек Гельмгольца»). Прямолинейный отрезок провода на конце коромысла испытывает действие силы F, стремящейся наклонить коромысло. Помещая грузы на другой конец коромысла, можно измерить F. Поворачивая коромысло, нетрудно установить, как влияет на силу F угол между проводом и вектором B. Так как в двух боковых отрезках П-образного провода токи направлены в противоположные стороны, действующие на них в однородном поле силы должны были бы взаимно компенсироваться. Поскольку, однако, поле не вполне однородно, эта компенсация неполна. Тем не менее крутящий момент, создаваемый этими силами, весьма мал по сравнению с моментом силы F.

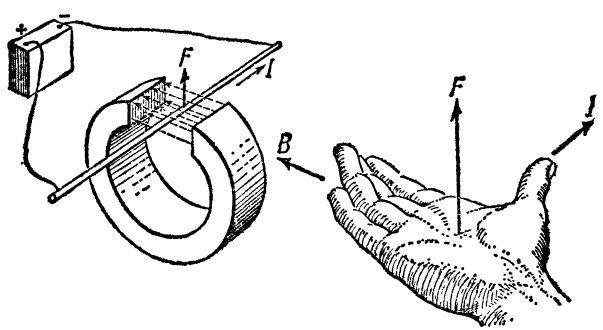


Рис. 30.13. Правило для определения направления магнитной силы, действующей на ток. Вытяните пальцы правой руки в направлении магнитного поля и поверните руку так, чтобы большой палец указывал направление тока. Магнитная сила тогда направлена вверх от ладони.

ток, имеет направление, перпендикулярное к ладони, а именно направление, в котором ладонью можно что-нибудь шлепнуть (рис. 30.13).

2. Изменяя индукцию магнитного поля без изменения его направления, мы обнаруживаем, что сила, действующая на ток, пропорциональна индукции магнитного поля. Изменяя направление поля, мы узнаем, что на силу влияет только та составляющая

индукции $\boldsymbol{B}$, которая перпендикулярна к току. Таким образом, *сила пропорциональна составляющей индукции магнитного поля* $\boldsymbol{B}_\perp$, *перпендикулярной к току* (рис. 30.14).

Чтобы найти, как сила зависит от тока и длины проводника, мы будем рассуждать следующим образом. На два проводника, которые сложены вместе в магнитном поле и по которым в одном и том же направлении текут одинаковые токи, действует двойная сила по сравнению с силой, действующей на каждый отдельный проводник. Но по двум таким проводникам, вместе взятым, течет ток, вдвое превосходящий ток в одном проводнике. Таким образом, удвоение тока удваивает силу: *сила F пропорциональна току I.*

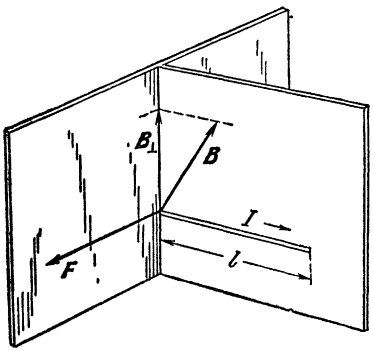


Рис. 30.14. Сила, с которой магнитное поле действует на отрезок провода под током, пропорциональна величине составляющей $\boldsymbol{B}_\perp$ вектора индукции магнитного поля $\boldsymbol{B}$, перпендикулярной к проводу. Вектор этой силы перпендикулярен как к проводу, так и к направлению $\boldsymbol{B}_\perp$. Направление этой силы определяется правилом правой руки.

Далее, на два коротких прямых проводника одинаковой длины, помещенных один за другим так, что они образуют один прямой проводник удвоенный длины, действует сила, равная удвоенной силе, действующей на каждый проводник в отдельности. Следовательно, удвоение длины проводника удваивает силу: *сила F пропорциональна длине проводника l.*

Таким образом, мы теперь знаем направление силы и знаем, что сила пропорциональна $B_\perp$, I и l. Можно представить этот результат в виде уравнения

$$F = \text{const}\, IlB_\perp,$$

где коэффициент пропорциональности зависит только от выбора единиц.

Установим теперь единицу индукции магнитного поля, определив ее через единицы, уже принятые для F, l и I. Мы измеряем F в ньютонах, I — в амперах и l — в метрах и выбираем единицу магнитного поля так, чтобы постоянный коэффициент равнялся 1. Тогда $F=IlB$, и единица B равна 1Н/(1А·1 м). Магнитное поле с индукцией в 1 Н/(1 А·1 м) действует с силой в 1 Н на ток в 1 А, проходящий перпендикулярно к полю по отрезку проводника длиной в 1 м. На практике часто пользуются другой единицей магнитной индукции, носящей название гаусс *) (Гс): 1 Гс$=10^{-4}$ Н/(А·м).

*) Название «гаусс» присвоено этой единице в честь великого математика Карла Фридриха Гаусса, который впервые осуществил абсолютные измерения индукции магнитного поля Земли, воспользовавшись единицей магнитной индукции, не связанной ни с какими «эталонными» магнитами. Один гаусс оказывается также равным индукции магнитного поля, создаваемого в вакууме в центре круглого витка, радиус которого равен 2π см, при силе тока в 10А, протекающего по витку.

30.5. Измерительные приборы и электродвигатели

Чувствительные стрелки приборов, измеряющих слабые токи, и огромные оси, вращающие валки сталепрокатного стана, приводятся в движение силами одного вида: теми силами, с которыми магнитное поле действует на виток или проволочную катушку с током. Сильные токи испытывают большие силы; слабые токи могут испытывать только малые силы. В большинстве таких устройств участвует железо; оно дает инженеру возможность увеличивать магнитные поля от данного источника тока.

Всякому ясно, что применение такого рода силы весьма распространено и что должно быть затрачено очень много усилий и мастерства в изобретении, конструировании и изготовлении

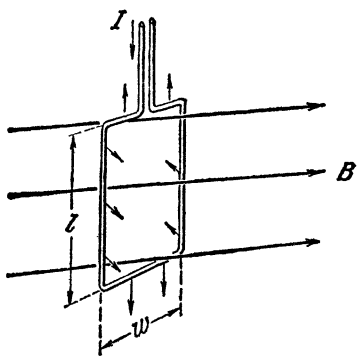


Рис. 30.15. Схема амперметра. Когда через прямоугольный виток проходит ток, магнитные силы IlB и $-IlB$ стремятся повернуть виток. Он поворачивается до тех пор, пока магнитные силы не уравновесятся пружинами. Амперметр обычно изготовляется так, что угол поворота пропорционален силе тока.

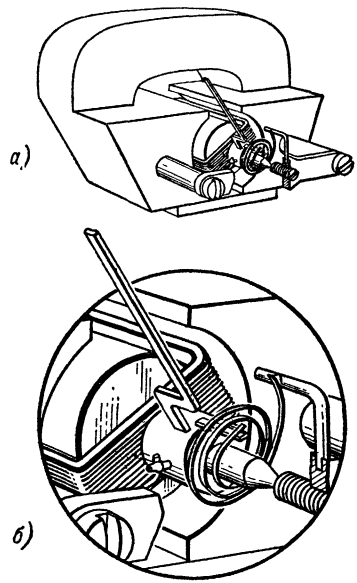


Рис. 30.16. *а*) Амперметр. Когда ток входит в прямоугольную рамку со многими витками по спиральной пружине в передней части оси, катушка поворачивается вокруг закрепленного железного цилиндра. Цилиндр специальной формы и полюсы большого постоянного магнита дают радиальное магнитное поле, почти однородное по величине. *б*) Вращающаяся катушка показана в увеличенном масштабе.

всех устройств, в которых эта сила применяется. Все это — труды инженеров-электриков, которые открывают все новые и новые применения этой силы. Мы не будем пытаться описывать те остроумные и нередко очень сложные пути использования рассматриваемой силы; это не входит в наши задачи; мы приведем лишь краткое описание двух простых приборов, устройство которых связано с магнитными силами.

Амперметры с подвижной катушкой. На рис. 30.15 показаны силы, действующие на виток проволоки в магнитном поле. Проволочный виток имеет форму прямоугольника со сторонами l и w; его

плоскость составляет некоторый угол с индукцией поля $\boldsymbol{B}$. Если по витку течет ток I, то силы, действующие на вертикальные стороны рамки, равны BIl и $-BIl$. Они параллельны, но не уравновешивают друг друга, так как действуют не по одной прямой. Они образуют «пару», которая поворачивает катушку вокруг вертикальной оси. Силы же, направленные вверх и вниз, равны и противоположны. Они растягивают катушку, но не перемещают ее поступательно.

В обыкновенном амперметре для постоянных токов катушка смонтирована на оси, укрепленной на центрах; ее повороту противодействуют упругие силы двух спиральных волосковых пружин (рис. 30.16). Магнитное поле создается постоянным магнитом, поле которого имеет радиальное расположение силовых линий. Для этого служат полюсные наконечники специальной формы и цилиндрический кусок железа, расположенный внутри катушки. Тогда, даже при повороте катушки, поле оказывается перпендикулярным к боковым стенкам ее рамки и направленным так, что магнитные силы вращают ее одинаково интенсивно независимо от угла поворота. С другой стороны, противодействующие силы, обусловленные пружинами, возрастают по мере поворота катушки. В результате катушка поворачивается до тех пор, пока силы действия пружины не уравновесят магнитные силы. Чем сильнее ток, тем больше магнитные силы и тем больше должна повернуться катушка, чтобы достигнуть равновесия. Так как силы действия пружины обычно пропорциональны углу поворота, то этот угол пропорционален силе тока: шкала амперметра линейна. Подобные измерители силы тока изготовляются в широком диапазоне размеров и пределов шкал.

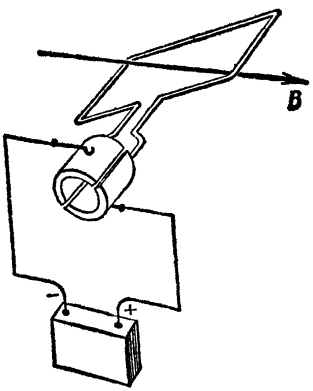


Рис. 30.17. Двигатель постоянного тока подобен амперметру с вращающейся катушкой, но катушка больше; кроме того, имеется переключатель, или коммутатор, для переключения направления тока через каждую половину оборота.

Двигатели постоянного тока. Двигатель представляет собой катушку больших размеров (через которую пропускается ток), расположенную в сильном магнитном поле. Постоянный магнит амперметра постоянного тока заменяется электромагнитом с током от источника, питающего двигатель. Катушка укреплена на оси в магнитном поле. Если бы ток в катушке протекал все время в одном направлении, она перестала бы вращаться, достигнув положения равновесия. Но в двигателе имеется устройство, меняющее направление тока в катушке на обратное через каждые пол-оборота; провернув катушку на пол-оборота, ток меняет направление на обратное и заставляет катушку совершить следующую половину оборота, и. т. д. Один из типов подобного переключателя направления тока, или коммутатора, показан на рис. 30.17.

Настоящие двигатели имеют не одну катушку, а целую группу катушек, расположенных так, чтобы получить более постоянные вращающие силы. Катушки намотаны на железо для усиления магнитного поля.

30.6. Силы, действующие на заряженные частицы, которые движутся в магнитном поле

Как мы уже видели, на проводник, находящийся под током, магнитное поле действует с некоторой механической силой. Так как электрический ток представляет собой движение электрических частиц, то естественно ожидать, что магнитное поле действует непосредственно на отдельные заряженные частицы — на ионы или электроны, движение которых создает ток. Сила, действующая на проводник как целое, есть просто результирующая сила, действующая на частицы.

Мы можем проверить эту идею, выстрелив пучком электронов из электронной пушки сквозь пары ртути или водород при низком давлении. Электроны, вылетающие из щели, заставляют светиться газ, находящийся при низком давлении. Таким образом, путь пучка ясно виден в затемненной комнате (рис. 30.18). Поднесем теперь к трубке магнит, направленный так, чтобы его магнитное поле проходило прямо от нас сквозь трубку. Пучок везде отклоняется под прямым углом к направлению его движения и к магнитному полю.



Рис. 30.18. Опыт, показывающий отклонение движущихся заряженных частиц в магнитном поле. *а*) Электроны, ускоренные пушкой, движутся вертикально вверх, оставляя след светящегося газа. Здесь нет внешнего магнитного поля. *б*) При наличии внешнего магнитного поля путь электронов искривляется в дугу окружности. (Мы применили пару катушек, а не стержневой магнит, чтобы получить однородное поле в пространстве, в котором движутся электроны.)

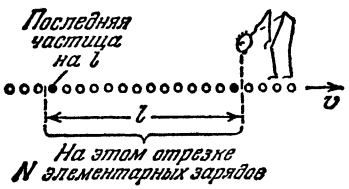
Для определенности предположим, что первоначально электроны двигались вертикально вверх. Так как электроны — отрицательно заряженные частицы, то такой пучок соответствует току, направленному вертикально вниз. Тогда, согласно нашему правилу для направлений, сила, действующая на движущиеся частицы, должна перемещать их вправо. Действительно, проходящий пучок отклоняется вправо. Если перевернуть магнит, пучок отклонится в обратную сторону.

Вычислим теперь силу, действующую на отдельную заряженную частицу, движущуюся с данной скоростью в известном магнитном поле.

Для этого рассмотрим поток элементарных зарядов, следующих на равных расстояниях друг за другом и движущихся с одинаковой скоростью v, создавая ток I (рис. 30.19). Тогда из равенства $F=IlB$ находим силу F_1, действующую на один из этих элементарных зарядов. Если на отрезке длиной l имеется N элементарных зарядов, то

$$F_1 = IlB/N.$$

Таким образом, для того чтобы получить силу F_1, выраженную через скорость зарядов, мы должны выразить силу тока через скорость зарядов и их число N на длине l. Чтобы выразить I через N,



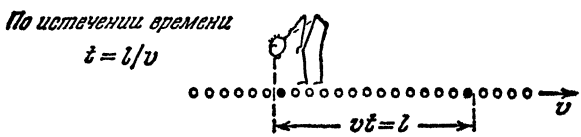


Рис. 30.19. Воображаемый наблюдатель смотрит на поток элементарных зарядов, движущихся со скоростью v. Он насчитывает N пролетающих частиц, когда мимо него проходит отрезок потока l. На это требуется время $t=l/v$.

l и v, представим себе наблюдателя, расположившегося на одном конце отрезка l для подсчета проходящих мимо него элементарных зарядов. Так как каждый заряд движется со скоростью v, все N зарядов, приходящихся на длину l, проносятся мимо наблюдателя за время $t=l/v$.

Но ведь ток I как раз равен полному заряду, проходящему в секунду, т. е. равен $N\cdot 1$ элем. зар./t. Подставляя отношение l/v вместо времени t, получаем выражение для силы тока:

$$I = \frac{N\cdot 1 \text{ элем. зар.}}{t} = \frac{N\cdot 1 \text{ элем. зар.}}{l/v} = \frac{Nv\cdot 1 \text{ элем. зар.}}{l}.$$

После подстановки этого выражения вместо I в наше прежнее выражение для F_1 имеем

$$F_1 = \frac{IlB}{N} = \frac{Nv\cdot 1 \text{ элем. зар.}\, lB}{lN} = vB\cdot 1 \text{ элем. зар.}$$

Как и следовало ожидать, выражение для силы, действующей на элементарный заряд, зависит только от его скорости и от величины составляющей индукции магнитного поля, перпендикулярной к скорости.

Если частица, движущаяся со скоростью v, несет n элементарных зарядов, то действующая на нее сила будет в n раз больше. Иначе говоря, сила, испытываемая частицей, несущей заряд $qn \cdot 1$ элем. зар. и движущейся со скоростью v в магнитном поле, равна

$$F = nF_1 = qvB.$$

Стреляя заряженными частицами сквозь магнитное поле и наблюдая их отклонение магнитной силой, мы можем экспериментально показать, что это выражение для магнитной силы, действующей на движущийся заряд, правильно. Так как магнитная сила всегда перпендикулярна к скорости, то она не может совершать работу по ускорению заряженных частиц, пролетающих сквозь поле. Поэтому они должны двигаться с постоянной скоростью. Следовательно, qvB все время имеет одно значение. Иначе говоря, до тех пор пока поле однородно, магнитная сила является отклоняющей силой постоянной величины. Частицы должны двигаться по окружности (см. рис. 30.18), и мы можем вычислить радиус этой окружности, приравняв магнитную отклоняющую силу центростремительной силе mv^2/r, необходимой для того, чтобы заставить частицу массы m двигаться со скоростью v по окружности радиуса r (рис. 30.20). Из равенства $mv^2/r = qvB$ мы находим, что $r = mv/qB$. Следовательно мы можем проверить наше выражение для магнитной отклоняющей силы, посылая частицы с известным количеством движения и зарядом сквозь данное магнитное поле и измеряя радиус дуги окружности, по которой они движутся.

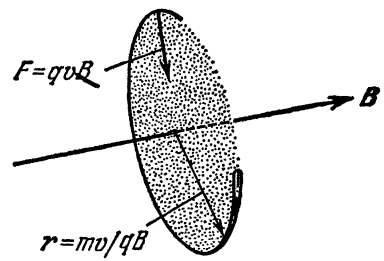


Рис. 30.20. Когда заряженная частица движется через магнитное поле, на нее действует магнитная сила $F=qvB$ под прямым углом к ее траектории. Если поле однородно, то частица движется по окружности радиуса $r=mv/qB$.

Мы уже имеем сведения о протонах, позволяющие провести эту проверку. В разделе 28.1 мы измерили массу протона. Она равна $1{,}7 \cdot 10^{-27}$ кг. Мы также узнали, что когда протоны ускоряются из состояния покоя, проходя разность потенциалов 90 В, то они приобретают скорость $1{,}3 \cdot 10^5$ м/с. Таким путем можно создать протоны с известным количеством движения:

$$mv = (1{,}7 \cdot 10^{-27}\ \text{кг}) \cdot (1{,}3 \cdot 10^5\ \text{м/с}) = 2{,}2 \cdot 10^{-22}\ \text{кг} \cdot \text{м/с}.$$

Будем выстреливать этими протонами перпендикулярно к магнитному полю. Подходящим магнитным полем будет, например, однородное поле с индукцией 10^{-2} Н/(А·м). После перехода к единицам эле-

ментарного заряда эта индукция равна $1{,}6 \cdot 10^{-21}$ Н/[(элем.зар./с)·м]. В таком поле магнитная отклоняющая сила должна заставить протоны двигаться по окружности радиуса

$$r = mv/qB = (2{,}2 \cdot 10^{-22})/(1 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-21}) = 0{,}14 \text{ м}.$$

Этот ожидаемый радиус действительно наблюдается, когда протоны с энергией в 90 эВ пролетают в указанном магнитном поле. Таким образом, опыты показывают, что магнитная отклоняющая сила действительно определяется выражением qvB в согласии с нашим предположением, что сила, действующая в магнитном поле на движущийся заряд, равна силе, действующей на ток, эквивалентный движению этого заряда.

30.7. Измерение масс заряженных частиц

Для измерения масс электронов и протонов в разделе 28.1 мы применяли известную разность потенциалов для ускорения этих частиц до известной кинетической энергии $mv^2/2$. Затем мы определяли скорость v этих частиц в опыте, в котором измерялось время прохождения ими заданного расстояния.

Имеется другой, более старый метод измерения массы частиц. Вместо измерения скорости v частиц мы можем найти их количество движения mv, наблюдая их отклонение в известном магнитном поле. Если известна их кинетическая энергия и количество движения, то легко вычислить их массу. Этим методом в прошлом было проведено большинство точных измерений масс ионов. В частности, этот метод представляет особую ценность для измерения масс электронов, так как их большие скорости делают затруднительными измерения времени их движения на заданном пути.

Измерение количества движения путем отклонения пучка частиц в магнитном поле представляет собой в основном то же измерение, которое мы упоминали в конце предыдущего раздела. Там мы использовали отклонение протонов в качестве экспериментальной проверки выражения для магнитной силы, действующей на движущийся заряд. Здесь мы воспользуемся известной магнитной силой для нахождения неизвестных масс.

Чтобы применить этот метод к измерению масс ионов, мы ускоряем ионы неизвестной массы с помощью известной разности электрических потенциалов V (рис. 30. 21). (Это дает нам их кинетическую энергию $mv^2/2 = qV$.) Затем заставляем ионы влетать в известное магнитное поле перпендикулярно к нему и измеряем радиус дуги окружности, по которой они затем движутся. Необходимой центростремительной силой mv^2/r служит отклоняющая сила магнитного поля $qvB_\perp = qvB$. Таким образом, $mv^2/r = qvB$, откуда имеем $mv = qBr$. Следовательно, измерив радиус окружности, можно вычислить количество движения частицы.

Рассмотрим конкретный пример. Ускоряем однозарядные ионы натрия, пропуская их через разность электрических потенциалов 90 В. Любой однозарядный ион, ускоренный разностью потен-

циалов 90 В, приобретает $1{,}44 \cdot 10^{-17}$ Дж кинетической энергии. С такой кинетической энергией ионы натрия входят в однородное магнитное поле, индукция которого перпендикулярна к направлению их движения и равна 0,100 Н/(А·м). Измеряем радиус дуги, по которой они движутся в магнитном поле, и находим, что он равен

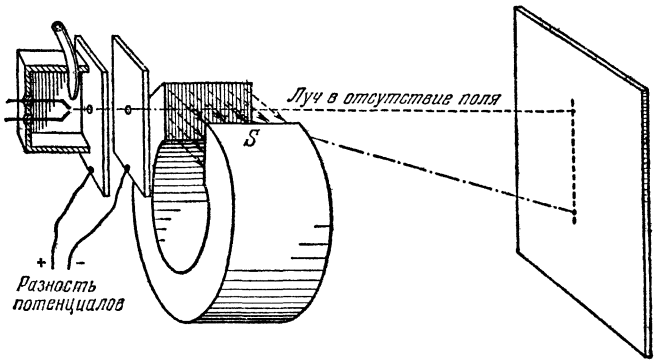


Рис. 30.21. Простейший масс-спектрограф. Ионы ускоряются до известной кинетической энергии электрическим полем между пластинами. В магнитном поле их траектория загибается, принимая форму дуги окружности. Они ударяются об экран или фотопластинку, и по их отклонению можно вычислить радиус дуги.

0,066 м. Так как ионы однозарядны и несут по $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл каждый, получаем

$$qBr = (1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл}) \cdot (0{,}1\ \text{Н/(А·м)}) \cdot (0{,}066\ \text{м}) = 1{,}05 \cdot 10^{-21}\ \text{Н/с}.$$

Это и есть количество движения ионов. Теперь из известной кинетической энергии $mv^2/2$ и количества движения mv можно получить как m, так и v. Скорость определяется легко:

$$v = \frac{2\,(mv^2/2)}{mv} = \frac{2\,(1{,}44 \cdot 10^{-17}\ \text{Дж})}{1{,}05 \cdot 10^{-21}\ \text{Н/с}} = 2{,}74 \cdot 10^4\ \text{м/с}.$$

Наконец, разделив на эту скорость количество движения, получаем массу ионов:

$$m = mv/v = (1{,}05 \cdot 10^{-21})/(2{,}74 \cdot 10^4) = 3{,}84 \cdot 10^{-26}\ \text{кг}.$$

Это и есть масса иона натрия, найденная с точностью до 1%. Масса атома натрия, который получается добавлением одного электрона к иону натрия, должна быть почти такой же. Таким образом, найденное нами значение можно сравнить со значениями, полученными для массы атома натрия в других опытах. Общепринятое значение составляет $3{,}82 \cdot 10^{-26}$ кг.

Прибор, схема которого представлена на рис. 30.21, известен под названием масс-спектрографа, а способ измерения масс с помощью такого прибора называется масс-спектроскопией. Наш масс-спектрограф очень груб. Прибор, служащй для измерений с высокой точностью, обычно содержит вспомогательные приспособления для «фокусировки» частиц в малое пятно и для обеспечения того, чтобы в магнитное поле могли попадать частицы только в очень узком диа-

пазоне скоростей. С помощью хорошего масс-спектрографа массы ионов можно определять с точностью до многих значащих цифр.

С тех пор как Дж. Дж. Томсон ввел масс-спектроскопию, она служит могущественным орудием атомных исследований. В частности, благодаря тому, что масс-спектрографы сортируют ионы по их индивидуальным массам, массы изотопов отдельных элементов были в значительной мере определены масс-спектрографическими измерениями. Хотя некоторые данные о существовании изотопов среди тяжелых радиоактивных элементов были получены еще в первые годы этого столетия, измерения Томсона, доказавшие существование изотопов неона, закрепили это представление и положили начало накоплению систематических данных об изотопах.

К настоящему времени в этой области собрано столько сведений, что для них понадобилась бы огромная таблица. В табл. 30.1 представлена только малая часть известных масс изотопов.

ТАБЛИЦА 30.1

Примеры изотопов некоторых распространенных элементов
Атомная единица массы (а.е.м.) равна $^1/_{12}$ массы атома наиболее распространенного изотопа углерода

Элемент	Масса изотопа, а.е.м.	Относительная распространенность, %	Элемент	Масса изотопа, а.е.м.	Относительная распространенность, %
Водород	1,008	99,98	Магний	23,985	78,70
	2,014	0,02		24,986	10,13
Литий	6,015	7,42		25,983	11,17
	7,016	92,58	Хлор	34,969	75,53
Углерод	12,000	98,89		36,966	24,47
	13,003	1,11	Железо	53,940	5,82
Азот	14,003	99,63		55,935	91,66
	15,000	0,37		56,935	2,19
Кислород	15,995	99,76		57,933	0,33
	16,999	0,04	Серебро	106,905	51,82
	17,999	0,20		108,905	48,18
Неон	19,992	90,92	Свинец	203,973	1,5
	20,994	0,26		205,975	23,6
	21,991	8,82		206,976	22,6
Натрий	22,999	100		207,977	52,3

30.8. Что представляют собой альфа-частицы?

В гл. 32 мы рассмотрим некоторые данные о строении атомов, накопленные Резерфордом и его сотрудниками за первые десятилетия текущего столетия. Основные опыты Резерфорда были проведены с α-частицами. Мы уже знаем, как Резерфорд и Гейгер определили, что α-частицы несут два элементарных заряда (см. раздел 27.9). Опишем теперь два опыта, подобных проделанным Резерфордом и Робинсоном, для определения масс α-частицы. В одном из этих опытов мы определяем количество движения иона, измеряя его откло-

нение в магнитном поле. Так как мы уже описали в последнем разделе опыт такого рода, мы приведем только его результат. Если проделать этот опыт, применяя в качестве источника α-частиц полоний, то оказывается, что количество движения α-частиц равно $mv = 1{,}06 \cdot 10^{-19}$ кг·м/с.

Теперь, чтобы получить массу α-частицы, мы должны измерить скорость. Мы могли бы проделать это измерение, остановив α-частицы с помощью задерживающей разности электрических потенциалов и таким образом определив их кинетическую энергию. Для этого потребовалась бы разность потенциалов около миллиона вольт. Но мы можем получить скорость более прямым путем, наложив на

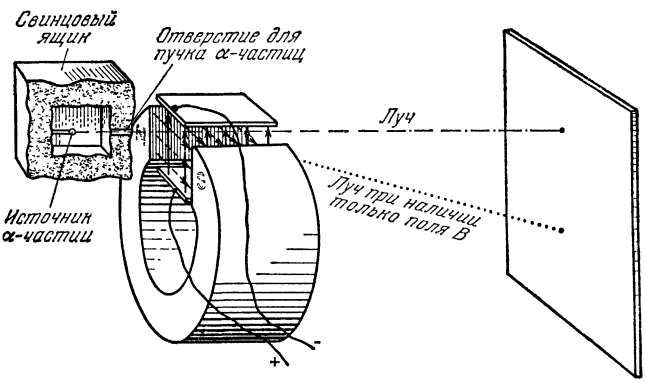


Рис. 30.22. Измерение скорости α-частиц. Имея пару металлических пластин, помещенных в трубке горизонтально, мы можем приложить электрическую силу, равную и противоположную магнитной силе. Тогда частицы не отклоняются, и их скорость равна $v=E/B$. Этот рисунок является схематическим. (В реальном опыте следует изменить размеры, чтобы получить однородные электрическое и магнитное поля известной напряженности. Кроме того, прибор находится в вакууме для устранения рассеяния и потери энергии частицами, сталкивающимися с молекулами воздуха.)

движущиеся частицы одновременно с магнитным полем также электрическое поле. Мы накладываем это электрическое поле так, чтобы электрическая сила, действующая на частицу, была противоположна магнитной силе. Тогда результирующая сила, действующая на движущиеся частицы, равна нулю, и они движутся прямо вперед по тому пути, по которому они следовали бы в отсутствие обоих полей (рис. 30.22). Электрическая сила, действующая на частицу, равна qE, а магнитная сила равна qvB; когда эти силы уравновешиваются, $qBv=qE$. Следовательно, скорость частицы дается соотношением

$$v=E/B,$$

и, поскольку мы знаем как индукцию магнитного поля, так и напряженность электрического поля, мы получаем ответ. Для α-частиц полония измеренная скорость равна $v=1{,}6 \cdot 10^{7}$ м/с. Следовательно, масса равна

$$m=mv/v=(1{,}06 \cdot 10^{-19})/(1{,}6 \cdot 10^{7})=6{,}6 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

В пределах экспериментальной точности эта масса почти точно равна массе атома гелия. Таким образом, естественно заключить, что α-частицы являются двухзарядными ионами гелия. Мы можем проверить этот вывод непосредственно, поместив сильный источник α-частиц в откачанную стеклянную трубку. Такой опыт был проделан в 1908 г. Резерфордом и Ройдсом. Подождав достаточно долгое время, они обнаружили в трубке измеримое количество гелия.

Приведенные здесь сведения об α-частицах будут использованы в гл. 32 при рассмотрении строения атомов.

30.9. Магнитное поле вблизи длинного прямого провода

При рассмотрении электрического поля, обусловленного уединенным зарядом, один из первых вопросов заключался в том, по какому закону ослабевает поле с удалением от заряда. Что же касается магнитного поля постоянного тока, то мы еще не ставили вопроса о зависимости этого поля от расстояния до провода.

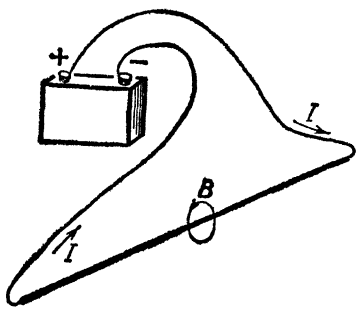


Рис. 30.23. Поле около середины провода (оно показано круглой стрелкой) не испытывает влияния далеких участков провода (см. рис. 30.5, *б* и 30.7, *а*).

В 1820 г. французские физики Био и Савар опубликовали результаты первого количественного исследования магнитного поля тока. Они исследовали поле вблизи длинного прямого провода (рис. 30.23). Вблизи середины провода поле обусловлено почти исключительно ближайшими участками цепи. Остальные участки мало влияют на поле, так как магнитное действие резко ослабевает с расстоянием. (Это можно проверить, перемещая остальные участки провода.) Линии магнитного поля образуют вокруг провода концентрические окружности (см. рис. 30.5, *б* и 30.7, *а*). При этом индукция поля B на расстоянии r от провода, как установили Био и Савар, оказывается обратно пропорциональной расстоянию r. Выше в этой главе мы видели, что B прямо пропорционально току I. Следовательно,

$$B=KI/r.$$

Как обычно, коэффициент пропорциональности K зависит от выбора единиц. В разделе 30.11 мы рассмотрим экспериментальные методы определения этого коэффициента.

30.10. Циркуляция вектора B

Из формулы индукции магнитного поля прямолинейного тока можно вывести важное соотношение общего характера. Если умножить обе части равенства $B=KI/r$ на $2\pi r$, то получим

$$2\pi rB=2\pi KI.$$

Левая часть равенства есть просто индукция магнитного поля, умноженная на длину замкнутого контура, во всех точках которого вектор индукции направлен по касательной. Поскольку же индукция B обратно пропорциональна радиусу окружности, произведение $2\pi rB$ одинаково для всех окружностей, осью которых служит прямолинейный проводник с током I. Это произведение $2\pi rB$ представляет собой частный случай величины, называемой *циркуляцией*

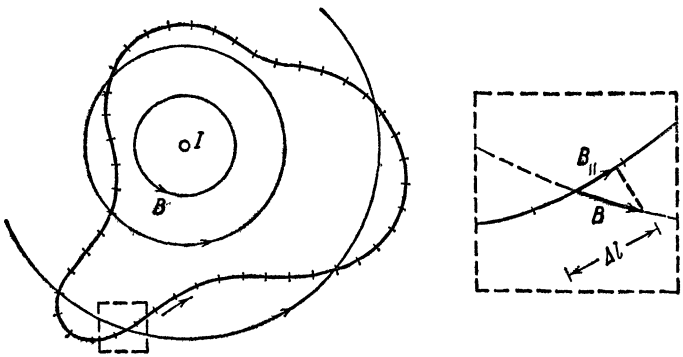


Рис. 30.24. Циркуляция по контуру неправильной формы равна сумме произведений микроскопических отрезков Δl на составляющие $B_{\parallel}$ вектора $\boldsymbol{B}$, касательные к каждому отрезку, причем сумма распространяется на все отрезки всего замкнутого контура.

вектора $\boldsymbol{B}$. В общем случае можно выбрать любую замкнутую кривую — правильную окружность или петлю произвольной формы (рис. 30.24), умножить длину каждого достаточно короткого и потому почти прямолинейного отрезка на касательную составляющую вектора $\boldsymbol{B}$ и, наконец, сложить все эти произведения, взятые для всех этих отрезков. Полученная сумма носит название циркуляции вектора $\boldsymbol{B}$ по замкнутому контуру.

Важность понятия циркуляции связана хотя бы с тем, что для любого контура циркуляция вектора индукции зависит только от суммарного (результирующего) значения силы токов, пронизывающих замкнутый контур. Например, на рис. 30.25 циркуляции по контурам *1* и *2* одинаковы, так как оба контура пронизываются одним и тем же током I. С другой стороны, циркуляция по контуру *3* равна нулю, так как этот контур не пронизывается никаким током, хотя контур и находится в магнитном поле тока I.

Чтобы понять, почему это так, рассмотрим сначала сплошную линию *abcd* на рис. 30.26. Вклад в величину циркуляции вносят только участки *b* и *d*, так как на радиальных участках *a* и *c* вектор $\boldsymbol{B}$ не имеет касательной составляющей. Длина дуги *b* пропорциональна ее радиусу, а B обратно пропорционально радиусу, так что часть циркуляции bB зависит только от угла, стягиваемого дугой *b*. Это справедливо по отношению ко всем дугам любого радиуса, так что, если пройти вокруг тока вдоль всего замкнутого пути *abcd*, полная циркуляция будет $2\pi KI$. С другой стороны, пусть теперь контур про-

ходит по $abcd'$. На пунктирном участке d' касательная составляющая вектора $\boldsymbol{B}$ направлена навстречу обходу, и вклад в циркуляцию на этом участке будет равнопротивоположен вкладу на участке abc; полная циркуляция по контуру $abcd'$ поэтому равна нулю. Таким образом, мы видим, что, даже если контур расположен в магнитном

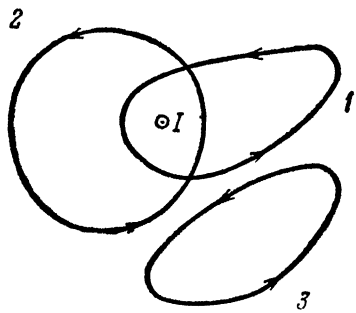


Рис. 30.25. Циркуляция по контуру *1* равна циркуляции по контуру *2*, но циркуляция по контуру *3* равна нулю.

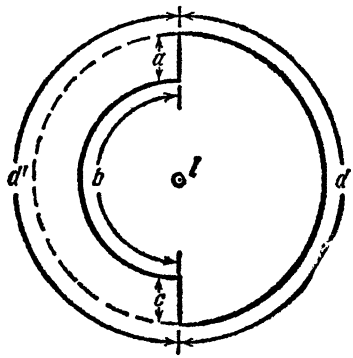


Рис. 30.26. Контуры циркуляции вокруг провода с током, нормального к плоскости чертежа. Ток направлен к читателю, и потому его магнитное поле направлено против часовой стрелки.

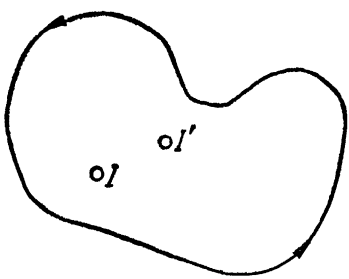


Рис. 30.27. Циркуляция по контуру пропорциональна $I+I'$.

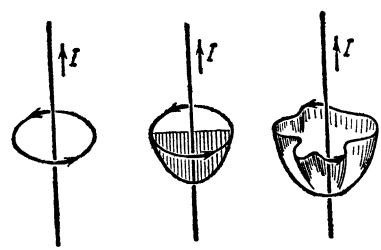


Рис. 30.28. Циркуляция вектора $\boldsymbol{B}$ зависит только от суммарного тока, пронизывающего поверхность, ограниченную контуром. Это распространяется и на неплоские поверхности.

поле, циркуляция по нему равна нулю, если контур не пронизывается током.

Раз положение контура по отношению к пронизывающему его току не имеет значения и циркуляция по этому контуру зависит только от величины пронизывающего его тока, то токи I и I', пронизывающие контур в разных точках, должны создавать циркуляцию, пропорциональную $I+I'$ (рис. 30.27). Циркуляция вектора $\boldsymbol{B}$ зависит только от суммарного тока, пронизывающего поверхность, ограниченную контуром. Эта поверхность не должна быть обязательно плоскостью, и сам контур, следовательно, не обязательно должен быть плоским (рис. 30.28).

Не обязательно также, чтобы ток протекал по длинным тонким проводам. Глубокое исследование магнитных действий постоянных токов, выполненное Ампером (1775—1836), завершилось общей теоремой, связывающей свойства магнитного поля с силами токов. Эта теорема известна под названиями «закон полного тока» или «уравнение циркуляции для магнитного поля».

30.11. Однородные магнитные поля

Чтобы получить постоянное во времени магнитное поле *), достаточно поддерживать постоянство тока, создающего это поле. Но как получить магнитное поле, однородное в достаточно большом объеме? Из гл. 27 следует вспомнить, что для получения однородного по пространству электрического поля можно использовать достаточно сближенные параллельные равнопротивоположно заряженные

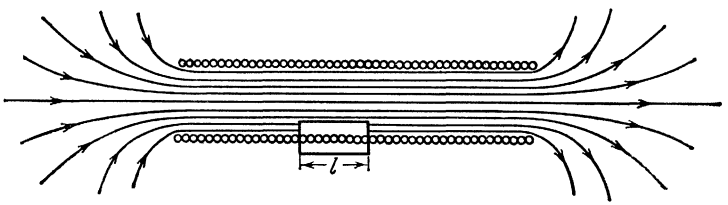


Рис. 30.29. Чтобы вычислить индукцию магнитного поля внутри длинного соленоида, рассматриваем циркуляцию по прямоугольному контуру, одна сторона которого находится внутри, а другая снаружи соленоида.

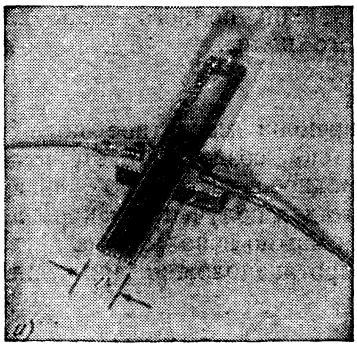
металлические пластины. В такой системе электрическое поле между пластинами однородно, кроме как у их краев.

Будет ли аналогичный метод действителен и для магнитного поля? Будет ли большой по площади лист с постояной плотностью тока создавать однородное магнитное поле подобно тому, как большой лист с равномерно распределенным зарядом создает однородное электрическое поле? Оказывается, будет. Для получения магнитного поля можно даже свернуть плоский лист с током в цилиндрическую трубку и все-таки получить внутри нее однородное магнитное поле. На практике «токовый» лист образуется в виде цилиндрической катушки из длинной тонкой проволоки с плотно соприкасающимися витками. Магнитное поле внутри катушки имеет осевое направление и однородно, за исключением концов катушки (см. рис. 30.5, *д*).

Чтобы вычислить индукцию поля в подобной катушке или, как ее часто называют, «соленоиде», можно воспользоваться теоремой о циркуляции, рассмотренной в предыдущем разделе. В качестве контура представим себе прямоугольник, одна из сторон которого расположена внутри катушки параллельно ее оси, где индукция поля равна $\boldsymbol{B}$. Прямоугольник замкнут снаружи, где поле очень слабо

*) То, что происходит в изменяющемся со временем магнитном поле, будет обсуждаться в следующей главе.

(рис. 30.29). (Обратите внимание на то, что на рис. 30.5, *д* за пределами катушки железные опилки не имеют определенной ориентации, кроме как у концов катушки.) Таким образом, наружная сторона прямоугольника не вносит существенного вклада в величину циркуляции. Итак, почти вся циркуляция получается за счет длины l внутри соленоида. Отсюда следует, что циркуляция по выбранному контуру равна просто Bl.



Пусть наш прямоугольник охватывает n витков. Тогда по закону полного тока циркуляция вектора $\boldsymbol{B}$ по нашему контуру равна $Bl=2\pi KnI$ и индукция внутри соленоида равна $B=2\pi KnI/l$. Иначе

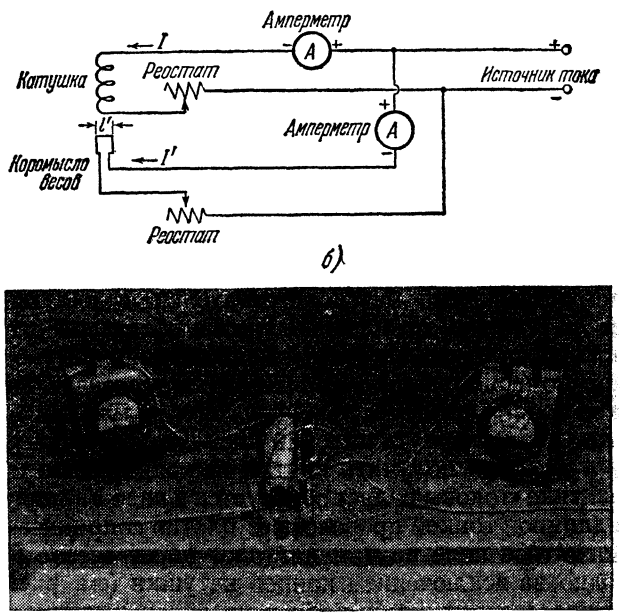


Рис. 30.30. *а*) Одна из разновидностей «токовых весов», пригодная для абсолютных измерений индукции магнитного поля B. *б*) Дальний конец коромысла токовых весов, несущий короткий элемент тока $I'l'$, находится в центре соленоида, где магнитное поле однородно. Ближний конец коромысла нагружается короткими отрезками проволоки известной массы, чтобы уравновесить силу, с которой магнитное поле действует на элемент тока. *в*) Соединение приборов в установке.

говоря, она зависит только от числа витков на единицу длины соленоида n/l и от силы тока I. Она не зависит ни от длины, ни от диаметра катушки при условии, что n/l постоянно и что длина катушки

велика по сравнению с ее диаметром. При смещении прямоугольного контура вправо или влево (но не близко к концам катушки) сила полного тока, охватываемого контуром, не изменяется, поскольку катушка намотана однородно. То же самое справедливо и при смещении контура вперед или назад, вверх или вниз, при условии, что отрезок l остается внутри катушки. В этих случаях по закону полного тока циркуляция по выбранному прямоугольному контуру не изменяется. Как видно из рис. 30.5, *д*, линии магнитного поля внутри катушки везде параллельны ее оси. Таким образом, не только циркуляция, но и индукция поля B постоянна внутри катушки, кроме как у ее концов. Если ввести обозначение $N=n/l$, то выражение для индукции внутри соленоида принимает вид $B=2\pi KNI$, где N — число витков на единицу длины.

Чтобы определить значение постоянной K, входящей в это выражение, достаточно измерить индукцию однородного поля в длинном соленоиде с N витками на единицу длины, по которым течет ток I. Это можно осуществить с помощью «токовых весов», показанных на рис. 30.30, *а*. Конец коромысла этих весов, несущий короткий прямоугольный отрезок провода длиной l', помещается в однородном поле соленоида (рис. 30.30, *б* и *в*). При силе тока I в соленоиде и I' в коромысле на наружный конец коромысла накладываются грузы известной массы до тех пор, пока весы не придут в равновесие при некоторой массе m. Тогда, поскольку $F=I'l'B_{\perp}$, индукция B поля внутри соленоида равна $mg/I'l'$. Приравнивая это выражение для B выражению той же величины по закону полного тока, получаем $mg/I'l'=2\pi KNI$. Это дает для искомого коэффициента

$$K=mg/2\pi NII'l'.$$

При тщательном выполнении этого опыта получается, что K равно $2\cdot10^{-7}$ Н/А^2. Теперь значение этой константы можно подставить в уравнения циркуляции, индукции вокруг длинного прямого провода и индукции внутри соленоида:

$$\text{циркуляция} = (4\pi\cdot10^{-7}\ \text{Н/А}^2)\,I,$$

$$B_{\text{прям. пров}} = (2\cdot10^{-7}\ \text{Н/А}^2)\,I/r, \qquad B_{\text{солен}} = (4\pi\cdot10^{-7}\ \text{Н/А}^2)\,NI.$$

I должно здесь выражаться в амперах, а длина в метрах; тогда B приобретает размерность Н/(А·м), как этого и следовало ожидать. Может вызвать удивление то, что коэффициент пропорциональности K выражается таким простым числом, как $2\cdot10^{-7}$ Н/А^2. Ответ связан с выбором единиц, сделанным в гл. 27, где в качестве единицы силы тока (ампера) был выбран ток в $6{,}25\cdot10^{18}$ элем. зар./с. Это и привело к равенству между выбранной нами единицей силы тока и «абсолютным ампером», который обычно определяется путем приписывания коэффициенту K именно значения $2\cdot10^{-7}$ при выполнении измерений, аналогичных описанным выше.

Оглядываясь на содержание этой и предыдущих глав, читатель убеждается в том, что мы пока имели дело только с электрическими полями, создаваемыми покоящимися зарядами, и с магнитными полями, образуемыми постоянным током.

В следующей главе мы вновь обратимся к опытам, чтобы выяснить, что происходит, когда электрические и магнитные поля изменяются во времени.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

1*. Какого поведения нужно ожидать от железных опилок, насыпанных на плоский лист бумаги, на который плашмя положен прямой длинный провод под током? (Раздел 30.2.)

2*. Имеют ли линии магнитного поля начало и конец? (Раздел 30.2.)

3*. Каково направление магнитного поля, образуемого положительными зарядами, удаляющимися от вас, и отрицательными, приближающимися к вам? (Раздел 30.2.)

4*. Две тождественные катушки с одинаковыми токами имеют общий центр и взаимно перпендикулярные оси. Какой будет их общая индукция поля по сравнению с индукцией одной из них? (Раздел 30.3.)

5*. Как зависит индукция магнитного поля провода от протекающего по нему тока? (Раздел. 30.3.)

6. Горизонтальное однородное магнитное поле $\boldsymbol{B}$ перпендикулярно к горизонтальной составляющей магнитного поля Земли $\boldsymbol{B}_3$ и направлено к востоку.

а) Если $B/B_3=\sqrt{3}$, то в каком направлении установится магнитная стрелка? (Магнитная стрелка вращается в горизонтальной плоскости.)

б) Если магнитная стрелка указывает на северо-восток, то каковы направление и величина $\boldsymbol{B}$?

7. Два круглых проволочных витка одинакового радиуса расположены перпендикулярно друг к другу с общим центром (рис. 30.31). Если $I_1=3$А и $I_2=4$А, каково будет направление магнитного поля в центре O?

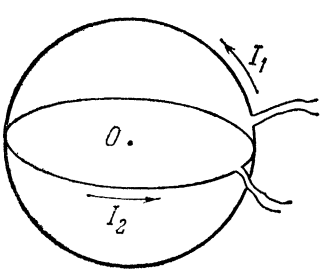


Рис. 30.31. К задаче 7.

8. Пусть два витка закреплены под прямым углом друг к другу и имеется возможность пропускать ток в каждом из них в любом направлении. Если пренебречь магнитным полем Земли, то сколько вариантов магнитного поля можно получить от этой системы, пропуская по 2А через каждый виток?

9*. В каком направлении может двигаться электрический заряд в магнитном поле при отсутствии посторонних внешних сил? (Раздел 30.4.)

10*. По проводу течет ток слева направо в магнитном поле, направленном на вас. Как направлена сила действия магнитного поля на провод? (Раздел 30.4.)

11*. Чему будет равна сила, действующая на проводник длиной 0,2 м, по которому течет ток 3А, если его поместить в однородное магнитное поле с индукцией 5 Н/(А·м) под углом 45° к нему?

12. Магнитное поле внутри длинного соленоида однородно и параллельно оси соленоида (рис. 30.32).

а) Чему равна сила, действующая на проводник с током, находящийся внутри соленоида и параллельный его оси?

б) Чему равна сила, действующая на проводник, по которому течет ток в 1А, если индукция поля B в соленоиде равна $1\cdot10^{-2}$ Н/(А·м), а длина CD равна 2 см?

в) Какую массу m нужно поместить на другой конец коромысла этих весов, чтобы оно не наклонилось?

г) Опишите, как вы могли бы использовать такую установку в качестве амперметра.

13. а) Объясните, почему прямоугольный проволочный виток с током всегда будет стремиться сам устанавливаться в магнитном поле так, чтобы плоскость витка была перпендикулярна к полю.

б) Как действуют магнитные силы на виток в таком положении? Нарисуйте вид сбоку.

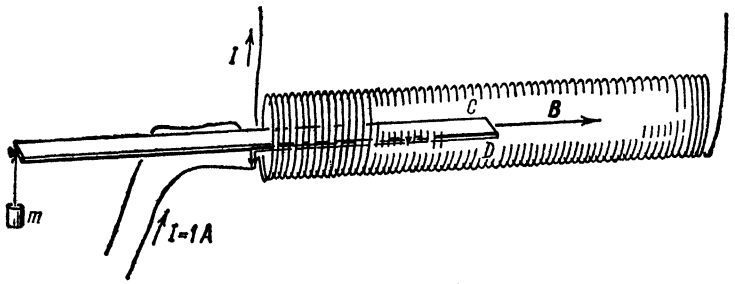


Рис. 30.32. К задаче 12.

14. В амперметре с подвижной катушкой (рис. 30.16) сила действия магнитного поля на катушку уравновешивается закручивающейся пружиной. Можно изготовить амперметр также и по схеме рис. 30.33, используя для измерения этой силы небольшие пружинные весы. Регулируя высоту подвеса, можно добиться одинакового положения проводов в магнитном поле при токах разной силы.

Одна из подобных катушек шириной в 4 см и высотой в 25 см имела 100 витков и весила 2,4 Н. Шкала пружинных весов имела деления от 0 до 5 Н.

а) При показанном на рисунке положении катушки в магнитном поле показание весов изменилось от 2,4 до 2,7 Н при возрастании тока от 0 до 0,5 А. Какова наибольшая сила тока, доступная измерению с помощью данных пружинных весов?

б) Какова индукция магнитного поля в воздушном зазоре магнита?

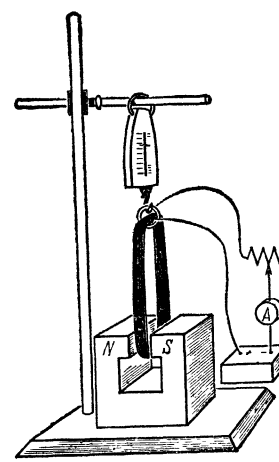


Рис. 30.33. К задаче 14.

15*. Какова зависимость между силой, уравновешивающей действие магнитного поля на подвижную катушку амперметра, и углом отклонения указателя амперметра на его шкале? (Раздел 30.5.)

16*. Каким образом можно изменить направление вращения катушки на рис. 30.17? (Раздел 30.5.)

17*. Что произойдет с радиусом окружности на рис. 30.18,*б*, если повысить ускоряющее напряжение в электронной пушке? (Раздел 30.6.)

18*. От чего зависит сила действия магнитного поля на движущийся электрический заряд? (Раздел 30.6.)

19. Каково соотношение между количествами движения протона и электрона при их движении по окружностям одинакового радиуса перпендикулярно к одному и тому же магнитному полю?

20. Изотопы каких элементов легче разделяются в масс-спектрографе — легких или тяжелых?

21. Пучок протонов с кинетической энергией $E_к$ направляется в область однородного магнитного поля $\boldsymbol{B}$, перпендикулярного к направлению пучка.

а) Найти зависимость радиуса круговой траектории этих частиц и их периода обращения от индукции магнитного поля.

б) Как повлияет на результаты по вопросу п. а) повышение начальной кинетической энергии частиц в четыре раза?

в) Протоны с энергией $4{,}6 \cdot 10^5$ эВ вводятся в протонный синхротрон, в котором индукция магнитного поля равна $2{,}1 \cdot 10^{-2}$ Н/(А·м). Вычислить период обращения и радиус круговой траектории.

22*. Какова кинетическая энергия альфа-частиц, ускоренных разностью потенциалов 180 В? (Раздел 30.7.)

23. Заряженные частицы ускоряются однородным электрическим полем и затем отклоняются магнитным полем. Какие величины должны быть измерены, чтобы вычислить через них массу частиц в этом опыте?

24. При введении газообразного гелия в прибор (рис. 30.21), установленный в камере, из которой газ можно выкачивать для поддержания низкого давления, образуются ионы He^+ и He^{++}. Они дают на экране пятна, расположенные ниже пятна от их пучка, образующегося в отсутствие поля. Поверхность полюса магнита имеет размеры $3 \times 1{,}5$ см. Центр этой поверхности отстоит на 10 см от экрана. Индукция магнитного поля равна $1{,}5 \cdot 10^{-2}$ Н/(А·м).

а) Вычислить радиусы дуг окружностей, по которым эти ионы движутся в магнитном поле.

б) Изобразить схему опыта в масштабе и определить положение каждого пятна на экране.

в) Какова была бы траектория иона He^{++}, если бы он захватил один электрон, находясь еще в электрическом поле? Привести качественное описание.

г) Описать качественно траекторию такого же иона, если он захватывает один электрон, находясь уже в магнитном поле.

25. Параллельно застекленной поверхности стола образуется однородное электрическое поле в результате заряжения двух больших вертикально установленных параллельных металлических пластин. Расстояние между ними 0,5 м, разность потенциалов 20 кВ. На небольшом ползуне из твердой углекислоты, общая масса которого равна 60 г, находится омедненный пинг-понговый шарик, имеющий заряд $2{,}2 \cdot 10^{-8}$ Кл.

а) Чему равна электрическая сила, действующая на шарик в пространстве между пластинами?

б) Какова была бы траектория шарика, если бы он получил короткий толчок в направлении, перпендикулярном к линиям электрического поля?

в) Даже в ограниченной области самое сильное магнитное поле, которое может быть получено без особого труда, составляет 0,5 Н/(А·м). Если толкнуть ползун с тем же шариком перпендикулярно к такому магнитному полю, сообщив ему скорость 1 м/с, то чему будет равна сила действия магнитного поля на шарик?

26. Пучок однозарядных ионов попадает в область пространства, где имеется однородное электрическое поле $E = 10^3$ Н/Кл и однородное магнитное поле с индукцией $B = 2 \cdot 10^{-2}$ Н/(А·м). Электрическое и магнитное поля направлены под прямым углом друг к другу и оба перпендикулярны к пучку, причем электрическая и магнитная силы действуют на ион в противоположных направлениях. Чему равна скорость этих ионов, если они проходят эти скрещенные электрическое и магнитное поля без отклонения?

27. Неотклоненные ионы задачи 26 проходят через щель и попадают в область, где имеется однородное магнитное поле с индукцией $B = 0{,}09$ Н/(А·м), перпендикулярное к направлению их движения. Если ионы представляют собой смесь ионов неона с массами, равными 20 и 22 атомным единицам массы, то на каком расстоянии друг от друга эти ионы окажутся на фотопластинке, пройдя половину окружности?

28*. Провод с током I пронизывает квадратный замкнутый контур со стороной 2 см. Чему равна циркуляция вектора магнитной индукции по этому контуру? Выразить ответ через K. (Раздел 30.10.)

29*. Чему равна циркуляция по замкнутому контуру, изображенному на рис. 30.34? (Раздел 30.10.)

30*. Каково поле в центре длинного соленоида, имеющего 10 витков/см и несущего ток 5А? (Раздел 30.11.)

31. Два очень длинных прямолинейных параллельных проводника, один с током в 10А, другой с током в 20А, находятся на расстоянии 10 см друг от друга (рис. 30.35). Найдите величину и направление B в точках P, Q и R, указанных на рисунке.

32. Длинный прямолинейный проводник с током $I=100$ А перпендикулярен к однородному магнитному полю с индукцией $B=10^{-3}$ Н/(А·м) (рис. 30.36).

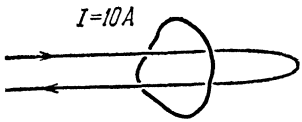


Рис. 30.34. К задаче 29*.

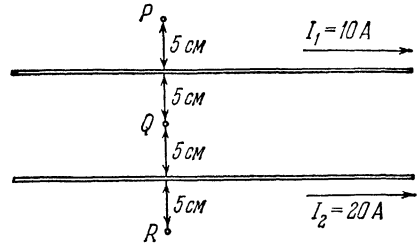


Рис. 30.35. К задаче 31.

Чему равны величина и направление индукции результирующего поля в точках P, Q, R, S на окружности радиуса 1 см, охватывающей проводник?

33. Имеем пучок электронов, движущихся со скоростью $v=3\cdot10^6$ м/с и образующих ток 1 мкА.

а) Сколько электронов проходит в секунду мимо заданной точки?

б) Сколько электронов насчитывается на протяжении 1 метра вдоль луча?

в) Какую магнитную индукцию создает пучок на расстоянии 1м от своей оси?

г) Какую суммарную силу испытывают все электроны, находящиеся в пучке длиной 1 м, если пучок проходит сквозь магнитное поле 0,1 Н/А·м?

д) Какую силу испытывает один электрон в вопросе п. г), если предположить, что все они испытывают одинаковую силу?

34. Точка A отстоит на 2 см от каждого из трех токов (I_1, I_2 и I_3), как показано на рис. 30.37. Все три тока протекают по длинным прямым проводам, нормальным к плоскости чертежа.

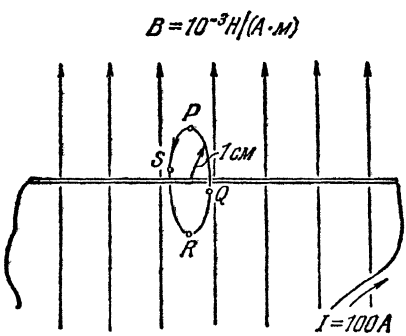


Рис. 30.36. К задаче 32.

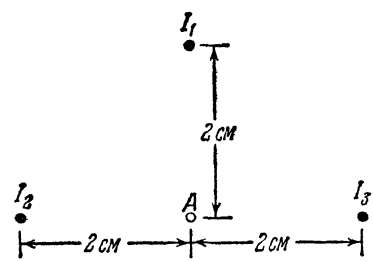


Рис. 30.37. К задаче 34.

а) Если $I_1=I_2=I_3=10$А и все три тока направлены из плоскости чертежа на читателя, каковы величина и направление магнитной индукции в точке A, обусловленной совместным действием трех токов?

б) Если $I_1=I_2=I_3=10$А, но ток I_2 направлен в глубь чертежа от читателя, а токи I_1 и I_3 на читателя, каковы величина и направление магнитной индукции в точке A, обусловленной совместным действием всех трех токов?

ГЛАВА

31 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

31.1. Наведенный или индукционный ток

После открытия Эрстеда, обнаружившего, что электрический ток сопровождается появлением магнитного поля, некоторые исследователи стали искать «обратный» эффект: Не может ли магнит создать ток?

Допустим, что для решения этого вопроса вы решили бы поставить опыты. Что бы вы сделали? Вы могли бы обмотать магнит проводом, соединить этот провод с измерителем тока, замкнуть цепь и ждать, что получится. Убедившись, что прибор продолжает давать нулевое показание, вы могли бы попытаться обнаружить эффект с магнитом больших размеров. Разочаровавшись, вы использовали бы более чувствительный измерительный прибор или же, вместо постоянного магнита, попробовали бы получить магнитное поле пропусканием тока через обмотку. Вы вставили бы в катушку стержень из мягкого железа, собрав таким образом электромагнит с более сильным магнитным полем. Проделав все это, вы пошли бы по следам великого экспериментатора — Михаила Фарадея. Но, подобно Фарадею, вы не обнаружили бы никакого движения стрелки прибора.

Затем вы могли бы начать искать ключ к ответу в тех сведениях, которыми вы уже располагаете о движении заряженных частиц в магнитном поле. Из гл. 30 вы помните, что сила, с которой магнитное поле действует на электрический заряд, пропорциональна скорости частицы. Таким образом, неподвижный заряд не испытывает силы, каким бы сильным ни было магнитное поле. Вы могли бы сразу заключить: «Для того чтобы получить ток в проводе под действием магнитного поля, нужно привести провод в движение!»

На рис. 31.1 показано перемещение короткого прямого провода в магнитном поле влево. Правило правой руки предсказывает направление движения отрицательных зарядов в проводе. Сила направлена в сторону Q. Положительные заряды отталкивались бы к ближнему концу провода, а отрицательные к дальнему. Нельзя, конечно, ожидать полного разделения зарядов, так как этому препятствуют электрические силы. Положительные заряды, расположенные около P, притягивают отрицательные, расположенные вблизи Q, и отталкивают положительные, не дошедшие до ближнего конца провода. То же самое происходит во всяком незамкну-

том контуре, соединенном с батареей: заряды накапливаются на концах провода. На рис. 29.2 эти заряды дают о себе знать на электрометре.

Рис. 31.2 изображает движение контура, замкнутого за пределами магнитного поля. В контур включен амперметр A для обнаружения возможного тока I. Здесь заряд может циркулировать по контуру. Покажет ли амперметр наличие тока?

Если бы вы захотели проверить это на опыте в лаборатории, вы с большой уверенностью ожидали бы положительного результата. На этот раз ваша надежда основана на предварительной осведомленности, а не на простой догадке. Если бы вы все же не увидели

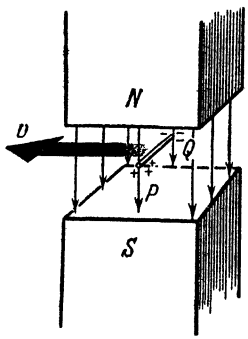


Рис. 31.1. При движении провода влево в магнитном поле магнита заряды в проводе отталкиваются к его концам.

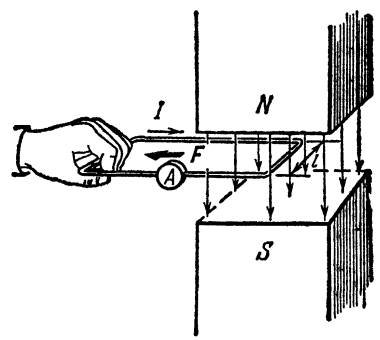


Рис. 31.2. Если тянуть замкнутый контур внешней силой F поперек магнитного поля, в контуре появляется ток. Важно отметить, что часть контура находится в области очень слабого поля, будучи удалена от магнита.

отклонения стрелки, вы бы стали подбирать или более сильный магнит, или более чувствительный прибор, или ускорили бы движение контура.

В конце концов вы-таки обнаружили бы ток! Мы говорим, что движение проволочного витка в магнитном поле «навело» или «индуцировало» ток в контуре витка.

Вас теперь вряд ли удивит тот факт, что удвоение скорости движения контура удваивает ток, а изменение направления движения на обратное без изменения величины скорости изменяет и направление тока без изменения его силы; вас также не удивит, что переворачивание магнита на 180° вокруг горизонтальной оси также изменяет направление наведенного тока.

31.2. Относительность движения

Но допустим, что виток и магнит движутся совместно с одинаковой скоростью (рис. 31. 3). Следует ли в этом случае ожидать наведения тока в витке? Обдумывая этот вопрос, вспомним, что в гл. 30 нигде ничего не говорилось о движущихся магнитах. Можно было

бы высказать здесь смелую догадку, но на данном этапе это была бы только догадка, требующая экспериментальной проверки. Опыт показал бы, что наведенный ток не появляется.

Что отсюда следует? Можно, разумеется, предположить, что для появления наведенного тока нужно держать магнит на месте. Или же может появиться соблазн воспроизвести опыт, показанный на рис. 31.4: держать виток на месте и двигать магнит. Если это проделать, можно убедиться что движение магнита вправо при неподвижном проволочном витке наводит в нем такой же ток, как движение витка влево при неподвижном магните, как это было в опыте, изображенном на рис. 31.2. По всем признакам эффективно лишь *относительное* движение.

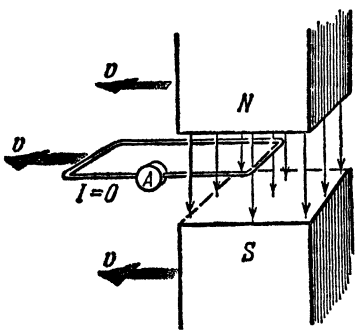


Рис. 31.3. При совместном движении магнита и витка ток не наводится.

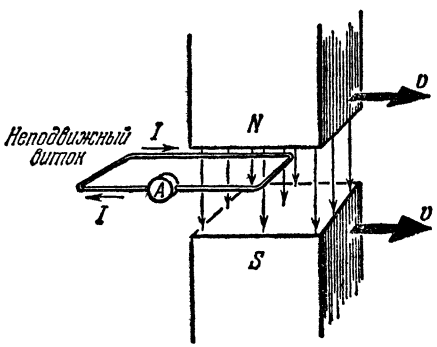


Рис. 31.4. При движении магнита вправо со скоростью v при неподвижном проволочном витке наведенный ток оказывается таким же, как при движении витка влево со скоростью v при неподвижном магните. По всем признакам имеет значение только относительное движение.

Эта мысль должна быть знакома по разделу механики. Вам, вероятно, приходилось, сидя в машине, остановившейся перед красным светофором, ощущать, будто ваша машина дала задний ход, тогда как иллюзия обусловлена лишь тем, что грузовик в соседнем ряду поехал вперед. Если бы ваша машина не имела окон, можно ли было бы придумать опыт, позволяющий установить, движется ли ваша машина вперед или назад, или стоит на месте? Законы механики отвечают,что никакие опыты в области динамики не позволили бы отличить полного покоя от равномерного прямолинейного движения.

По-видимому, законы электричества и магнетизма обнаруживают такое же безразличие к абсолютным понятиям. Они не отвечают на вопрос «кто движется». Они такие же в одной системе отсчета, как и в любой другой, движущейся равномерно и прямолинейно относительно первой. Этот отказ физических законов отдавать предпочтение одной системе отсчета перед другой превратился в руках Альберта Эйнштейна в краеугольный камень специальной теории относительности.

31.3. Переменный магнитный поток

В предыдущем разделе встречалось выражение «движение магнита». Можно ли говорить о движении магнитного поля в отрыве от магнита, фигурирующего в качестве источника поля? Рассмотрим еще несколько опытов с индукционными токами с целью найти какие-либо указания по этому вопросу. Положим, что повторяется опыт с движением рамки в магнитном поле, но с такой маленькой рамкой, что вся она при своем движении остается в области однородного поля (рис. 31.5). Только когда часть рамки приближается к краям полюсов магнита, где поле слабее, можно заметить движение указателя прибора. Не подводит ли это нас к ответу на поставленный вопрос? Не означает ли это, что магнитное поле должно *изменяться* в какой-либо части электрической цепи?

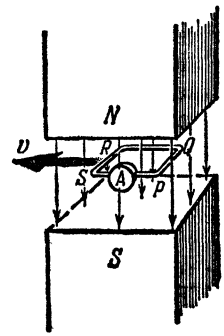


Рис. 31.5. Пока вся рамка находится в однородном магнитном поле, ее движение не наводит тока.

Это предположение можно проверить без того, чтобы приводить в движение электрический контур или магнит.

Используя электромагнит (рис. 31.6), можно изменять магнитное поле путем изменения тока в обмотках. При замыкании цепи ключом для включения тока в обмотках электромагнита в цепи рамки можно наблюдать появление кратковременного наведенного тока. При размыкании же ключа в цепи обмоток электромагнита в рамке вновь появляется индукционный ток, но уже обратного направления*). Этот результат

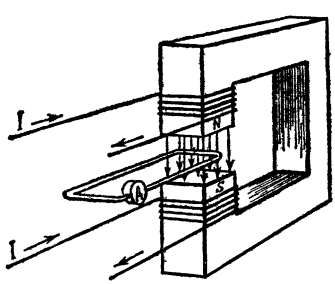


Рис. 31.6. В неподвижной рамке можно индуцировать ток путем изменения магнитного поля электромагнита.

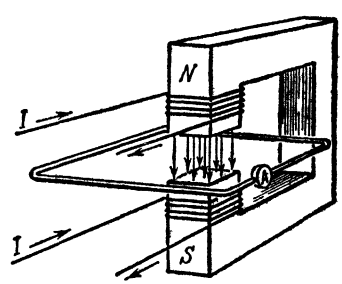


Рис. 31.7. В неподвижной рамке ток можно навести путем изменения магнитного поля, даже если рамка настолько широка, что вся она находится в области очень слабого поля.

позволяет считать, что предположение о связи индукционных токов с изменением магнитного поля наводит нас на правильный путь.

Несколько видоизмененная установка изображена на рис. 31.7. Здесь использована настолько широкая рамка, что ни один из ее

*) Исторически, именно подобный опыт привел Михаила Фарадея в 1831 г. в Англии к открытию индукционных токов. Независимо от Фарадея, этот опыт был проделан преподавателем школы Иосифом Генри в Олбани (штат Нью-Йорк).

отрезков не расположен между полюсами электромагнита. Весь провод находится в области, где магнитное поле практически отсутствует. Однако, когда замыкается ключ, стрелка амперметра делает скачок. Таким образом, наведение тока по всем признакам действительно зависит от изменения магнитного поля, но не требует, чтобы сам провод находился в области сильного поля. Что, по-видимому, действительно важно — это, чтобы происходило изменение «количества» магнитного поля, пронизывающего замкнутый контур проводов.

Каким образом описать «количество» магнитного поля, пронизывающего замкнутый контур, чтобы это описание было применимо ко всем обсуждаемым нами процессам (от рис. 31.2 вплоть до рис. 31.7)? Конечно, индукция магнитного поля B служит важной мерой величины магнитного поля, но описывает лишь «силу» магнитного поля в данной точке. Поле же распространяется на некоторую площадь, и нужно характеризовать все магнитное поле, пронизывающее площадь, ограниченную контуром. Ниже дается определение новой величины—*магнитного потока* Φ_B,— служащей для характеристики полного магнитного поля, проходящего через данную площадку. В случае однородного поля магнитный поток в точности равен произведению магнитной индукции на площадь, ограниченную контуром, при условии, что площадка перпендикулярна к полю (рис. 31.8, *а*). Если площадка наклонена, так что линии магнитного поля пронизывают ее под косым углом, то через площадку пройдет меньше линий (рис. 31.8, *б*). Например, площадку, параллельную линиям поля, эти линии не пронизывают вовсе. Поле проносится через площадку лишь составляющей индукции, перпендикулярной к этой площадке. Следовательно, магнитный поток, пронизывающий площадку A, определяется формулой

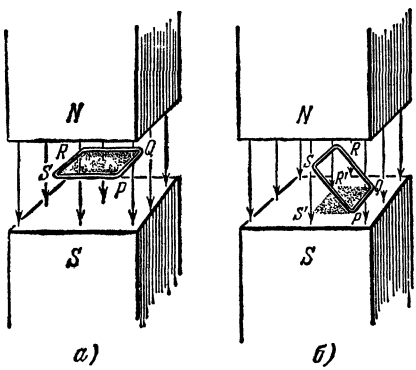


Рис. 31.8. *а*) Магнитный поток Φ_B сквозь контур $PQRS$ равен произведению магнитной индукции B на площадь A контура: $\Phi_B=BA$. *б*) Если контур $PQRS$ наклонен к линиям магнитного поля, он охватывает меньший магнитный поток. Эффективная площадь равна заштрихованной площади $PQR'S'$.

$$\Phi_B=B_\perp A.$$

Общий случай, когда B неоднородно на площади A, рассматривается ниже в тексте, набранном мелким шрифтом.

Вооружившись новым понятием магнитного потока, мы можем выдвинуть новое утверждение: для протекания в замкнутом контуре индукционного тока необходимо, чтобы магнитный поток, пронизывающий контур, изменялся.

Проверим, как это утверждение оправдывается в каждом случае.

На рис. 31.2 часть рамки находится за пределами поля. По мере движения рамки влево, эффективная площадь рамки, расположенная в магнитном поле, уменьшается, так что рамка пронизывается все меньшим и меньшим магнитным потоком. При этом наводится ток.

Анализ случая, изображенного на рис. 31.4, тот же, что и для рис. 31.2. Неважно, что именно движется; ток наводится изменением магнитного потока сквозь рамку.

На рис. 31.3 относительное движение отсутствует; поток, пронизывающий контур, не изменяется; ток не наводится.

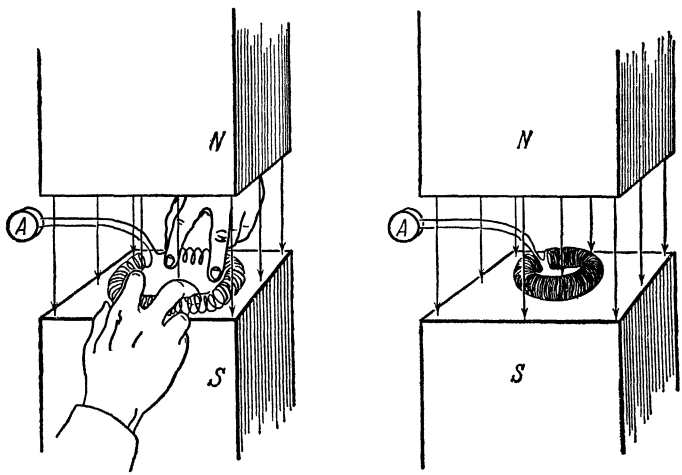


Рис. 31.9. Ток индуцируется изменением площади контура. Здесь растянутую пружину отпускают и она сжимается до меньшей площади.

На рис. 31.6 эффективная площадь рамки остается постоянной (так как нет движения). Поток, пронизывающий рамку, изменяется при изменении индукции поля; ток наводится.

То же самое относится к рис. 31.7, хотя здесь плотность потока велика (индукция велика) только вблизи середины рамки на значительном расстоянии от провода. Если эту рамку поместить так, что часть провода окажется в сильной части поля, то рамка будет охватывать меньший поток, так что данное изменение тока вызовет меньшее изменении потока и наведет более слабый ток. Чтобы понять, что в смещенном положении рамка охватывает меньший поток, полезно представить себе электромагнит, создающий определенный полный поток при определенном токе в его обмотке. Тогда при смещенной вбок рамке часть потока, раннее пронизывавшего ее, проходит за ее пределами. Действительно, если сдвинуть рамку вбок на половину ширины, так что одна из ее сторон будет проходить как раз посередине торца полюса, рамка будет охватывать лишь

половину прежнего потока. (Между прочим, если во время смещения рамки ток в обмотке электромагнита будет оставаться включенным, можно будет заметить скачок стрелки амперметра при смещении рамки.)

Рассмотрим теперь некоторые новые случаи.

На рис. 31.9 поле однородно по всей площади, охватываемой пружиной. Когда пружину отпускают, она сжимается, пронизывающий ее поток уменьшается и таким образом наводится ток.

На рис. 31.10, *а* рамка, как и на рис. 31.5, находится в однородном магнитном поле, но магнитный поток в рамке изменяется путем вращения вокруг горизонтальной оси. Эффективной площадью *A*

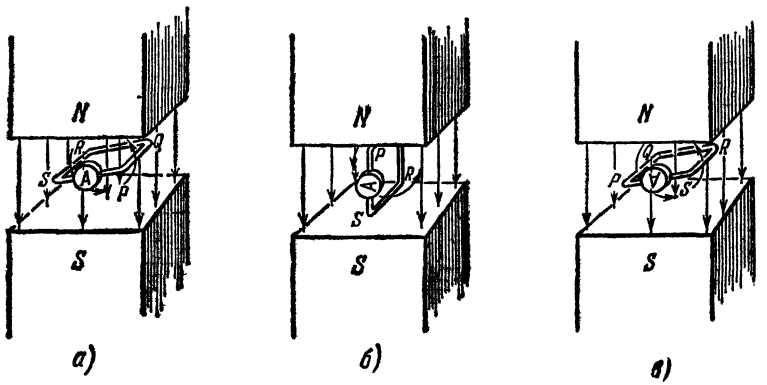


Рис. 31.10. *а*) Ток наводится путем изменения ориентации рамки относительно магнитного поля. При вращении рамки изменяется площадь ее проекции на горизонтальную плоскость. *б*) Здесь поток сквозь рамку равен нулю. При дальнейшем вращении площадь горизонтальной проекции рамки начнет возрастать. Однако, с точки зрения наблюдателя, сидящего верхом на рамке, направление магнитного поля изменится на обратное. Поэтому поток будет продолжать уменьшаться и наведенный ток сохранит свое направление. *в*) Положение здесь такое же, как на рис. *а*), с той, однако, разницей, что поток относительно рамки имеет обратное направление. С точки зрения внешнего наблюдателя ток имеет такое же направление, как и на рис. *а*), но амперметр покажет ток обратного направления.

(см. рис. 31.8, *б*) является здесь проекция площади рамки на горизонтальную плоскость. При отходе рамки от горизонтального положения охватываемый ею поток уменьшается, и ток наводится в указанном на рисунке направлении. При повороте от горизонтального положения на 90° поток сквозь рамку падает до нуля (рис. 31.10, *б*). При дальнейшем вращении поток начинает возрастать. С точки зрения наблюдателя, связанного с магнитом, или читателя, поток остается направленным вниз, но с точки зрения наблюдателя, сидящего верхом на рамке, поток изменил свое направление. Однако, когда рамка повернется на 180°, плоскость вновь становится горизонтальной и поток вновь достигает максимума, так что скорость изменения потока проходит через нуль. Дальнейшее вращение (рис. 31.10, *в*) уменьшает поток, порождая индуктивный ток обратного направления. То, что здесь описано, представляет собой в сущности простейший генератор переменного тока. Гигантские генера-

торы, снабжающие электроэнергией целые города, работают на том же принципе.

Заслуга выдвижения единой интерпретации перечисленных выше весьма разнообразных процессов — интерпретации с точки зрения понятия магнитного потока, принадлежит Михаилу Фарадею. Он был не только остроумным экспериментатором и изобретателем приборов и установок, но, кроме того, обладал творческим воображением, позволявшим ему открывать общие принципы, объясняющие результаты разнообразных опытов.

Магнитный поток. Определение магнитного потока сквозь замкнутый контур в виде формулы $\Phi_B = B_\perp A$ не является полным, когда поле вектора $\boldsymbol{B}$ неоднородно на площади контура. В случае неоднородности поля имело бы смысл пользоваться некоторым подходящим значением величины $B_\perp$, усредненным по площади контура. Чтобы найти это усредненное значение, разобьем рассматриваемую площадку на сеть мельчайших ячеек площадью ΔA, настолько малых, что внутри каждой из них величина $B_\perp$ может считаться постоянной (рис. 31.11). Полный поток тогда в точности равен сумме потоков сквозь все эти мельчайшие ячейки, образующие всю площадь:

$$\Phi_B = \text{сумма}\,(B_\perp \Delta A).$$

Можно показать, что эта сумма не зависит от способа разбиения площади A на ячейки, пока ячейки ΔA достаточно малы*).

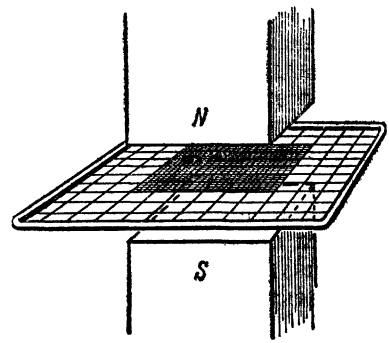


Рис. 31.11. Если магнитное поле неоднородно по площади контура, делим эту площадь на мелкие ячейки. Каждая из них настолько мала, что в ее пределах поле может считаться однородным, и для ячейки можно воспользоваться прежним определением магнитного потока. Поток сквозь весь контур определится как сумма потоков сквозь все отдельные ячейки. Индукция поля велика в области между полюсами и быстро падает за пределами этой области. Поэтому наибольший вклад в полный поток вносит область между полюсами (покрытая мелкой штриховкой).

31.4. ЭДС индукции

Пытаясь придать количественный характер связи между наведенным током и изменением магнитного потока, мы убеждаемся, что здесь замешаны и другие переменные. Выбирая провода различных размеров и из различных металлов, мы получаем разные токи. Разрыв провода прекращает ток. Поведение тока совершенно такое же, как если бы в цепи, вместо изменения магнитного потока, пронизывающего цепь, действовала батарея. При разрыве цепи, питаемой батареей, стрелка амперметра стоит на нуле, но электрометр показывает разность потенциалов между разъединенными концами проводов, равную ЭДС батареи. Это наводит на мысль попытаться проанализировать процесс, изображенный на рис. 31.2, с целью выяснить, соответствует ли заданное движение определенному току

*) Обещание найти эффективное среднее значение $B_\perp$, сделанное авторами текста, не выполнено. Текст, набранный мелким шрифтом, не доведен до логического конца. Из формул $\Phi_B = (B_\perp)_{\text{средн}} A$ и $\Phi_B = \text{сумма}\,(B_\perp \Delta A)$ следует, что $(B_\perp)_{\text{средн}} = [\text{сумма}\,(B_\perp \Delta A)]/A$. *(Прим. перев.)*

или определенной ЭДС. Попытаемся связать эту ЭДС со скоростью изменения магнитного потока. В дальнейшем мы убедимся, что полученное соотношение подтверждается во всех новых случаях и является общим: оно не зависит от способа изменения магнитного потока.

Допустим, что в рамке (см. рис. 31.2) наводится ток I при равномерном движении рамки влево со скоростью $\boldsymbol{v}$ под прямым углом к магнитному полю с индукцией $\boldsymbol{B}$. Тогда сила, с которой магнитное поле действует на отрезок проводника длиной l, равна $F_B=IlB$ (см. раздел 30.4). Применяя правило правой руки, можно убедиться, что эта сила направлена вправо и противодействует движению. Для поддержания постоянной скорости движения рамки необходимо уравновесить эту магнитную силу такой же силой, направленной влево; именно это и делает рука, изображенная на рисунке. При протаскивании рамки влево рука и производит работу. За время Δt она протаскивает рамку на расстояние $v\Delta t$, производя работу $W=Fv\Delta t$. Но, поскольку $F=-F_B=-IlB$, эта работа выразится через электрические и магнитные величины следующим образом:

$$W=-IlBv\Delta t.$$

Эта работа доставляет энергию, необходимую для того, чтобы прогонять ток через весь замкнутый контур. Энергия же, рассчитанная на единицу заряда, необходимая для обведения заряда по всему контуру, и называется ЭДС; она обозначается символом $\mathscr{E}$. Количество электричества, проходящее мимо любой точки цепи за время Δt, равно $I\Delta t$, так что полная энергия, требуемая для проталкивания этого заряда через весь замкнутый контур, составляет $\mathscr{E}I\Delta t$. Приравнивая ее работе, затраченной на протаскивание рамки за то же время, получаем

$$\mathscr{E}I\Delta t=-IlBv\Delta t$$

или

$$\mathscr{E}\Delta t=-lBv\Delta t.$$

Исчезновение I из уравнения весьма знаменательно: оно говорит о том, что длина провода, индукция магнитного поля и скорость непосредственно определяют не наведенный ток, а наведенную ЭДС, т. е. ЭДС индукции. Отрезок l, перемещаясь на длину $v\Delta t$, прочесывает площадь $lv\Delta t$, и приращение магнитного потока равно $\Delta\Phi_B=Blv\Delta t$. Подставляя эту величину в правую часть предыдущего уравнения и решая его относительно ЭДС индукции, окончательно получаем

$$\mathscr{E}=-\Delta\Phi_B/\Delta t.$$

Это означает, что ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока. То, что коэффициент пропорциональности оказывается равным единице, обусловлено рациональным выбором единицы индукции магнитного поля, сделанным в разделе 30.4.

31.5. Направление ЭДС индукции

Что означает знак минус в последнем уравнении? Где-то в наших рассуждениях мы приписали какой-то смысл положительному или отрицательному потоку индукции, не оговаривая это в явной форме. Выражая изменение потока как $+Blv\Delta t$, мы, очевидно, приняли некое правило знаков для потока. Вместо того, чтобы выяснить смысл положительных или отрицательных величин B, v и Δt в отдельности, используем лучше закон сохранения энергии для понимания смысла знака минус.

Индуцированный в рамке ток порождает свое магнитное поле и свой магнитный поток, пронизывающий рамку. Этот поток должен противодействовать изменению потока, вызвавшему появление ЭДС. Если бы это было не так, т. е. бы наведенный ток порождал такой магнитный поток, который *усиливал* бы результирующее изменение потока, то ЭДС индукции возрастала бы, усиливая нарастание тока, что усиливало бы нарастание потока, нарастание ЭДС и т. д., и все это без затраты энергии. Свойство индуцированной ЭДС противодействовать порождающему ее изменению магнитного потока было открыто немецким физиком Ленцем, работавшим в России. В виде закона Ленца сохранение энергии накладывает ограничение на индукционный ток. Вся работа, совершаемая индукционным током, должна производиться силой, вызывающей изменение потока,— рукой, как на рис 31.2, или турбиной электростанции, питающей города электроэнергией.

31.6. Электрические поля вокруг переменных магнитных потоков

Можно достигнуть более ясного понимания физического смысла выражения электромагнитной индукции, приведенного в разделе 31.4, если перевести это выражение с «языка ЭДС» на «язык напряженности поля». Этим переводом мы обязаны Джеймсу Кларку Максвеллу, который ввел также и другое соотношение для электромагнитных явлений (рассматриваемое в разделе 31.7), позволившее впервые предсказать электромагнитные волны.

Начнем наши новые рассуждения со следующего утверждения: линии магнитного поля вокруг тока всегда замкнуты. Они нигде не начинаются и не кончаются. Действительно, линии магнитного поля вокруг длинного прямого проводника с током всегда имеют форму окружностей. С другой стороны, линии электрического поля, описанные в гл. 28, начинаются на положительных и кончаются на отрицательных зарядах. Могут ли линии электрического поля, как и магнитного, быть замкнутыми?

Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим круглый проволочный виток радиусом r, охватывающий переменный осевой магнитный поток $\Delta\Phi_B$ (рис. 31.12). Закон индукции утверждает, что всякий раз, как изменяется поток, пронизывающий виток, в последнем наводится ЭДС. В витке протекает наведенный ток, т. е. по нему движутся заряды. Должна существовать приложенная к этим зарядам сила, которая прогоняет их по витку, совершая работу, перехо-

дящую, например, в энергию нагретой проволоки. Эта сила, отнесенная к элементарному заряду, и есть искомая напряженность

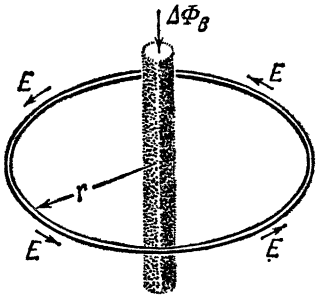


Рис. 31.12. Когда поток, проходящий через затененную область, изменяется, напряженность окружающего его наведенного поля E должна быть одинакова по всему витку. Поэтому при проталкивании элементарного заряда по витку он должен получать энергию, равную $E \cdot 2\pi r$.

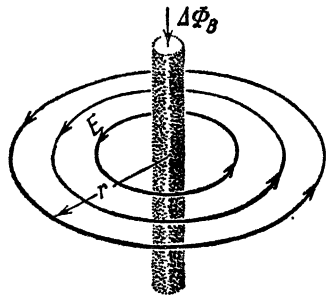


Рис. 31.13. Индуцируемое электрическое поле вокруг переменного магнитного потока направлено по окружностям. Его напряженность изменяется обратно пропорционально расстоянию от оси магнитного потока.

электрического поля. В этом осесимметричном примере нет ничего, что позволяло бы отличить одну часть витка от другой. Поэтому напряженность электрического поля должна иметь одинаковую абсолютную величину во всех точках витка и должна быть направлена вдоль провода.

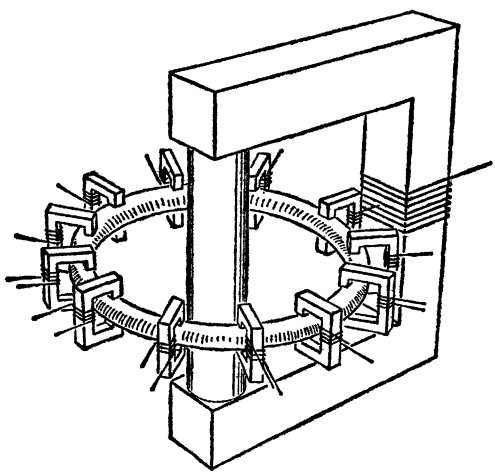


Рис. 31.14. Схематическое изображение бетатрона. Переменный поток в центре создает электрическое поле, которое ускоряет электроны. При этом электроны могут двигаться по круговым траекториям во внешнем кольце с монтированными на нем электромагнитами. Мы можем точно предсказать пути электронов, исходя из величин индукции магнитных полей, вызывающих их отклонения, и из напряженности индуцируемого электрического поля, создающего ускорение вдоль пути.

Абсолютную величину вектора $\boldsymbol{E}$ можно найти из закона индукции. ЭДС была определена в гл. 28 как работа полного обхода контура элементарным зарядом, в данном случае на пути $2\pi r$. Тогда работа на элементарный заряд $\mathscr{E}$ связана с силой на элементарный заряд E соотношением $\mathscr{E}=2\pi rE$. Выражая ЭДС через скорость изменения потока магнитной индукции, получаем

$$2\pi rE=-\Delta\Phi_B/\Delta t.$$

Мы видим, что напряженность электрического поля действительно имеет постоянную величину по всей окружности радиуса r, как мы и ожидали. Но мы видим также, что в проволочном

витке большего радиуса напряженность поля E должна быть меньше, будучи обратно пропорциональна радиусу, так как произведение напряженности на радиус равно скорости изменения потока.

Но в гл. 28 напряженность поля была определена как сила, приходящаяся на определенный заряд, независимо от того, есть ли в данной точке заряд или нет. Масквелл указал, что закон индукции должен оправдываться независимо от того, есть ли в действительности проводящий ток контур, и что линии вектора $\boldsymbol{E}$ вокруг столбика переменного магнитного потока должны существовать и в пустом пространстве, как показано на рис. 31.13. То, что это так, можно показать экспериментально на заряженных части-

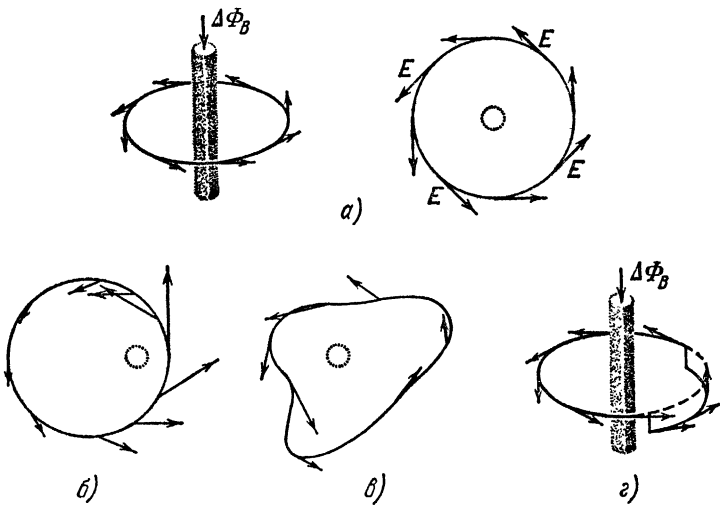


Рис. 31.15. Закон циркуляции вектора напряженности индуцированного электрического поля вокруг переменного магнитного потока. Надо разделить контур на малые отрезки. Для каждого отрезка нужно умножить составляющую вектора $\boldsymbol{E}$, направленную вдоль отрезка, на длину отрезка. Сумма этих произведений, распространенная на весь контур, и будет циркуляцией вектора $\boldsymbol{E}$, т. е. будет равна ЭДС индукции; она равна взятой со знаком минус скорости приращения магнитного потока, охватываемого данным контуром, независимо от его формы. *а*) Контур имеет форму окружности, по оси которой проходит ослабевающий магнитный поток, как и на рис. 31.12. Если смотреть вдоль оси сверху, мы видим, что векторы напряженности электрического поля имеют по всей длине контура одинаковую абсолютную величину. *б*) Ось контура не совпадает с осью переменного магнитного потока. *в*) Контур не является окружностью. *г*) Контур даже не лежит в одной плоскости. В последних трех случаях абсолютная величина вектора $\boldsymbol{E}$ в разных точках контура различна. И все же циркуляция вектора $\boldsymbol{E}$ по-прежнему равна скорости приращения магнитного потока, охватываемого контуром, взятой со знаком минус.

цах, не связанных с проводящим контуром. Существует современная мощная ускорительная установка, бетатрон, которая ускоряет отдельные заряженные частицы до высоких энергий, используя именно подобного рода круговые электрические поля. В этой установке переменный магнитнй поток заставляет электроны, заключенные в откачанном кольцеобразом пространстве, двигаться все быстрее и быстрее вокруг этого потока (рис. 31.14). Они ускоряются именно

так, как можно было бы предсказать на основе действия электрического поля, возникающего вследствие электромагнитной индукции.

Мы рассмотрели частный и притом очень простой пример описания закона индукции на «языке напряженности поля». В общем случае, когда отсутствует осевая симметрия (см. рис. 31.12), нужно брать произведения касательной составляющей вектора $\boldsymbol{E}$ на длину элемента пути, по которому направлена эта составляющая, и суммировать эти произведения по всей длине контура однократно. Оказывается, что вычисленная этим способом ЭДС тоже равна скорости изменения магнитного потока, охватываемого данным контуром. Совершенно не требуется, чтобы контур был круговым; не требуется даже, чтобы он лежал в одной плоскости. Закон индукции верен и в случаях, когда эти условия не выполняются (рис. 31.15). Это один из основных законов физики, называемый уравнением Максвелла для циркуляции вектора напряженности электрического поля.

31.7. Магнитные поля вокруг переменных электрических потоков

Электрическое поле вокруг столбика переменного магнитного поля (рис. 31.13) весьма сходно с магнитным полем вокруг переменного электрического тока (рис. 30.7, *а*). Пожалуй, не так уж

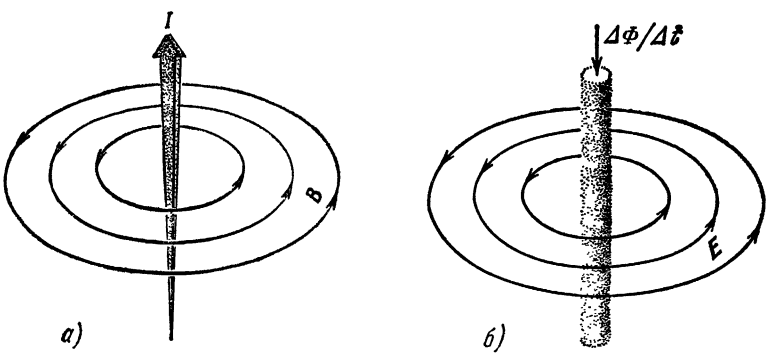


Рис. 31.16. *а*) Магнитное поле электрического тока окружает ток, причем напряженность этого поля обратно пропорциональна расстоянию от проводника *r*. *б*) Подобным же образом электрическое поле вокруг переменного магнитного потока окружает поток, и его напряженность тоже изменяется обратно пропорционально *r*. Электрическое поле распространяется далеко за пределы области изменения магнитного потока.

удивительно, что уравнения для циркуляции в обоих случаях оказываются очень похожими. В разделе 30.10 было показано, что

$$2\pi rB = 2\pi KI,$$

что является частным случаем закона полного тока или уравнения циркуляции для магнитного поля. Это уравнение можно сравнить с уравнением

$$2\pi rE = -\Delta\Phi_B/\Delta t,$$

т. е. частным случаем уравнения Максвелла для циркуляции вектора напряженности электрического поля (рис. 31.16).

В первом случае вектор магнитной индукции $\boldsymbol{B}$ циркулирует вокруг тока и его абсолютная величина падает пропорционально $1/r$, если ток постоянен; во втором случае вектор напряженности электрического поля $\boldsymbol{E}$ циркулирует вокруг переменного магнитного потока и его абсолютная величина тоже падает пропорционально $1/r$, если скорость изменения магнитного потока постоянна. Лишь направления стрелок вдоль осей контуров различны, как и следовало ожидать, учитывая знак минус во втором уравнении. Оба эти уравнения являются простейшими случаями двух более общих законов. Например, в общем случае закон полного тока гласит, что сумма произведений касательных составляющих вектора $\boldsymbol{B}$ на длины соответствующих элементов замкнутого контура, распространенная на весь контур, равна полному току, пронизывающему площадь, ограниченную контуром, умноженному на $2\pi r$.

Что же происходит, однако, если ток не постоянен? Рассмотрим магнитное поле длинного прямого провода, который был разорван так, чтобы в разрыв можно было вставить две близко расположенные параллельные пластины, как показано на рис. 31.17, *а*. Провода, замыкающие электрическую цепь, можно расположить настолько далеко, что обеспечивается осевая симметрия, причем и пластины можно изготовить круглые, чтобы иметь уверенность, что линии вектора $\boldsymbol{B}$ будут окружностями. Заряды сообщаются пластинам посредством тока, протекающего в проводах. Во время зарядки вокруг проводов должно существовать магнитное поле с круговыми линиями вектора $\boldsymbol{B}$, как показано на рис. 31.17, *б*. В каждый момент во время зарядки величина этого вектора должна удовлетворять закону полного тока $2\pi rB = 2\pi KI$, где I — мгновенное значение тока, пронизывающего площадь, ограниченную линией вектора $\boldsymbol{B}$. Но здесь мы сталкиваемся с парадоксом! В законе полного тока не было никакого утверждения, что поверхность, ограниченная электрическим контуром, должна быть плоской. Действительно, когда мы имели дело с одним длинным проводом, мы с успехом могли бы рассмотреть чашеобразную поверхность (или поверхность любой другой формы), ограниченную данным контуром, и это не внесло бы никаких изменений в формулировку закона полного тока (рис. 31.18, *а* и *б*). Однако когда в цепь включены пластины, можно представить себе чашеобразную поверхность, пересекающую пространство между пластинами, где нет никакого движения зарядов и, следовательно, тока сквозь эту поверхность (рис. 31.18, *в* и *г*). И все же здесь есть

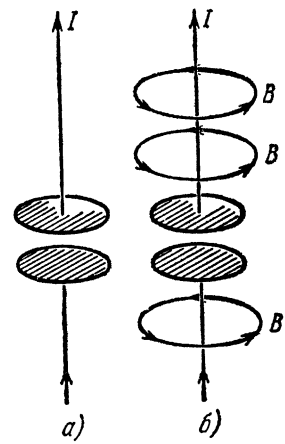


Рис. 31.17. *а*) Длинный прямой провод разорван и в разрыв вставлены две параллельные круглые пластины. *б*) Пока течет ток, заряжающий пластины, вокруг проводов существует магнитное поле с круговыми линиями.

поле $\boldsymbol{B}$, поскольку циркуляция $2\pi rB$ не равна нулю. Закон полного тока, видимо, терпит провал. Мы столкнулись с настоящим парадоксом.

Чтобы его разрешить, надо сделать одно из двух: либо нужно считать, что закон циркуляции $\boldsymbol{B}$ справедлив только для постоянных токов, либо нужно внести такое дополнение к этому закону, чтобы он распространялся на случай, когда где-либо в цепи накапливаются заряды. Мы пойдем по стопам Максвелла и выберем второй путь.

Во-первых, мы замечаем, что, хотя между пластинами ток не проходит, там есть электрическое поле в любой момент после начала их зарядки, причем линии этого поля начинаются на положительных

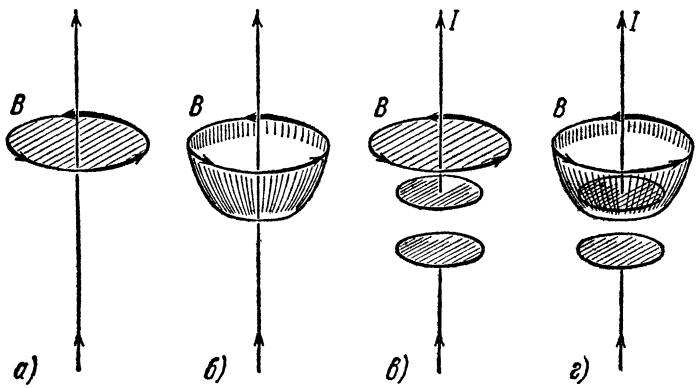


Рис. 31.18. *а*) и *б*) В законе полного тока (применяемом здесь к полю длинного прямого проводника) ничего не говорится о том, что поверхность, ограниченная контуром, должна быть плоской. *в*) и *г*) Применение этого рассуждения к случаю разрыва между параллельными пластинами приводит к настоящему парадоксу.

зарядах одной пластины и кончаются на отрицательных зарядах другой. Во-вторых, мы замечаем, что прохождение тока в этой цепи всегда сопровождается изменением величины заряда на пластинах, и, следовательно, изменением напряженности электрического поля. Если, по аналогии с магнитным потоком, определить понятие электрического потока Φ_E как произведение E на площадь, перпендикулярную к $\boldsymbol{E}$, то можно выразить изменение электрического поля как изменение потока Φ_E вектора $\boldsymbol{E}$. Далее, если утверждать, что переменный электрический поток в известном смысле эквивалентен току, то можно «спасти» закон полного тока. Однако то, что пронизывает чашеобразную поверхность, ограниченную контуром циркуляции вектора $\boldsymbol{B}$ (рис. 31.18, *г*), есть не истинный ток, а лишь переменный электрический поток.

Ниже в тексте, набранном мелким шрифтом, приведен вывод соотношения, связывающего изменение электрического потока с изменением заряда на пластинах. Там мы увидим, что полный ток, необходимый для применимости закона полного тока к переменным токам, представляет собой сумму истинного тока I и «тока смещения» $(1/4\pi k)(\Delta\Phi_E/\Delta t)$, где k есть постоянная, встречающаяся в законе

Кулона. Для чашеобразной поверхности, проходящей между пластинами, истинный ток равен нулю, а «ток смещения», обусловленный изменением электрического потока, равен полному току. Для этой поверхности

$$2\pi rB = \frac{2\pi K}{4\pi k} \cdot \frac{\Delta\Phi_E}{\Delta t} = \frac{1}{9 \cdot 10^{16}\ \text{м}^2/\text{с}^2} \cdot \frac{\Delta\Phi_E}{\Delta t}.$$

Важность тока смещения, введенного Максвеллом, заключается не столько в том, что он разрешил упомянутый выше парадокс, сколько в том, что он привел Максвелла к предсказанию электромагнитных волн и к утверждению (за много лет до экспериментальной проверки), что свет есть просто электромагнитное излучение.

Доказательство того, что переменный электрический поток создает магнитное поле, было всегда сопряжено с большими экспериментальными трудностями. Даже теперь наиболее убедительным доказательством эквивалентности между переменным электрическим потоком и током служит существование электромагнитных волн, которые ведут себя в точности так, как предсказал Максвелл.

Поправка к закону циркуляции вектора *B*. Существует много путей установления связи между электрическим потоком и зарядом. Один из самых легких состоит в том, чтобы рассмотреть малое тело с зарядом $+Q$, которое окружено воображаемой сферической поверхностью радиуса r. Электрическое поле, направленное радиально наружу, имеет на этой поверхности напряженность $E=kQ/r^2$. Площадь сферической поверхности составляет $4\pi r^2$. Следовательно, полный направленный наружу поток (напряженность, умноженная на площадь, которая в данном случае везде перпендикулярна к вектору напряженности) равен *)

$$\Phi_E = 4\pi r^2 E = 4\pi kQ.$$

Таким образом, поток не зависит от радиуса; он одинаков для всех сферических поверхностей, окружающих заряд Q. Отсюда скорость изменения электрического потока выражается в виде $\Delta\Phi_E/\Delta t = 4\pi k \Delta Q/\Delta t$. Но $\Delta Q/\Delta t$ в точности равно силе тока, притекающего к телу при его заряжении. Поскольку $\Delta Q/\Delta t = (1/4\pi k)(\Delta\Phi_E/\Delta t)$, величина $(1/4\pi k)(\Delta\Phi_E/\Delta t)$ должна в каждый момент выражать силу тока зарядки. Это в известном смысле эквивалентный ток (носящий название тока смещения), существующий в области, где нет истинного тока, но зато есть переменное электрическое поле.

Этот ток смещения может быть использован для внесения поправки к закону циркуляции вектора *B* применительно к нашей задаче о параллельных пластинах, включенных в цепь тока. К истинному току добавляется член, выражающий ток смещения, что дает **)

$$2\pi rB = 2\pi K\left(I + \frac{\Delta Q}{\Delta t}\right) = 2\pi K\left(I + \frac{1}{4\pi k}\frac{\Delta\Phi_E}{\Delta t}\right).$$

В разделе 27.7 было установлено, что $k = 2{,}3 \cdot 10^{-28}\ \text{Н}\cdot\text{м}^2/(\text{элем.зар.})^2$. Поскольку нам теперь известно, что один элементарный заряд равен $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл, легко видеть, что в единицах системы СИ

$$k = 2{,}3 \cdot 10^{-28}/(1{,}6 \cdot 10^{-19})^2 = 9 \cdot 10^9\ \text{Н}\cdot\text{м}^2/\text{Кл}^2.$$

---

*) Авторы везде избегают вводить понятие электростатической индукции как и понятие напряженности магнитного поля, и потому их «электрический поток» есть поток вектора напряженности вместо обычно рассматриваемого потока электрической индукции. *(Прим. перев.)*

**) Выражение в скобках называется полным током, откуда термин: «закон полного тока». *(Прим. перев.)*

Из раздела 30.11 известно, что $K=2\cdot10^{-7}$ Н/А^2. Таким образом, вклад в циркуляцию, вносимый током смещения, составляет

$$\frac{2\pi K}{2\pi k}\frac{\Delta\Phi_E}{\Delta t}=\frac{4\pi\cdot10^{-7}\text{ Н/А}^2}{4\pi\,(9\cdot10^9\text{ Н}\cdot\text{м}^2/\text{Кл}^2)}\frac{\Delta\Phi_E}{\Delta t}=\frac{1}{9\cdot10^{16}\text{ м}^2/\text{с}^2}\frac{\Delta\Phi_E}{\Delta t}.$$

31.8. Механизм электромагнитного излучения

Две формулы циркуляций (электрического и магнитного векторов) позволяют теоретически установить важные свойства электромагнитных волн в пустоте. Перепишем формулы циркуляций для прямоугольных замкнутых контуров, состоящих из прямолинейных отрезков, вместо осесимметричных круговых контуров. Для этого требуются проекции векторов каждого из двух полей на направление контура в каждой точке; каждую из этих проекций надо умножить на длину отрезка контура, на котором проекция вектора имеет данное значение, и затем сложить эти произведения, полученные для всех отрезков замкнутого контура. Таким образом,

$$\mathscr{E}=\sum E_l l=-\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t},\quad \sum B_l l=\frac{1}{9\cdot10^{16}\text{ м}^2/\text{с}^2}\frac{\Delta\Phi_E}{\Delta t},$$

где символ $\sum$ означает «сумма величин» (написанных после нее) в данном случае для всего замкнутого контура. (Здесь в законе полного тока мы отбросили член, выражающий истинный ток, так как в рассматриваемой части пространства, т. е. в вакууме, нет никаких движущихся зарядов, а также, между прочим, нет и покоящихся зарядов, поскольку там нет никакой вещественной материи.) Последние две формулы представляют собой два закона, совокупность которых была использована Максвеллом для предсказания электромагнитных волн. Его рассуждения можно проследить с физической точки зрения, если *предположить* существование в пространстве переменного поля и проанализировать формулы циркуляций с целью выяснения, что именно должно происходить.

Рассмотрим поле магнитного вектора $\boldsymbol{B}$ — однородное там, где оно существует, и с резким обрывом на передней поверхности (на «фронте»), так что $B=0$ справа от фронта и $B=\text{const}$ слева от него. Предположим, что эта граница между однородным полем и областью отсутствия поля движется в пространстве со скоростью, которую обозначим через $\boldsymbol{v}$. Подобное магнитное поле изображено на рис. 31.19, *а*, где оно направлено по оси z на читателя, а его граница движется вправо по оси x. Теперь представим себе прямоугольный замкнутый контур, лежащий в плоскости xy, перпендикулярной к вектору $\boldsymbol{B}$; сторона этого контура, направленная по оси y, имеет длину l, а длина прямоугольника L превышает путь, проходимый фронтом за время Δt, за которое мы рассматриваем процесс. На рисунке изображено положение, соответствующее началу промежутка времени Δt, когда одна из вертикальных сторон прямоугольного контура только что попала в перемещающееся вправо поле. Затем за

время Δt поток, пронизывающий замкнутый контур, увеличится на

$$\Delta\Phi_E = Bvl\Delta t.$$

Это выражение имеет очень знакомый вид; действительно, оно совпадает с одним из выражений в конце раздела 31.4. Правда, там мы имели дело с реальным контуром, а здесь у нас воображаемый контур, но мы уже установили, что закон полного тока так же хорошо применим к воображаемым контурам, как и к реальным. На поверхности, ограниченной контуром, имеется изменение пронизывающего ее магнитного потока, а, следовательно, возникает и ЭДС. Выясняя, из чего здесь складывается сумма произведений $E_l l$, мы установим, что правый конец контура, как было условлено, далек, а слагаемые, относящиеся к сторонам прямоугольника, параллельным оси x, *должны* сокращаться при полном обходе контура. Тогда должен существовать вектор $\boldsymbol{E}$, чтобы удовлетворялось уравнение циркуляции, причем для этого требуется, чтобы вектор $\boldsymbol{E}$ был направлен вверх по оси y вдоль задней стороны катушки. Абсолютную величину вектора $\boldsymbol{E}$ можно найти из уравнения $\Delta\Phi_B/\Delta t = Bvl = El$. Отсюда в левой части контура имеем $E = vB$. Нельзя ли проверить, что вектор $\boldsymbol{E}$ должен быть направлен именно вверх, а не вниз, по оси y, с помощью закона Ленца?

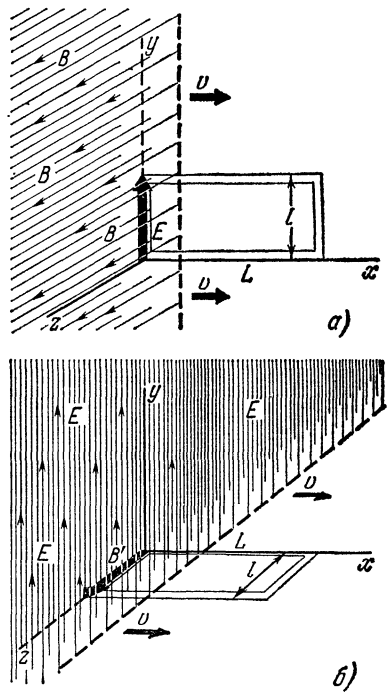


Рис. 31.19. *а*) Область пространства, содержащая магнитное поле вектора $\boldsymbol{B}$, постоянного слева и равного нулю справа от резкой границы. Рассматривается случай, когда эта граница, представляющая собой плоскость, параллельную координатной плоскости yz, движется вправо со скоростью $\boldsymbol{v}$. Магнитный поток, пронизывающий прямоугольный замкнутый контур в плоскости xy, увеличивается со скоростью Blv, наводя электрическое поле на левой вертикальной стороне прямоугольника. *б*) Наведенное электрическое поле образует переменный электрический поток, пронизывающий прямоугольный замкнутый контур, лежащий в плоскости xz, причем скорость увеличения этого потока равна Elv. В свою очередь увеличение электрического потока наводит магнитное поле $\boldsymbol{B}'$, направленное в ту же сторону, что и начальное поле $\boldsymbol{B}$.

Это электрическое поле, перпендикулярное к $\boldsymbol{B}$, должно существовать везде слева от движущегося фронта $\boldsymbol{B}$, так как, применяя уравнение циркуляции вектора $\boldsymbol{E}$, мы могли бы выбрать любой контур, лежащий частично внутри и частично за пределами поля $\boldsymbol{B}$. Таким образом, поле $\boldsymbol{B}$, фронт которого движется со скоростью $\boldsymbol{v}$, сопровождается электрическим полем, перпендикулярным как к $\boldsymbol{B}$, так и к $\boldsymbol{v}$ и имеющим абсолютную величину вектора напряженности, равную $E = vB$. Но уравнение циркуляции вектора $\boldsymbol{B}$, свя-

зывающее B с изменением *электрического* потока, должно также удовлетворяться. Если рассмотреть прямоугольный замкнутый контур в плоскости xz, перпендикулярный к контуру, рассмотренному выше, то электрический поток, пронизывающий его поверхность, тоже получает приращение за время Δt и, следовательно, должен наводить магнитное поле где-то вдоль периметра контура (рис. 32.19, *б*). Применяя цепь рассуждений, в точности аналогичных изложенным выше, получаем

$$\Delta\Phi_E = Evl\Delta t, \quad \Delta\Phi_E/\Delta t = Evl.$$

Если обозначить символом $\boldsymbol{B}'$ вектор индукции магнитного поля, наведенного по второму уравнению циркуляции, то из последнего уравнения следует, что везде позади движущегося фронта поля $\boldsymbol{E}$ должно образовываться поле $\boldsymbol{B}'$, перпендикулярное к $\boldsymbol{E}$, причем

$$B' = Ev/(9\cdot 10^{16}\ \text{м}^2/\text{с}^2).$$

Этот вектор $\boldsymbol{B}'$, сопровождающий $\boldsymbol{E}$, направлен в ту же сторону, что и исходный вектор $\boldsymbol{B}$. Исключив E с помощью приведенного выше равенства $Bvl = El$, найдем

$$B' = v^2B/(9\cdot 10^{16}\ \text{м}^2/\text{с}^2).$$

До сих пор мы ничего не сказали о величине v. Теперь мы видим, что если $v = 3\cdot 10^8$ м/с, то $B' = B$; поле $\boldsymbol{B}$ поддерживает как само себя, так и перпендикулярное к нему поле $\boldsymbol{E}$, причем вся конфигурация этих двух полей перемещается со скоростью, имеющей единственно возможное значение $3\cdot 10^8$ м/с, обозначаемое символом c.

Для простоты рассуждений мы рассмотрели поля с обрывающимся фронтом. Те же рассуждения применимы к ряду ступенек, как нисходящих, так и восходящих с точки зрения величины индукции B. Время Δt может быть выбрано сколь угодно малым, так что продольный размер замкнутого контура в направлении распространения поля будет соответственно сколь угодно малым. Тогда каждое приращение (положительное или отрицательное) вектора одного из полей будет сопровождаться соответствующим приращением вектора другого поля, удовлетворяющим тем же соотношениям, которые мы подробно рассмотрели для резкого скачка между однородным полем и отсутствием поля. Таким образом, изменения полей от точки к точке могут быть и непрерывными и могут иметь любой непрерывный пространственный профиль. Например, вектор поля может изменяться в пространстве по закону синусоиды. В любой точке такой движущейся совокупности электрического и магнитного полей имеем в любой момент $E = cB$, причем профиль поля перемещается в пространстве со скоростью c, в точности равной скорости света. Этот вывод, вытекающий из уравнений циркуляции электрического и магнитного векторов, привел Максвелла к заключению, что «сам свет, включая лучистую теплоту и прочие излучения, если таковые существуют, представляет собой электромагнитное возмущение в виде волн...». Во времена Максвелла еще не существовало

прямых подтверждений электрической природы света или других видов излучений. Более чем через двадцать лет после предсказания Максвелла Генриху Герцу удалось получить излучение, называемое теперь радиоволнами, путем использования аппаратуры явно электрического характера, и показать, что эти волны действительно распространяются со скоростью света. Тем самым теория Максвелла была блестяще подтверждена. В следующем разделе мы вкратце познакомимся с доказательствами существования электромагнитного излучения и его электрической природы.

31.9. Доказательства существования электромагнитного излучения. Электромагнитный спектр

Все электрические и магнитные поля порождаются зарядами и их движением. Когда же следует ожидать появления излучения этих полей от электрически заряженных частиц, создающих эти поля? Неподвижный электрический заряд окружен только кулоновским полем — полем, которое быстро, обратно пропорционально квадрату расстояния ослабевает с расстоянием и которое не движется по направлению от заряда. Заряженная частица, движущаяся с постоянной скоростью, не отличается от частицы, находящейся в состоянии покоя (рис. 31.20). Если мы движемся вместе с ней, то нам кажется, что она находится в покое, а поле вокруг нее — только кулоновское. Но если мы движемся относительно нее или она относительно нас, то вследствие изменения электрического потока, проходящего сквозь разделяющее нас пространство, мы заметим также магнитное поле. Но это магнитное поле не выходит за пределы кулоновского поля. Таким образом, электрическое и магнитное поля остаются связанными с зарядом, движущимся с постоянной скоростью. Они не излучаются.

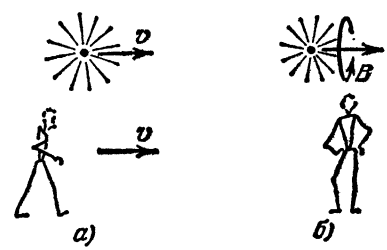


Рис. 31.20. *а*) Если мы идем рядом с движущимся зарядом, мы замечаем только его кулоновское поле. *б*) Если заряд движется мимо нас, мы наблюдаем в той же области также и магнитное поле.

С другой стороны, если мы ускоряем заряд, то он уже не может оставаться в состоянии покоя относительно какой бы то ни было подвижной системы отсчета, к которой применимы законы Ньютона и электромагнетизма. В этот момент мы имеем единственный шанс возбудить импульс отрывающихся взаимно перепендикулярных векторов электрического и магнитного полей. Следовательно, чтобы найти истоки электромагнитного излучения, мы должны рассмотреть излучение от ускоряемых зарядов.

Проверим экспериментально, что происходит, когда мы ускоряем заряды. Передающая радиостанция нагнетает заряды вдоль антенны, сначала в одном направлении, затем в другом. Они не движутся с постоянной скоростью а перемещаются то туда, то сюда,

ускоряясь сначала в одном направлении, затем в другом. Радиоволны, которые отрываются от антенны, распространяются со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с. Очевидно, они возникают от ускоренного движения зарядов, перемещающихся взад и вперед по антенне. При остановке быстрых электронов на антикатоде рентгеновской трубки они также испытывают сильное замедление, приводящее их в состояние покоя. Рентгеновское излучение происходит из области, где заряды имеют отрицательное ускорение, т. е. замедляются. Измерения скорости

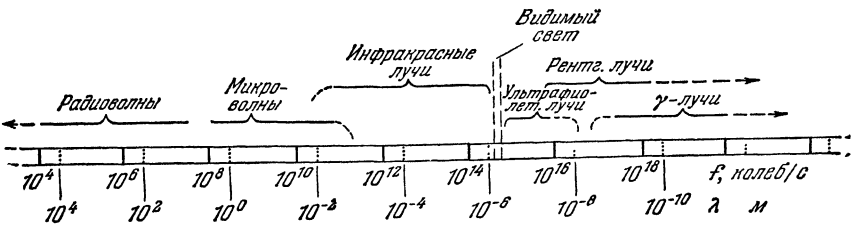


Рис. 31.21. Электромагнитный спектр — это непрерывный ряд излучений, простирающихся от γ-лучей до радиоволн. Названия для излучений, лежащих в различных участках спектра, сложились исторически; они просто дают удобную классификацию источников излучения. Физическая природа излучений одинакова по всему спектру. Во всех областях они имеют одну и ту же скорость распространения, одинаковую электромагнитную природу, и одна часть спектра отличается от другой только частотой и длиной волны. Области с тем или иным названием перекрываются. Однако названия все же связаны с определенными источниками: радио- и микроволновое излучение создается электронами, движущимися в проводниках; инфракрасное —горячими телами; видимый свет— сильно нагретыми телами; ультрафиолетовое — газовыми разрядами и электрическими дугами; рентгеновские лучи —электронами, ударяющимися об антикатод; γ-лучи — ядрами радиоактивных атомов.

распространения рентгеновских лучей показывают, что она также равна $3 \cdot 10^8$ м/с.

В синхротроне — устройстве, поставляющем быстрые электроны,— отклоняющее магнитное поле заставляет электроны, обладающие огромнейшей энергией, двигаться по большим орбитам. Если мы посмотрим на орбиту, то увидим исходящий от нее свет. Это согласуетя с тем, что энергия, до которой мы можем довести электроны, практически ограничивается потерей энергии на световое излучение, возникающее, когда электроны ускоряются отклоняющими магнитными силами. Энергия поступает от огромного электрического колебательного контура при максимально возможной мощности. Но при некоторой скорости движения электронов энергия излучается с той же быстротой, с какой она подается. Обычный видимый свет представляет собой электромагнитное излучение, источником которого является ускорение электрически заряженных частиц. Совпадение между скоростью света и скоростью электромагнитного излучения, теоретически предсказанное Максвеллом, не случайно. Все рассмотренные нами виды излучений распространяются со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с. Все они имеют электрическую природу. Все они представляют собой электромагнитное излучение (рис. 31.21).

Одна и та же скорость этих излучений и их одинаковое происхождение (от ускоряемых зарядов) являются не единственным имею-

щимся у нас доказательством их электромагнитной природы. Имеется другое доказательство, связывающее воедино весь спектр излучений, от ренгеновских лучей до радиоволн. Если мы ускоряем заряженные частицы в прямом и обратном направлениях с определенной частотой, то излучаемые электрические поля, которые мы как бы стряхиваем с частиц, должны иметь ту же частоту колебаний. Каждая передающая радиостанция толкает заряды во взаимно противоположных направлениях по своей антенне с определенной частотой и сообщает ту же частоту радиоволнам, которые она посылает. Переменное электрическое поле этих волн должно в свою очередь толкать заряды взад и вперед по приемной антенне. Действительно ли существуют соответствующие переменные токи в приемной антенне? Мы принимаем радиосигналы, настраивая колебательный контур радиоприемника, и ловим сигналы отдельных радиостанций, когда мы настроили приемник на точно такую частоту, какую дает передатчик. Колебания данной частоты передаются нам от передатчика через электромагнитное излучение.

Применяя различные цепи и антенны, можно строить передатчики, посылающие волны с частотой примерно от 10^4 до $3 \cdot 10^{11}$ колебаний в секунду. Все они посылают электромагнитные волны, движущиеся со скоростью света. Это значит, что длины волн, которые мы можем измерять с помощью интерференции, простираются примерно от 30 км до миллиметра. На длинноволновом конце эти волны дифрагируют на любых обычных препятствиях, но с повышением частоты они все больше уподобляются свету, идущему по прямой линии, и отражаются и преломляются как свет.

Даже при самых больших радиочастотах, какие мы можем создавать, длина волны электромагнитного излучения в несколько раз больше, чем наиболее длинная волна видимого света. Между ними лежит область теплового излучения. Это излучение испускается при столкновениях молекул в горячих газах. Тепловое движение молекул неотделимо от актов ускорения или замедления их зарядов, сопровождающихся испусканием электромагнитных излучений более высокой частоты, чем можно получить от электрических контуров тех размеров, которые доступны изготовлению руками человека.

При еще более высоких температурах, например в электрических дугах и искрах, выведенные из нормального состояния атомы излучают инфракрасный, видимый или даже ультрафиолетовый свет. Видимая часть спектра соответствует частотам между $4 \cdot 10^{14}$ и $8 \cdot 10^{14}$ колебаний в секунду. Здесь мы находимся далеко за пределами области, где частоту можно измерять непосредственно, но мы можем находить частоты света отдельных спектральных цветов путем измерения длин волн. Следуя по такому пути и применяя спектроскоп с разреженным воздухом, мы можем находить частоты ультрафиолетового излучения, испускаемого атомами. Эти частоты приближаются к нескольким единицам, умноженным на 10^{15} колебаний в секунду. Для микроволн, инфракрасных лучей, видимого света и, пожалуй, даже ультрафиолетового излучения можно изготовлять особые,

синхронизованные по фазе источники интенсивного излучения. Они называются мазерами (где начальная буква «м» соответствует понятию микроволн), лазерами инфракрасного диапазона и просто лазерами. Принцип их действия вкратце описан в разделе 18.3. Их пока изготовляют на малые полные мощности, но их мощность настолько сконцентрирована по частоте и направлению, что их излучение оказывает внушительное влияние на любую поглощающую среду.

Атомы не только испускают свет, но и поглощают его. Атом каждого сорта поглощает свет только некоторых вполне определенных частот. По-видимому, эти частоты соответствуют природе движения электронов в атоме. Атом настроен только на эти частоты и реагирует только на те электрические поля, которые колеблются с такими же частотами. Мы не можем настраивать атомы так, как можем настраивать собранный нами колебательный контур. Однако, подыскивая нужные атомы, мы можем подобрать электронное движение, настроенное на ту область частот, в которой мы хотим вызвать поглощение света.

При более высоких частотах мы попадаем в область рентгеновских лучей. Здесь мы можем произвести грубую оценку частот, предполагая, что они определяются временем замедления быстрых электронов в рентгеновских трубках, когда электроны падают на антикатод из тяжелого металла. Мы предполагаем, что частоты возбуждаемых рентгеновских лучей равны примерно единице, деленной на это время замедления. Если частота рентгеновских лучей не слишком высока, их длина волны равна примерно размеру атома. Тогда для измерения длины волны мы можем использовать кристаллы, в которых атомы расположены в виде правильной пространственной решетки. Косвенные измерения, с которыми вы познакомитесь в гл. 33, также согласуются с данными для частот, полученными из измерений длины волны с помощью кристаллической решетки. Такие косвенные измерения могут быть распространены на еще более высокие частоты, и они показывают, что наблюдаемые частоты ренгеновских лучей те же, что мы предсказывали, исходя из времени торможения зарядов, разогнанных электрическим полем.

Наконец, при очень высоких частотах мы приходим к γ-лучам. Они испускаются самопроизвольно при некоторых процессах радиоактивного распада. Подобно свету, они распространяются по прямой со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с, и их не могут отклонять ни электрические, ни магнитные поля. Тот же метод измерений, какой применялся для определения частот ренгтеновских лучей, показывает, что имеются γ-лучи с частотой до 10^{21} колебаний в секунду.

Все эти электромагнитные излучения несут энергию. Когда они поглощаются, то поглощающее их тело нагревается. Это значит, что электромагнитное излучение, как мы и предполагали, может испускаться только в процессе, при котором подводится энергия. Как мы предполагали вначале, излучаемые электрические и магнитные поля должны создаваться, когда какая-нибудь сила ускоряет

заряд. То, что электромагнитное излучение создается ускоренными зарядами, можно теперь считать доказанным. Итак, электромагнитное излучение существует; оно распространяется со скоростью света и возникает вследствие ускорения зарядов.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

1*. Как расположатся заряды на рис. 31.1, если перемещать провод в обратном направлении? (Раздел 31.1.)

2*. В каком направлении действует сила, обусловленная движением в магнитном поле, на заряды в боковых проводах рамки на рис. 31.2? (Раздел 31.1.)

3. а) Проанализируйте процесс, изображенный на рис. 31.5, с точки зрения сил, испытываемых зарядами в проводе при его движении в магнитном поле, и объясните, почему здесь нет индукционного тока.

б) Продолжите те же рассуждения, чтобы объяснить, почему возникает индукционный ток, когда одна из сторон рамки попадает в более слабое поле у края полюса магнита.

4*. Можно ли ожидать появления индукционного тока при движении магнита (см. рис. 31.5), если рамка удерживается на месте? (Раздел 31.3.)

5*. Когда вращается рамка (см. рис. 31.10), при какой ее ориентации:

а) наводится наибольший ток;

б) наведенный ток меняет направление? (Раздел 31.3.)

6*. Почему нельзя индуцировать ток в проволочной рамке, перемещая ее параллельно самой себе в однородном магнитном поле? (Раздел 31.3.)

7*. Проволочный виток с площадью в 0,5 м^2 находится в однородном поле, индукция которого составляет $2 \cdot 10^{-2}$ Н/(А·м). Какой поток пронизывает виток, если его плоскость перпендикулярна к направлению поля? (Раздел 31.3.)

8. Каков магнитный поток в длинном соленоиде диаметром 4 см, имеющем 10 витков на сантиметр длины, при силе тока 1 А?

9*. Если тянуть рамку (см. рис. 31.2) с постоянной скоростью, будет ли легче это делать после увеличения ее электрического сопротивления? (Раздел 31.4.)

10*. В каком случае требуется затратить бóльшую работу на вытаскивание катушки из магнитного поля: при большой или малой скорости движения? (Раздел 31.4.)

11*. Найти ЭДС, индуцируемую в отрезке провода длиной в 5 см, движущемся со скоростью 10 см/с под прямым углом к полю, индукция которого равна 0,02 Н/(А·м). (Раздел 31.4.)

12*. Найти ЭДС, индуцируемую в рамке, если пронизывающий ее магнитный поток изменяется со скоростью 0,5 Н·м/(А·с). (Раздел 31.4.)

13. В случае, изображенном на рис. 31.2, индукция магнитного поля составляет 0,5 Н/(А·м), длина l равна 10 см, сопротивление всей рамки 0,05 Ом и рамка движется со скоростью 2 м/с.

а) Чему равна ЭДС, индуцируемая в рамке?

б) Найти силу тока в рамке.

в) Какова сила действия магнитного поля на провод?

14. На рис. 30.17 дана схема электродвигателя.

а) Объясните, как вы можете использовать то же расположение магнитного поля и проволочной рамки для создания генератора, который будет посылать ток только в одном направлении во внешней цепи.

б) Как должна быть ориентирована проволочная рамка в магнитном поле в моменты, когда коммутатор изменяет соединения между концами рамки и проводами внешней цепи?

15. Прямоугольная проволочная рамка (рис. 31.22) находится в однородном магнитном поле.

а) Каково направление (по часовой стрелке или против) индуцируемого тока в момент прохождения рамки через положение, когда она совпадает с плоскостью чертежа, а BC движется в глубь страницы вокруг оси P_1? Вокруг P_2?

б) Каково соотношение между индуцируемыми токами при вращении рамки вокруг P_1 и P_2 с одинаковой скоростью?

в) Как зависит индуцируемое напряжение от площади рамки при данной скорости вращения?

г) Если магнитное поле имеет индукцию 1,5 Н/(А·м), $AB=10$ см и $BC=4$ см, то каково максимальное индуцируемое напряжение, если рамка вращается вокруг P_1 со скоростью 19,1 $с^{-1}$ ($120/2\pi$ $с^{-1}$)?

16. К П-образной проволоке (рис. 31.23) присоединена подвижная проволока AB. Это устройство находится в однородном поле, перпендикулярном к рисунку и направленном в глубь чертежа.

а) Если индукция магнитного поля составляет 40 Н/(А·м), каково индуцированное напряжение, когда AB находится в указанном положении и движется со скоростью 20 см/с? Вычислите искомую величину сначала из скорости изменения потока и затем из магнитной силы, действующей на элементарные заряды в проволоке.

б) Каково индуцированное напряжение, когда AB находится на расстоянии 5 см от левого конца и движется со скоростью 20 см/с.

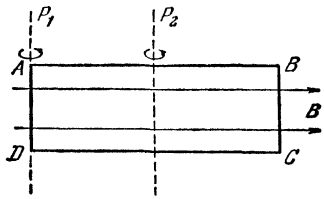


Рис. 31.22. К задаче 15.

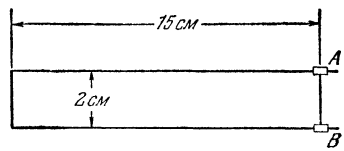


Рис. 31.23. К задаче 16.

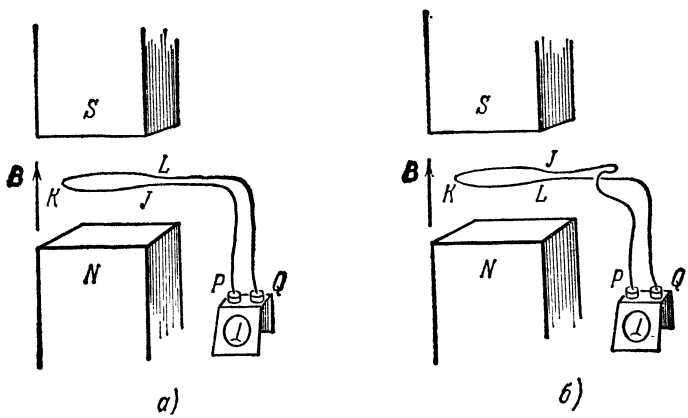


Рис. 31.24. К задаче 19.

в) С какой скоростью энергия передается в рамку, когда AB движется со скоростью 20 см/с, а индуцированный ток равен 2 А?

г) Какая сила необходима для передвижения проволоки со скоростью 20 см/с, когда индуцированный ток равен 2А?

17. Если движущаяся рамка, изображенная на рис. 31.2, имеет массу 200 г и внешняя сила внезапно перестает действовать, когда рамка движется со скоростью 2 м/с, каково будет ее последующее движение?

18*. Если к рамке (см. рис. 31.2) приложить постоянную внешнюю силу, будет ли она совершать равноускоренное движение, пока отрезок l находится в магнитном поле? (Раздел 31.5.)

19. Проволочная петля JKL расположена между полюсами магнита так, что ее плоскость параллельна плоскостям среза полюсов, как показано на рис. 31.24, *а*.

Петля соединена с чувствительным амперметром, стрелка которого устанавливается посреди шкалы, когда нет тока, и который устроен так, что стрелка отклоняется в сторону того из зажимов, через который ток входит в амперметр.

а) В какую сторону отклонится стрелка, когда петля выдергивается из поля магнита и когда она вставляется обратно в положение, показанное на рис. 31.24, *а*?

б) В какую сторону отклонится стрелка, когда петля вставляется в положение, показанное на рис. 31.24, *б*?

в) Как будет двигаться стрелка, когда петля поворачивается из положения а) в положение б) без вынесения ее из поля магнита?

20. а) Будет ли магнитное поле Земли индуцировать ток в искусственном спутнике Земли с металлической поверхностью, движущемся вокруг экватора? Вокруг полюсов?

б) Если токи будут индуцироваться, как они будут влиять на движение спутника?

21. Стержневой магнит опускается сквозь проволочную петлю, как показано на рис. 31.25.

а) Опишите изменения в направлении и величине индуцированного в петле тока при движении сквозь нее магнита.

б) Будет ли ускорение опускающегося магнита постоянным, если пренебречь сопротивлением воздуха?

22. Прямоугольную рамку из медной проволоки роняют между полюсами магнита, как показано на рис. 31.26. Опишите качественно движение рамки, не учитывая сопротивления воздуха.

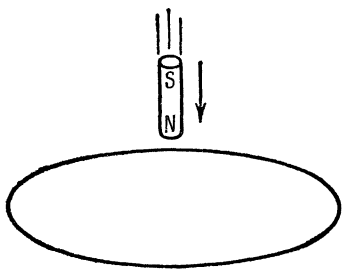


Рис. 31.25. К задаче 21.

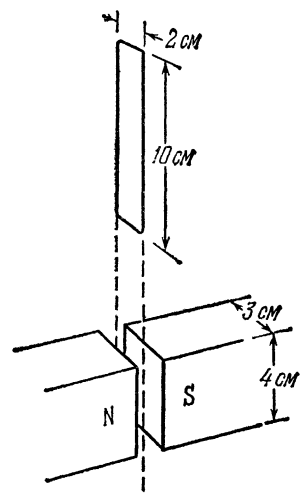


Рис. 31.26. К задаче 22.

23*. Имеют ли начало и конец линии электрического поля, индуцированного изменением магнитного потока? (Раздел 31.6.)

24. В бетатроне электроны ускоряются до очень высокой энергии с помощью переменного магнитного потока. Электроны движутся по кругу внутри стеклянной вакуумной камеры бетатрона и ускоряются при увеличении магнитного потока, проходящего через отверстие баранки — вакуумной камеры. Специальное магнитное поле проходит сквозь вакуумную камеру бетатрона перпендикулярно к ее плоскости для поддержания кругового движения электронов.

Электрон перемещается в вакуумной камере бетатрона по окружности радиусом 50 см со скоростью, составляющей 98% от скорости света. Если поток внутри камеры увеличивается со скоростью 24 Н·м/(А·с) в течение 1/240 с, то какая энергия в электрон-вольтах будет сообщаться электрону? Предположите, что скорость остается постоянной и примерно равной скорости света.

25*. Чем определяется ток смещения между двумя параллельными пластинами в электрической цепи? (Раздел 31.7.)

26* Можно ли сколь угодно долго поддерживать постоянную циркуляцию:

а) магнитного вектора;

б) электрического вектора? (Раздел 31.7.)

27*. Положим, что в схеме, изображенной на рис. 31.18, *в*, начальный заряд пластин был равен нулю, после чего некоторое время протекал ток.

а) Каков знак зарядов на пластинах?

б) Каково направление электрического поля? (Раздел 31.7.)

28. Пусть в некоторый момент в том месте, где вы стоите, нет электрического поля, но через короткий промежуток времени появляется электрическое поле, направленное вертикально вниз, граница которого движется прямо на вас. Когда оно вас достигнет, каково будет направление магнитного поля в занятом вами пространстве?

29*. Какова скорость в вакууме:

а) радиоволн;

б) инфракрасных лучей;

в) γ-лучей? (Раздел 31.9.)

30. Когда электроны, движущиеся со скоростью $3 \cdot 10^7$ м/с, попадают на антикатод рентгеновской трубки, они тормозятся до полной остановки на пути, равном примерно одному атомному диаметру — около 10^{-10} м.

а) Каково время торможения?

б) Если для определения частоты мы поделим единицу на это время, то какую частоту электромагнитного излучения вы рассчитываете получить при таком замедлении?

в) Какую длину волны в вакууме или, приближенно, в воздухе даст эта частота?

31. Какое можно привести доказательство того, что звук не является электромагнитными волнами?

ГЛАВА

32 ИССЛЕДОВАНИЕ АТОМА

Введение

Нам уже известно многое об атомах — об их массах и об образуемых ими химических соединениях. Мы также знаем, что они содержат электроны, которые во много раз легче любого атома. Мы знаем, что можно отрывать электроны и что при этом образуются ионы, составляющие бóльшую часть всей массы атома, а иногда удается присоединить электрон к нейтральному атому и таким образом получить отрицательный ион. Но на что же похож атом? Как он построен? Об этих вопросах пока было сказано очень мало.

Многие из первоначальных сведений о строении атомов были получены зондированием тонких слоев вещества движущимися заряженными частицами. Можно легко понять, как используются заряженные частицы высокой энергии для зондирования внутреннего строения атомов, если представить себе следующую аналогию. Предположим, что мы имеем некоторые основания подозревать, что в кипе сена спрятаны некоторые ценные контрабандные товары, быть может большой слиток платины, возможно несколько кусков платины, которые распределены внутри кипы. Если в сене есть платина, то можно говорить, что кипа обладает внутренним строением: столько-то платины в такой-то точке, ничего в некоторой другой области и, может быть, некоторое количество в третьем месте. Если бы в кипе сена находилась именно платина, то ясно, что стоило бы распотрошить кипу и прочесать отдельные клочки. Но атом не так легко разорвать на части с целью увидеть, что находится внутри, а мы хотели бы знать, где расположены частицы, образующие атом. Таким образом, чтобы наша модель действительно напоминала опыты с атомами, мы должны пытаться найти платину в сене без разнимания кипы. Для этого возьмем винтовку и будем обстреливать сено пулями (рис. 32.1). Если пуля проходит прямо насквозь, мы можем заключить, что на ее пути не было ничего массивного. А так как большинство пуль проходит именно так, можно заключить, что бóльшая часть кипы действительно представляет собой чистое сено. С нашей точки зрения, поскольку мы ищем платину, значительная часть кипы пустая. Но если мы правы и контрабандная платина действительно находится где-то внутри, то случайно одна из пуль может удариться о платину. Тогда она отскочит и вылетит под каким-то углом к своей начальной траектории. По направлению полета пули при вхождении в кипу и по ее траектории после того,

как она рикошетирует, можно, идя обратным путем, найти местоположение куска платины.

При желании можно добиться значительно большего. Если пустить много пуль в место вблизи платины, то по углам, под которыми рикошетируют пули, можно кое-что сказать о форме куска платины. Если прямо перед нами находится большая плоская поверхность платины, то все пули отскочат под одним и тем же углом. Если платина отлита в виде шара, то пули одинаково часто будут отскакивать во всех направлениях вокруг первоначального направления движения. Обстреляв пулями всю кипу и проследив за всеми отскоками, мы сможем многое сказать о положениях кусков платины внутри кипы и об их форме.

Конечно, атом не является кипой сена с засунутыми в нее кусками платины. Когда мы стреляем в атом «пулями» в виде заряженных частиц, то мы не ожидаем получить информацию точно того же типа, как при поисках контрабанды. Тем не менее, зондируя атомы заряженными частицами и изучая направления, под которыми эти частицы выходят, мы можем надеяться узнать многое о внутреннем строении атомов.

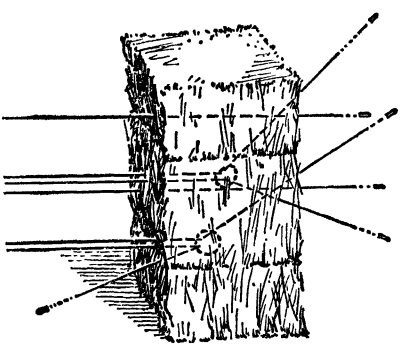


Рис. 32.1. Зондирование внутреннего строения кипы сена с помощью пуль. Траектории пуль показывают, где могут быть расположены в сене куски металла, а также кое-что говорят об их форме.

В структуре атомов значительно больше регулярности, чем в расположении кусков платины в кипах сена. Законы образования химических соединений, характеристические спектры (одинаковые для всех атомов одного сорта) и, как мы увидим дальше, данные, полученные при бомбардировке атомов заряженными частицами,— все это указывает на то, что все атомы построены приблизительно по сотне образцов и в некоторых отношениях эти образцы весьма просты. По этой причине из сравнительно небольшого числа опытов с зондированием мы можем многое узнать о строении атомов.

Для того чтобы доставить сведения о внутреннем строении атома, зонд должен проникнуть внутрь атома. Следовательно, другие атомы и молекулы, которые отскакивают от поверхности атома, являются плохими зондами. Заряженные частицы малых энергий тоже не очень пригодны, так как они не проникают глубоко. С другой стороны, зонд, проходящий через что-либо насквозь, не отклоняясь, также ничего не скажет нам о том, где он побывал, поэтому трудно пользоваться глубоко проникающими рентгеновскими лучами или еще более глубоко проникающими γ-лучами от радиоактивного распада. В начале этого столетия наиболее подходящими зондами для проникновения в атомы были α-частицы. Они вылетают из радиоактивных веществ и обладают достаточно высокой энергией для про-

никновения в атом; и хотя они нередко проходят сквозь атом с малым изменением направления, иногда они все же сильно отклоняются. В этих случаях мы предполагаем, что они столкнулись внутри атома с чем-то относительно массивным и отскочили.

32.1. Отклонение альфа-частиц и модель атома Резерфорда

Рис. 32.2 показывает схему опыта по зондированию атомов золота быстрыми α-частицами. Мы воспользуемся α-частицами, испускаемыми при радиоактивном распаде полония; это будет наша пушка. Как мы знаем из раздела 30.8, она стреляет α-частицами, являющимися двухзарядными ионами гелия, со скоростью $1{,}6 \cdot 10^7$ м/с. Некоторые из α-частиц проходят сквозь отверстие, так что мы знаем как их направление, так и их скорость. Эти частицы затем ударяются о тонкую золотую фольгу.

Позади золотой фольги находится детектор α-частиц: сцинтилляционный экран, подобный тому, который упоминался в гл. 8,

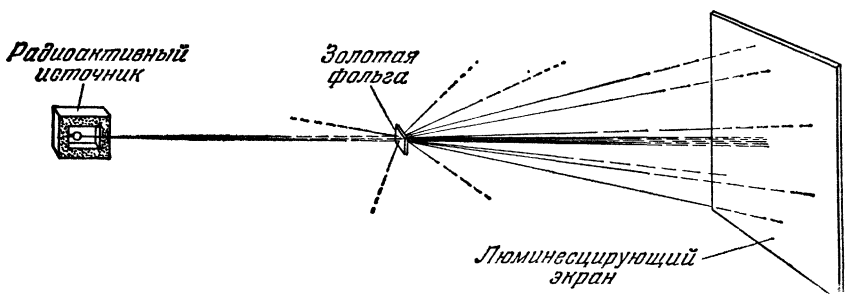


Рис. 32.2. Опыт зондирования внутреннего строения атомов α-частицами в качестве «пуль»

или группа современных счетчиков, один из которых подает сигнал, показывающий, где пролетела частица после прохождения сквозь фольгу.

Золотая фольга представляет собой большое скопление атомов золота. Подходящая золотая фольга настолько тонка, что каждый ее квадратный метр весит только $2 \cdot 10^{-3}$ кг. (Это фольга того типа, из которой делают золотые буквы на витринах магазинов; понаблюдайте за работой мастера, и вы увидите, как он слегка дует на фольгу, чтобы она, развеваясь в воздухе, легла на свое место. Возьмите у него кусочек и посмотрите сквозь него на свет — вы увидите проходящий сквозь листочек зеленый свет.) По плотности золота можно найти число атомов золота, встречающихся на пути α-частицы, проходящей сквозь фольгу. Кубический метр золота весит около $2 \cdot 10^4$ кг, или около 20 тонн. Поэтому толщина фольги составляет около

$$(2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^2)/(2 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3) = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Мы также знаем, что масса атома золота составляет около $3{,}3 \cdot 10^{-25}$ кг (197 атомных единиц массы, приходящихся на атом золота, умножаются на $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг, т. е. на значение атомной единицы массы,

выраженной в килограммах). Таким образом, мы получаем, что каждый атом, упакованный до соприкосновения со своими соседями, имеет объем, равный

$$(3{,}3\cdot 10^{-25}\ \text{кг})/(2\cdot 10^{4}\ \text{кг/м}^3)=1{,}65\cdot 10^{-29}\ \text{м}^3.$$

Если представить себе атомы в виде кубических ящичков, то ребро каждого из этих мельчайших ящичков должно иметь около $2{,}5\cdot 10^{-10}$ м в длину. Поэтому толщина золотой фольги, выраженная числом золотых атомных ящичков, равна $(1\cdot 10^{-7}\ \text{м})/(2{,}5\cdot 10^{-10}\ \text{м})$, т. е. толщина фольги составляет около 400 атомов золота.

В нашей аналогии каждый атом золота изображается кипой сена со спрятанной внутри контрабандой. Так как мы знаем, что все атомы золота ведут себя одинаково и все имеют одинаковый вес, то мы представляем их кипами сена, имеющими одинаковое внутреннее строение. Поэтому золотая фольга моделируется стенкой из одинаковых кип толщиной в 400 кип.

Первое, что мы узнаем с помощью описанного опыта,— это то, что большинство α-частиц проходит сквозь фольгу без заметного изменения направления их движения. Иначе говоря, одна α-частица обычно проходит без отклонения сквозь 400 атомов. Подобно тому, как мы пришли к выводу, стреляя пулями в кипу сена, что бóльшую часть кипы занимает чистое сено, здесь мы можем заключить, что бóльшая часть объема внутри атома свободна от непроницаемых массивных объектов, от которых α-частицы отскакивали бы под углом. Тем не менее атом заполнен чем-то подобным атомному «сену», потому что, как можно убедиться, α-частицы, проходя сквозь золото, постепенно теряют свою энергию. При обычной толщине золотых пластинок α-частицы никогда бы не могли выйти с противоположной стороны фольги. Как легко вывести из других опытов, энергия α-частиц расходуется на ионизацию атомов золота. Когда α-частица проходит сквозь атомы, теряя энергию на отрывание электронов, она замедляется так же, как замедляется пуля, когда она проходит сквозь много кип сена.

Однако благодаря тому, что вес атомов известен, мы знаем, что где-то в атоме должно быть расположено нечто массивное. Трудно поверить, что эта масса состоит из электронов. В легком атоме их для этого требовалось бы много тысяч, а, разрушив атом, мы сможем получить всего лишь несколько электронов. Масса атома золота примерно в 50 раз больше массы α-частицы, и если α-частица ударяется о такую массу «в лоб», то она должна отскочить прямо назад. Поэтому рассмотрим снова пучок α-частиц, проходящих сквозь золотую фольгу. Если мы тщательно обследуем все направления, то найдем, что при прохождении сквозь золотую фольгу примерно на каждые 10 000 падающих α-частиц только одна действительно отклоняется от своего первоначального пути на угол, превышающий 10°.

Лишь в виде редкого исключения, время от времени одна из астрономически огромного числа α-частиц отклоняется от своего

пути на 90° и более. Подобные события изредка происходят и при прохождении α-частиц через газ в камере Вильсона. Здесь, если рассмотреть огромное множество снимков, можно найти несколько снимков, на которых α-частицы явно рикошетировали от атома, отклонившись почти на 180°. Такой случай можно видеть на рис. 32.3 в середине фотоснимка.

Альфа-частица, испытавшая столь резкое отклонение в золотой фольге, должна была претерпеть одно сильное столкновение с какой-то частью одного из атомов фольги. Можно не сомневаться в том, что это лишь однократное столкновение, так как большинство α-частиц проходит прямо. Следовательно, мы знаем, что вероятность даже однократного сильного столкновения очень мала, а более чем однократное столкновение такого рода на пути сквозь фольгу практически невозможно.



Рис. 32.3. Фотоснимок в камере Вильсона, показывающий треки (следы пролета) α-частиц, движущихся в азоте. Альфа-частицы движутся вверх от источника, расположенного в нижней левой части. Обратите внимание на частицу, которая столкнулась с атомом азота вблизи центра снимка. Она отклонилась назад на угол примерно 142°, а атом азота испытал отдачу.

На α-частицу, испытавшую столь сильное отклонение, должны были действовать огромные силы. Следовательно, где-то внутри атома имеется по крайней мере один тяжелый массивный центр, и те α-частицы, которые летят прямо на него, сильно с ним взаимодействуют.

Для объяснения этих наблюдений любая модель атома должна обладать двумя чертами: поскольку почти все α-частицы проходят прямо сквозь атом, бóльшая часть внутренней области атома не должна содержать ничего, кроме атомного «сена». Но так как α-частица изредка все же отскакивает назад, где-то внутри атома должен быть по крайней мере один массивный «кусок», с которым α-частица может сильно взаимодействовать. Основываясь на этой аналогии, мы уподобим атомное «сено» электронам, которые отрываются, когда α-частицы проходят сквозь атомы и ионизуют их. Это равносильно тому, что мы хотим приписать основной массе атома положительный заряд, который должен присутствовать для того, чтобы атом в целом в нормальном состоянии был нейтральным.

В 1911 г. Резерфорд выдвинул модель атома, которая имела все эти черты и, кроме того, привлекала только кулоновскую силу для объяснения взаимодействия α-частиц с положительным массивным атомным ядром. Его модель изображает атом как крошечную сол-

нечную систему с сердцевиной или ядром в центре и некоторым числом электронов вокруг него. Ядро положительно заряжено, и в нем сосредоточена почти вся масса атома. Легкие отрицательно заряженные электроны обращаются вокруг ядра, удерживаясь кулоновским притяжением точно так же, как планеты обращаются вокруг Солнца, удерживаясь гравитационным притяжением. За пределами атома эти отрицательные электроны компенсируют действие положительного заряда ядра, так что атом в целом нейтрален. Это значит, что ядро является носителем некоторого числа положительных элементарных зарядов, равного числу электронов.

Мы уже пришли к выводу, что атом водорода состоит из протона и электрона (раздел 28.1). Следовательно, в резерфордовской модели водородного атома (рис. 32.4) протон является ядром и имеется один электрон, движущийся вокруг него по орбите. Аналогично атом гелия состоит из α-частицы и двух электронов. В гелии ядром является α-частица и вокруг нее обращаются две электронные «планеты».



Рис. 32.4. Резерфордовская модель атома водорода. В принятом здесь масштабе как электрон, так и протон должны были иметь на этом рисунке столь малые размеры, что в действительности на рисунке их совсем нельзя было бы увидеть, хотя линейное увеличение рисунка составляет 10^9 раз.

В резерфордовской модели любого атома размеры ядра и электронов принимаются весьма малыми по сравненню с общими размерами атома, так что бóльшая часть объема атома действительно представляет собой пустое пространство. В этом пространстве вблизи ядра электрическое поле является в основном полем ядерного заряда — кулоновским полем, напряженность которого убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от ядра. Орбитальные электроны находятся во внешних областях атома, и там эти отрицательные заряды вносят свой вклад в электрическое поле. За пределами же атома эти отрицательные заряды полностью экранируют положительный заряд ядра, и электрическое поле исчезает.

В этой модели α-частица, пролетающая сквозь атом на некотором расстоянии от ядра, проходит насквозь без заметного отклонения. Она только расталкивает электроны в сторону. Но в потоке α-частиц, обстреливающих золотую фольгу, немногие из частиц проходят столь близко от центра атома, что они встречают сильное электрическое поле вблизи его тяжелого ядра. Эти частицы «рассеиваются» под большими углами.

Мы видим, что резерфордовская модель объясняет, по крайней мере качественно, экспериментальные факты. Она объясняет, почему атомы позволяют проходить большинству частиц почти без отклонения и почему немногие α-частицы сильно отклоняются. Однако прежде чем эта модель заслужит признание, мы должны подвергнуть ее количественной проверке. Это проделали с большим мастерством Резерфорд и его ученики.

32.2. Траектории альфа-частиц в электрическом поле ядра

В резерфордовской модели α-частица вблизи ядра испытывает силу отталкивания, обратно пропорциональную квадрату расстояния от ядра. Для проверки этой модели нужно выяснить, какие траектории должна описывать в таком силовом поле α-частица.

На рис. 32.5 показаны примеры вычисленных траекторий. Хотя мы не воспроизводим длинных вычислений этих траекторий, расчеты не содержат ничего непостижимого, так как основываются на законе Кулона, втором законе динамики Ньютона и некоторых геометрических построениях. Все кривые являются гиперболами с ядром в фокусе. (Эти гиперболические орбиты имеют связь с эллиптическими орбитами планет в поле силы тяготения, обратно пропорциональной квадрату расстояния от Солнца. Некоторые замечания об этой связи см. ниже в тексте, набранном мелким шрифтом.)

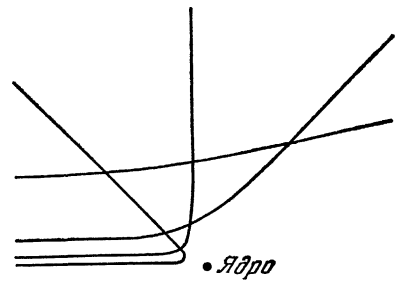


Рис. 32.5. Вычисленные траектории α-частиц, приближавшихся к ядру. Они были вычислены основываясь на предположении, что силы отталкивания обратно пропорциональны квадрату расстояния.

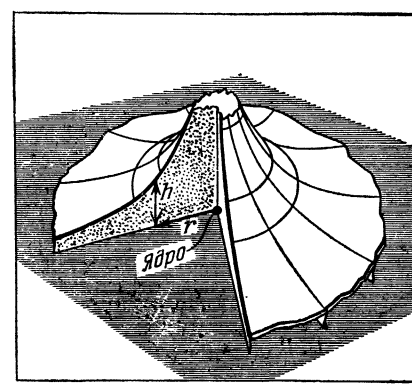


Рис. 32.6. Механическая модель для иллюстрации траекторий α-частиц вблизи ядра. Альфа-частицы имеют потенциальную энергию, пропорциональную $1/r$, где r — расстояние от ядра. Холм построен таким образом, что высота в любой точке на его поверхности пропорциональна $1/r$, где r — расстояние в плоскости от центра. Следовательно, шарик на поверхности холма будет иметь потенциальную энергию тяготения, пропорциональную $1/r$. Тогда его движение похоже на движение заряда, движущегося на плоскости в электрическом поле ядра.

Вы сами можете убедиться в правдоподобии вычисленных результатов, если вглядитесь в механическую модель, которая воспроизводит существенные черты рассеяния α-частиц в кулоновском силовом поле. Вы сможете даже при желании построить такую модель и провести с ней опыты. В механической модели α-частица изображается стальным шариком, который катится с малым трением по пологому холму с криволинейным профилем, возвышающемуся над уровнем стола (рис. 32.6). Мы сопоставляем потенциальную энергию тяготения шарика на холме с электрической потенциальной энергией α-частицы вблизи ядра; таким образом, эта модель изображает плоскость, проходящую через центр атома, в которой третье измерение (координата) представляет не пространственное измерение, а потенциальную энергию. Электрическая потенциальная энер-

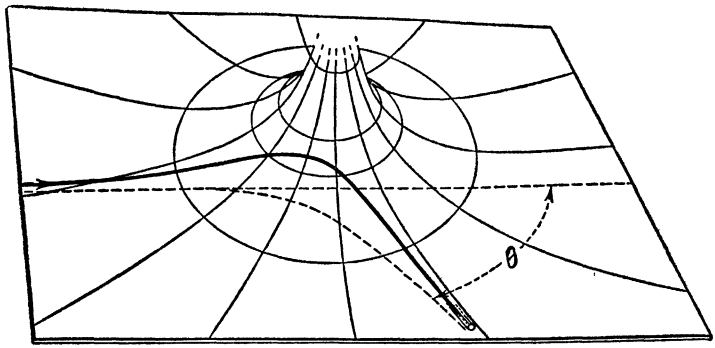


Рис. 32.7. Сплошная линия показывает возможную траекторию катящегося шарика в «модели холма», построенной для случая кулоновского поля. Пунктирная прямая на плоскости под холмом показывает направление, в котором был первоначально пущен данный шарик. Если смотреть на холм сверху вниз, то видимый путь шарика моделирует путь α-частицы, движущейся в горизонтальной плоскости. Этот путь изображен пунктирной кривой на плоскости.

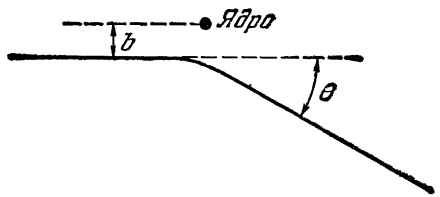


Рис. 32.8. Прицельное расстояние b есть то расстояние, на котором частица пролетела бы мимо ядра, если бы она не отклонялась. Угол рассеяния θ есть угол между начальным направлением и направлением после отклонения.

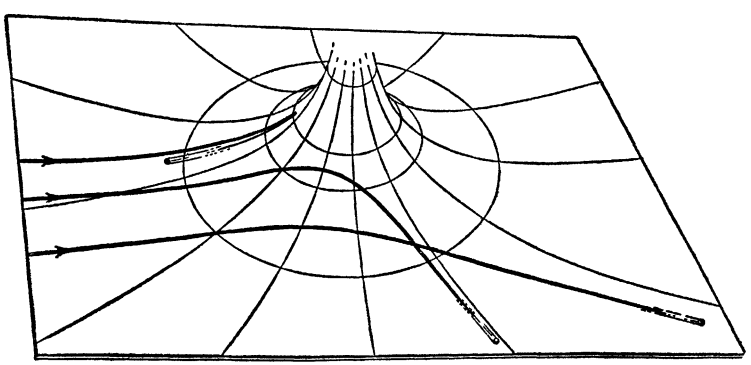


Рис. 32.9. Траектории катящегося шарика на «модели холма». Каждый раз шарику сообщается одинаковая энергия, но прицельные расстояния различны. Обратите внимание на то, что чем меньше прицельное расстояние, тем больше угол рассеяния.

гия α-частицы пропорциональна $1/r$, где r — расстояние от ядра. Следовательно, мы строим наш холм так, что над любой точкой на плоскости высота обратно пропорциональна расстоянию этой точки от центра.

В этой модели движение α-частицы в плоскости, проходящей через ядро, на рис. 32.6 моделируется движением шарика по поверхности потенциального холма. Если смотреть сверху на шарик, катящийся по холму данной формы, то мы увидим траекторию, приближающуюся к траектории α-частицы вблизи ядра (рис. 32.7).

Альфа-частица, нацеленная на ядро прямо «в лоб», отразится точно в обратном направлении. Аналогично в механической модели, если шарик начнет катиться точно к центру холма, он пойдет прямо вверх до высоты, где его потенциальная энергия равна его первоначальной кинетической энергии. Здесь он изменяет свое движение на обратное и возвращается в исходную точку. Если, однако, мы нацеливаем α-частицу в точку справа от ядра, то кулоновское отталкивание направляет α-частицу вправо, изменяя ее направление по мере того, как она проходит мимо ядра (рис. 32.7). Угол θ между конечным и начальным направлениями движения называется углом рассеяния (рис. 32.8). Чем ближе α-частица подходит к ядру, тем сильнее испытывает она действие кулоновской силы и тем ближе эта сила отклоняет ее к обратному начальному направлению движения. Поэтому угол рассеяния θ возрастает, когда «прицельное расстояние», изображаемое расстоянием b, уменьшается. На рис. 32,9 показаны соответствующие движения шарика в нашей механической модели.

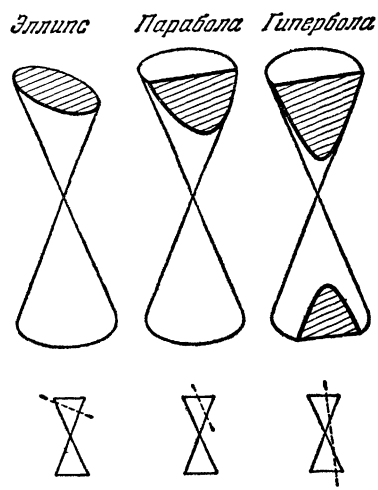


Рис. 32.10. Конические сечения. Такие плоские кривые, как эллипс, парабола и гипербола, образованы сечением конуса плоскостями под разными углами.

Конические сечения и поля сил, обратно пропорциональных квадрату расстояния. Всякий раз, когда масса движется под действием силы, изменяющейся обратно пропорционально квадрату расстояния от неподвижного центра, орбита представляет собой коническое сечение: это кривая, которая может быть получена сечением поверхности конуса плоскостью. Если плоскость разрезает конус перпендикулярно к его оси, то поверхность конуса при этом разрезается по кругу. Как известно, такая орбита является одной из возможных планетных орбит. Если теперь немного повернуть плоскость, поверхность конуса будет рассечена по эллипсу (рис. 32.10). Мы снова получаем возможную планетную орбиту. При дальнейшем повороте плоскости эллипс становится все более вытянутым, и орбита становится похожей на орбиту кометы.

Как видно из рис. 32.10, если повернуть плоскость на достаточно большой угол, то линия пересечения плоскости с конусом становится гиперболой — кривой, похожей на орбиты, вычисленные для α-частиц в электрическом поле ядра.

Кривая того же рода получается для орбиты тела, которое настолько быстро движется мимо Солнца, что никогда больше не возвращается.

Между углами, при которых сечения представляют собой замкнутые орбиты — эллипсы, и углами, при которых сечения дают открытые гиперболические орбиты, имеется определенный угол, под которым плоскость разрезает конус по параболе. Эта кривая представляет собой орбиту частицы, у которой энергии как раз хватает для того, чтобы удалиться на бесконечное расстояние от центра силы. Она отделяет орбиты тел, которые обращаются на своих орбитах, от орбит тел, совершающих лишь однократное прохождение по орбите.

Эллипсы, параболы и гиперболы — все это возможные орбиты, когда действующая сила является силой притяжения. Для отталкивательной силы получаются только гиперболы, так как тело отталкивается прочь и не возвращается назад.

Все эти кривые принадлежат к одному виду, поскольку все они являются траекториями тел, движущихся в полях сил, обратно пропорциональных квадрату расстояния от неподвижного центра сил. Геометрически все они объединяются в семейство конических сечений.

32.3. Угловое распределение рассеяния

Для частиц одинаковой энергии определенное прицельное расстояние дает (под действием кулоновского отталкивания от ядра) определенный угол рассеяния. Вычисляя траектории для ряда прицельных расстояний b, мы можем построить график зависимости между прицельным расстоянием b и

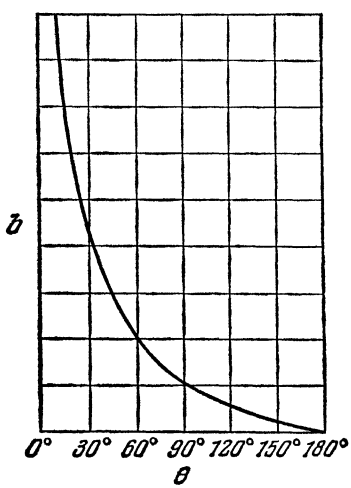


Рис. 32.11. График зависимости b от θ для кулоновской силы отталкивания.

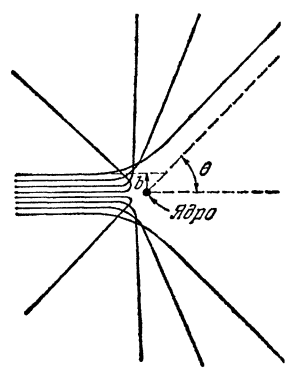


Рис. 32.12. С уменьшением прицельного расстояния b угол рассеяния θ возрастает.

получающимся углом рассеяния θ. Для кулоновской силы эта связь показана на рис. 32.11.

Если бы мы могли видеть центр атома и совершенно точно направлять α-частицу так, чтобы прицельное расстояние b было точно известно, то непосредственным опытом можно было бы проверить зависимость между b и θ. Однако α-частицы в наиболее точно направленном реальном пучке будут беспорядочно попадать в разные точки области, во много раз превосходящей площадь, занимаемую

атомом. Поэтому придется предпринять несколько менее прямой опыт.

Как видно из рис. 32.12, θ возрастает с уменьшением прицельного расстояния b. Поэтому все частицы, летящие первоначально с прицельными расстояниями в пределах от 0 до b, рассеиваются на углы, превышающие θ. (То же соотношение можно видеть на рис. 32.9 и 32.11.)

Так как меньшие прицельные расстояния соответствуют бо́льшим углам рассеяния, то мы должны использовать неустранимое несовершенство прицеливания и вычислить число частиц, совершающих соударения с прицельным расстоянием, меньшим некоторой заданной величины b. Все такие α-частицы (и никакие другие) должны тогда быть рассеяны на углы, превосходящие соответствующий угол рассеяния θ. Так как мы можем экспериментально

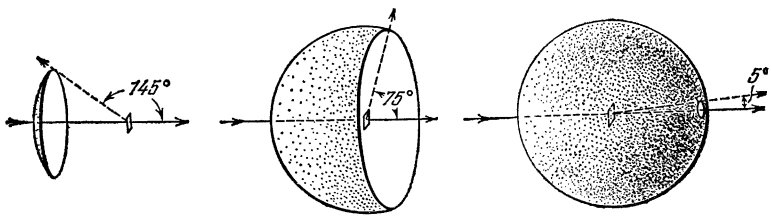


Рис. 32.13. Так как частицы рассеиваются во всех направлениях, то они распределяются по поверхности сферы. Когда мы подсчитываем все те частицы, которые рассеялись на углы, превосходящие заданный угол θ, то мы считаем частицы, которые попадают внутрь «шапки» или сегмента сферы. Показаны сегменты для θ=145°, 75°, 5°. N_θ есть число частиц, рассеянных в пределах соответствующего сегмента.

измерить число N_θ α-частиц, рассеянных на углы, превосходящие определенный угол θ, мы можем экспериментально установить, производится ли рассеяние кулоновской силой. Другая сила могла бы создать такое же число N_θ частиц, рассеянных на углы, превосходящие данный угол θ, но, как мы увидим, она не дала бы того же соотношения между N_θ и θ для многих углов. Поэтому, говоря точнее, опыт должен заключаться в измерении N_θ как функции от θ (рис. 32.13) и в сравнении экспериментальных результатов с теми, которые предсказываются на основании закона Кулона.

Для вычисления числа α-частиц, которые ударяются не дальше определенного расстояния b от центра атома, мы воспользуемся тем фактом, что пучок рассеивается равномерно по всей площади атомной мишени. Так как число α-частиц, нацеливаемых на некоторую малую площадку атомной мишени, равно числу частиц, нацеливаемых на любую другую площадку равной площади около того же атома, то число α-частиц, проходящих не дальше, чем на расстоянии b от данного ядра, пропорционально площади круга радиусом b (рис. 32.14). Эта площадь равна πb^2. Следовательно, число α-частиц, которые рассеиваются на углы, превосходящие угол θ, пропорционально b^2.

Но мы знаем, как b связано с θ. Пользуясь графиком зависимости b от θ, мы можем построить график зависимости b^2 от θ. Так как число частиц, рассеянных на углы, превосходящие θ, пропорционально b^2, то график зависимости b^2 от θ и график зависимости N_θ от θ должны быть одинаковы (за исключением масштабного множителя по вертикальной шкале). Этот график представлен на рис. 32.15.

Теперь мы в состоянии провести опыт для экспериментальной проверки модели Резерфорда. Сосчитав число α-частиц, рассеянных из пучка по разным направлениям, мы можем выяснить экспериментально, согласуется ли число N_θ α-частиц, рассеянных по всем возможным углам, превосходящим θ, с теоретическим графиком. Тщательные опыты по угловому распределению произвели Гейгер и Марсден (1913 г.). Некоторые из их результатов показаны на рис. 32.15. В пределах точности измерений экспериментальные точки ложатся на кривую, вычисленную в предположении, что сила является кулоновской.

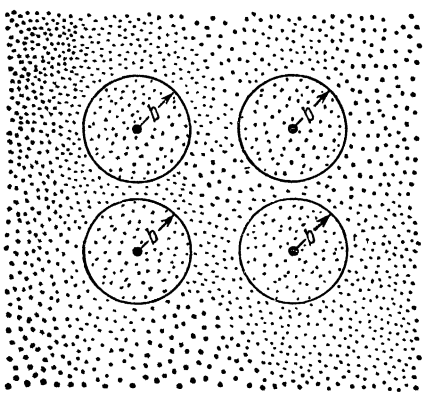


Рис. 32.14. Каждый атом подобен мишени для стрельбы в цель. Альфа-частицы при бомбардировке атома равномерно распределены по всей площади мишени многих атомов. Поэтому число частиц, проходящих в пределах прицельных расстояний от 0 до b, пропорционально πb^2 — площади круга радиусом b.

Мы можем теперь сделать вывод, что рассеяние α-частиц является результатом действия кулоновской силы. Но для большей уверенности в этом заключении посмотрим, какой график зависимости N_θ от θ получится для другой силы. Легко вычислить траектории и найти соотношение между прицельным расстоянием и углом рассеяния для силы, которая равна нулю на больших расстояниях от центра атома, а затем быстро возрастает до больших значений, когда α-частица приближается к области, расположенной на определенном расстоянии от центра. Поэтому мы и выбрали для построения график зависимости N_θ от θ для такой быстро возрастающей силы. Эта кривая, показанная на рис. 32.16, столь отлична от кривой, получающейся для кулоновской силы, что ее явно нельзя считать совместимой с экспериментальными результатами Гейгера и Марсдена.

Вообще, допустив действие на α-частицы любой силы, мы можем вычислить для этой силы график зависимости N_θ от θ. Для каждой силы получается свой график, и обратно — силу можно определить по форме графика. Форма графика для наших экспериментальных результатов получается такая же, как для графика в случае кулоновской силы. Следовательно, именно эта сила действует на α-частицы.

Проверка резерфордовской модели, которую доставляют измерения углового распределения рассеянных α-частиц, является убедительным доказательством того, что рассеяние происходит в поле кулоновской силы вокруг ядра. Но это не единственное свидетельство правильности модели Резерфорда. Мы можем также воспользоваться зависимостью рассеяния от энергии α-частиц. Энергию потока α-частиц можно изменять, пропуская их через ряд слоев тонкой фольги. Число α-частиц при этом почти не изменяется, но их

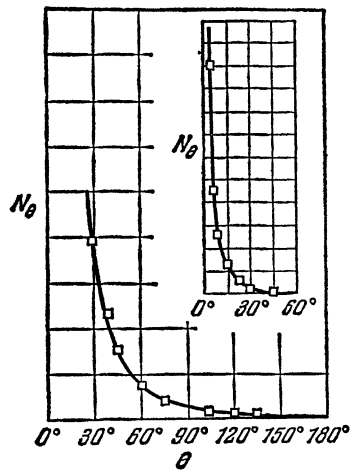


Рис. 32.15. График зависимости N_θ (числа частиц, рассеянных на углы, превосходящие θ) от θ. Кривая показывает, чего мы должны ожидать для кулоновской силы. Маленькими квадратиками представлены данные, собранные Гейгером и Марсденом в их опытах по рассеянию. На малом графике показана в другом масштабе кривая для малых углов.

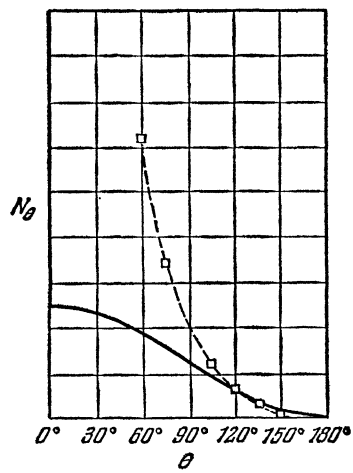


Рис. 32.16. Сплошная линия представляет собой кривую зависимости N_θ от θ для силы, которая внезапно резко возрастает с уменьшением расстояния. Пунктирная линия проведена через точки Гейгера и Марсдена. Кривые сдвинуты так, чтобы они совпадали для θ=120°. Никакой подгонкой нельзя их привести к совпадению.

энергия уменьшается; энергию α-частиц, прошедших через фольгу, можно измерить. Таким образом, мы можем проделать опыты по рассеянию с одним и тем же числом α-частиц, но с различными энергиями. Для α-частиц с меньшей энергией модель Резерфорда делает специальное предсказание об угловом распределении. Число больших отклонений должно возрасти. Это число обратно пропорционально квадрату энергии. При силах другого вида это число зависит от энергии иначе. Например, для круто обрывающейся силы рассеяние α-частиц одинаково при всех энергиях. Следовательно, можно отличить один вид силы от другого на основе изменений в угловом распределении, происходящих при изменении энергии α-частиц. Гейгер и Марсден провели также опыт для проверки модели Резерфорда и таким путем. Снова экспериментальные результаты оказались в согласии с моделью Резерфорда. Изменяя энергию

в 10 раз, они нашли, что число частиц, рассеянных в любой заданной области больших углов, возрастает обратно пропорционально квадрату энергии. Сила, вызывающая рассеяние, должна быть кулоновской силой.

Это поистине замечательный результат. Пользуясь в качестве зондов α-частицами, мы исследовали электрическое поле *внутри* отдельных атомов и нашли, что оно подчиняется закону обратной пропорциональности квадрату расстояния. Прежде всего, это означает, что положительный заряд атома действительно сосредоточен в значительно меньшем объеме, чем весь атом. Во-вторых, мы нашли доказательство того, что закон Кулона, который ранее мы провели экспериментально только вплоть до расстояний порядка сантиметров, в действительности справедлив до расстояний, которые значительно меньше атомных размеров. Как мы увидим в следующем разделе, те α-частицы, которыми мы зондируем области, наиболее близкие к ядру, и для которых получаются наибольшие углы отклонения, глубоко проникают внутрь атомов. Они возвращаются назад, когда оказываются на расстоянии всего лишь около 10^{-14} м от ядерного заряда, что составляет около одной десятитысячной атомного размера. Таким образом, известная нам область действия кулоновской силы расширяется в 10^4 раз в сторону очень малых расстояний.

32.4. Дальнейшие сведения о рассеянии

Из опытов по рассеянию можно получить еще и другие сведения о строении атома. Предположим, что источник α-частиц и детектор находятся в закрепленных положениях и что в качестве мишени применяются фольги из разных металлов (рис. 32.17). Предположим, что мы сменяем один за другим очень тонкие листочки различных элементов (золото, серебро, платина и т. д.), выбирая их толщину так, чтобы в каждой фольге было одинаковое число атомов на пути пучка, т. е. одинаковое число атомов на квадратный сантиметр поверхности фольги. Теперь хотя число рассеивающих центров (число ядер) во всех случаях одинаково, оказывается, что число частиц, рассеянных за данный промежуток времени, очень различается.

Этот результат легко понять, если допустить, что ядра разных элементов имеют различные электрические заряды. Для большего ядерного заряда сила, отклоняющая частицу от ее начального направления, больше. Поэтому если производить обстрел частицами с одной скоростью и при одном и том же прицельном расстоянии, то, как можно ожидать, эти частицы испытают большее отклонение (рис. 32.18). Подробные вычисления (закон Ньютона, закон Кулона и геометрия) показывают, что число α-частиц, рассеянных в пределах данного интервала углов, пропорционально квадрату заряда ядра. Следовательно, мы фактически можем сопоставлять с помощью наших опытов электрические заряды ядер различных элементов. Можно пойти еще дальше и вычислять абсолютное значение заряда, выражая его числом элементарных электрических зарядов.

Согласно другим данным, ядро атома меди имеет 29 положительных элементарных зарядов, ядро серебра — 47, ядро платины — 78. Из рассеяния α-частиц Чадвик нашел почти те же результаты.

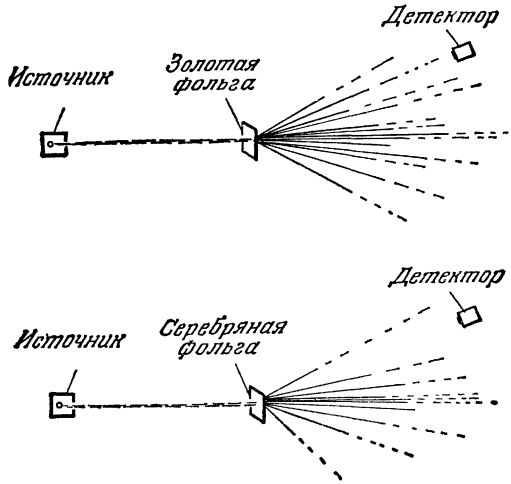


Рис. 32.17. Если применять фольги из различных металлов, но такие, чтобы в каждой содержалось одинаковое число атомов на 1 см^2 поверхности, то наблюдаемое рассеяние различно. Если использовать один и тот же пучок в течение равных промежутков времени, то число α-частиц, рассеянных внутри данного угла золотой фольгой, в 2,8 раза больше числа частиц, рассеянных внутри такого же угла серебряной фольгой.

Его экспериментальные измерения дали соответственно 29,3; 46,3 и 77,4±1,5%. Это значит, что заряды ядер должны содержать соответственно 29 или 30, 46 или 47, или между 76 и 79 элементарных зарядов; эти эксперименты — образец мастерства, позволяющего с помощью простого прибора извлекать важную информацию о строениии атомов.

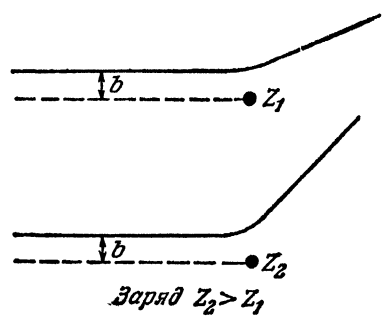


Рис. 32.18. Альфа-частицы с данной энергией и данным прицельным расстоянием отклоняются в большей степени ядром с бо́льшим зарядом.

Подобным же образом из других данных известно, что ядра водорода и гелия имеют соответственно один и два элементарных заряда (см. гл. 29 и 30). Опыты по рассеянию на водороде и гелии в газообразном состоянии (например, в камере Вильсона) подтверждают этот результат.

Число элементарных зарядов в ядре называется *атомным номером* элемента. Ранее в химии это число рассматривалось как порядковое число элемента в таблице химических элементов. Теперь для нас очевидно, что это число имеет совершенно ясный физический смысл. Как упоминалось, его можно измерить как с помощью

рассеяния α-частиц, так и другими методами. Все они согласуются друг с другом и придают новый смысл порядковому номеру в таблице элементов.

Так как атомы нейтральны, то атомный номер дает число положительных элементарных зарядов ядра и одновременно число окружающих его электронов.

Мы все еще не исчерпали всех сведений, которые можно получить из наблюдений по рассеянию. Мы уже несколько раз говорили, что радиус ядра должен быть значительно меньше радиуса атома. Но насколько он мал? Мы нашли экспериментально, что в золотой фольге рассеяние α-частиц от радиоактивного источника соответствует предсказаниям, сделанным на основании закона Кулона. Это значит, что эти α-частицы никогда не «ударяются» об ядро золота. Если бы это имело место, то в игру должны были бы входить силы, отличные от кулоновского отталкивания, и результирующее рассеяние, наверное, отличалось бы от вычисленного из закона обратной пропорциональности квадрату расстояния. Следовательно, ядро золота должно быть меньше того расстояния, на которое α-частица может приблизиться к центру ядра.

Альфа-частицы с той или иной энергией ближе всего подходят к ядру, когда они направлены прямо к его центру. (Они движутся тогда по прямой, пока их потенциальная энергия не станет равна их начальной кинетической энергии, а затем возвращаются по тому же пути обратно. См. раздел 32.2.) Обозначим через r_0 расстояние наибольшего сближения. Так как ядро золота имеет 79 элементарных зарядов, а α-частица — 2, то потенциальная энергия на расстоянии r_0 равна

$$U = k\frac{(79\text{ элем. зар.})\cdot(2\text{ элем. зар.})}{r_0} = (3{,}6\cdot 10^{-25}\text{ Дж}\cdot\text{м})\frac{1}{r_0},$$

поскольку $k = 2{,}3\cdot 10^{-28}$ Н·м^2/(элем. зар.)^2.

С другой стороны, α-частицы из полониевого источника имеют скорость $1{,}6\cdot 10^7$ м/с и массу $6{,}62\cdot 10^{-27}$ кг (см. гл. 30). Следовательно, их кинетическая энергия равна

$$mv^2/2 = 8{,}5\cdot 10^{-13}\text{ Дж}.$$

Приравняв приращение потенциальной энергии начальной кинетической, получаем

$$r_0 = 4{,}2\cdot 10^{-14}\text{ м}.$$

Таким образом, мы можем утверждать, что радиус ядра золота определенно меньше $4{,}2\cdot 10^{-14}$ м.

Аналогичные результаты получаются для ядер других элементов. Следовательно, опыты с α-частицами подкрепляют гипотезу Резерфорда, что ядро представляет собой крошечную, но тяжелую крупинку материи.

32.5. Трудности

Оглядываясь назад на то, что мы узнали в этой главе, мы имеем все основания быть довольными нашим глубоким проникновением в недра атома. Модель Резерфорда, описывающая атом как очень малое, но массивное положительно заряженное ядро, окруженное некоторым числом электронов, представляется в основном правильной. К тому же мы узнали, как измерить заряд ядра и как оценить по крайней мере верхний предел его «радиуса». Узнав заряд ядра, мы одновременно узнали число электронов в атоме.

И все же, по мере продолжения исследований, наше удовлетворение омрачается трудностями объяснения новых наблюдений. Предположим, например, что при попытке определения размеров ядра мы бомбардируем его все более быстрыми α-частицами. Расстояние наименьшего сближения будет уменьшаться. Когда оно станет меньше радиуса ядра, то должны будут появиться отклонения от простых законов рассеяния. Так как именно те частицы, которые ближе всего подлетают к ядру, испытывают наибольшие отклонения, то теоретическое распределение рассеяния должно переставать оправдываться прежде всего при наибольших углах. Это, однако, не всегда находится в согласии с наблюдениями. Отклонения от закона рассеяния происходят при достаточно высоких энергиях α-частиц, но когда это имеет место, то часто это относится как к малым, так и к большим углам.

Еще более серьезный изъян в модели Резерфорда становится очевидным, как только мы начнем рассматривать поведение электронов. По представлению Резерфорда, в атоме электроны движутся вокруг ядра подобно планетам вокруг Солнца. Действительно, находясь под действием кулоновской силы, они могут избежать немедленного падения на ядро, только непрерывно обращаясь вокруг него. Это движение есть ускоренное движение и поэтому должно сопровождаться испусканием электромагнитных волн. Но электромагнитные волны уносят с собой энергию. Таким образом, подобно спутнику Земли, который теряет энергию в атмосфере, электроны должны описывать вокруг ядра спираль. Представив себе, что электроны движутся подобно планетам, мы только продлили им время падения. Если бы электрон начинал падать из состояния покоя во внешней части атома, то он должен был бы упасть на ядро за время около 10^{-17} с; электрону же, движущемуся по спирали и излучающему свою энергию в окружающее пространство, потребуется около $2 \cdot 10^{-11}$ с, чтобы дойти до ядра. Такое время слишком коротко для того, чтобы атом мог быть устойчивым при тех размерах, которые нам известны. Следовательно, модель Резерфорда несовместна с тем, что мы знаем о процессе электромагнитного излучения.

Атомы испускают свет, и механизм этого излучения должен быть связан с ускоренным движением заряда в атоме. Следовательно, вся наша картина атома осложняется противоречивыми требованиями. Испускание света совместимо с моделью Резерфорда, но

оно разрушает эту модель, потому что все атомы благодаря сближению электронов с ядром должны были бы сжаться до размеров ядра. Атом должен был бы иметь электроны прикрепленными к ядру после их падения на него. Но это находится в прямом противоречии с данными о рассеянии α-частиц и о размерах атомов в том виде, как они себя проявляют в столкновениях в газах и в их упаковке в твердых телах и жидкостях.

Чем больше мы вникаем в эти вопросы, тем более мы убеждаемся в существовании серьезных трудностей.

Рассмотрим для простоты атом водорода, состоящий из одного протона и одного электрона. Частота света, испускаемого атомом, должна быть связана с числом оборотов в секунду электрона вокруг ядра. Но период обращения зависит от диаметра орбиты, так же как в случае планет в солнечной системе (гл. 21). Электроны, обращающиеся по меньшей орбите, обладают более коротким периодом и, следовательно, должны испускать свет более высокой частоты, чем электроны, обращающиеся по орбитам бóльших размеров.

По мере того как электрон испускает свет, его энергия должна уменьшаться. Следовательно, диаметр его орбиты должен уменьшаться, частота испускаемых волн должна возрастать. Источник света содержит огромное число атомов, и многие из них одновременно испускают свет. Некоторые из этих атомов находятся на одной стадии процесса испускания света, а некоторые — на другой. Следовательно, источник должен испускать свет практически всех частот. Таким образом, например, газообразный водород, светящийся с помощью электрического разряда, должен испускать непрерывный световой спектр. В противоположность этому предсказанию, спектральный анализ свечения водорода обнаруживает ряд резких «линий», т. е. ряд отдельных длин волн или частот (гл. 7).

Эти и другие затруднения нельзя устранить одним только пересмотром модели атома. Для того чтобы понять атом и его свойства, необходимо революционное изменение всех наших основных физических понятий. Новая физика, рожденная этой революцией, составит предмет следующих глав. В этой новой физике атом Резерфорда реабилитируется. Остается крошечное, но массивное заряженное ядро. То же относится и к электронам, которые распределяются на гораздо больший атомный объем. Изменения претерпевает самая основа динамики. Ньютоновская механика должна быть заменена более тонкой квантовой механикой — механикой, которая как частный случай включает механику Ньютона, являющуюся приближением, достаточно хорошим для мира крупных движений, но явно непригодным для атомного мира.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Предположим, что у вас имеется большое количество маленьких стальных шариков, которыми вы можете поочередно стрелять по различным мишеням. Вы не можете видеть мишени непосредственно, но можете наблюдать траектории шариков до и после столкновения. В каждом из приведенных ниже случаев скажите,

что вам известно о мишенях на основании поведения шариков. (Все шарики выстреливаются по одному направлению.)

а) Все шарики отскакивают от мишени под углом отражения, равным углу падения.

б) Все шарики отскакивают назад, но без определенной связи между углом отражения и углом падения.

в) Практически все шарики проходят сквозь мишень, но некоторые в ней застревают.

г) Все шарики застревают в мишени.

д) Траектории всех шариков пересекаются в одной точке перед мишенью.

2. Чтобы получить более ясное представление о толщине золотой фольги, использованной в опытах по отклонению α-частиц, описанных в разделе 32.1, определите число листочков этой фольги, которые, будучи уложены в стопу, дадут толщину страницы этой книги.

3. Один квадратный метр серебряной фольги имеет массу $5 \cdot 10^{-3}$ кг.

а) Найти его толщину. (Плотность серебра составляет $1 \cdot 10^4$ кг/м^3.)

б) Масса атома серебра равна $1{,}8 \cdot 10^{-25}$ кг. Найти длину ребра «кубика», занимаемого одним атомом.

в) Выразить толщину фольги числом укладывающихся на ней атомных «кубиков».

4*. На чем основано ваше утверждение, что отклонение α-частиц на большой угол при прохождении через тонкую золотую фольгу происходит в результате только одного столкновения? (Раздел 32.1.)

5*. Какими главными характерными чертами должна обладать модель атома, чтобы она могла объяснить особенности отклонения α-частиц при прохождении сквозь золотую фольгу? (Раздел 32.1.)

6*. Что такое угол рассеяния? (Раздел 32.2.)

7. В опыте с рассеянием на золотой фольге четыре α-частицы из 10^4 рассеиваются на углы, превышающие 5°.

а) Сколько частиц будет рассеиваться на углы, превышающие 5°, если удвоить толщину фольги?

б) Если сделать толщину фольги в тысячу раз большей?

8. Пучок α-частиц из полония падает нормально на золотую фольгу. Измерения показывают, что некоторые α-частицы рассеиваются под углом 3°, т.е. $5 \cdot 10^{-2}$ радиан. Альфа-частицы обладают энергией $8{,}5 \cdot 10^{-13}$ Дж, что соответствует скорости $1{,}6 \cdot 10^7$ м/с.

а) Какую добавочную скорость Δv надо им сообщить под прямым углом к начальной, чтобы вызвать указанное изменение направления?

б) Сколько времени требуется для прохождения α-частицы сквозь один атом золота в фольге?

в) Каково среднее ускорение одной из α-частиц, если все ее отклонение происходит при пересечении одного атома золота?

9*. Почему нельзя установить соотношение между θ и b непосредственно из опытов Резерфорда по рассеянию α-частиц? (Раздел 32.3.)

10*. Каким соотношением связано с прицельным расстоянием b число частиц N_θ, рассеянных под всеми углами, превышающими θ? (Раздел 32.3.)

11*. Что можно утверждать относительно электрического поля в атоме золота на основании результатов опытов по рассеянию? (Раздел 32.3.)

12*. Если бы α-частицы, приближающиеся к ядру с некоторым прицельным расстоянием b, рассеивались под углом 90°, то в каком интервале углов рассеивались бы α-частицы, приближающиеся к ядру с меньшим прицельным расстоянием? (Раздел 32.3.)

13. Представим себе установку, в которой 1000 стальных шариков могут упасть сквозь круглое отверстие радиусом 5 см и равномерно распределиться по площади круга (рис. 32.19). В центре отверстия укрепляется стальной конус, образующая которого наклонена под углом 45° к основанию, имеющему радиус 2 см. Сколько шариков из 1000 отклоняется вбок прежде чем они достигнут отверстия?

14. Острие конуса задачи 13 спилено, после чего образовалась площадка радиусом в 1 см, параллельная основанию (рис. 32.20).

а) Сколько шариков из 1000 будет отклонено назад и сколько вбок?

б) Построить график зависимости угла рассеяния θ от прицельного расстояния b, отсчитанного от центра отверстия.

в) Построить график зависимости N_θ (числа шариков, рассеянных на углы, превышающие θ) от θ.

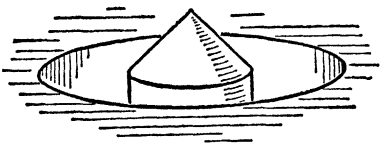


Рис. 32.19. К задаче 13.

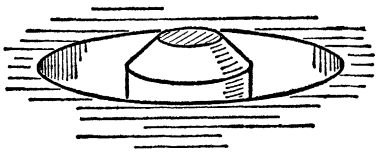


Рис. 32.20. К задаче 14.

15. а) Для построения кривой зависимости b от θ для обрывающейся силы *) начертите достаточно большой круг, изображающий плоскость, пересекающую твердую сферу, и определите углы рассеяния для различных прицельных расстояний. (Предположите, что угол отражения шарика, ударяющегося о поверхность, равен углу падения. Почему?)

б) По вашей кривой зависимости b от θ постройте график зависимости N_θ от θ и сравните его с рис. 32.16.

в) Объясните, почему эта взаимосвязь не зависит от энергии частиц, обстреливающих сферу.

16. Из графика на рис. 32.15 определите отношение числа частиц, рассеянных на углы, бóльшие 15°, к числу частиц, рассеянных на углы, бóльшие 22,5°.

17*. Во сколько раз ближе может подойти α-частица данной энергии к центру ядра атома алюминия, чем к центру ядра атома золота? (Раздел 32.4.)

18*. Насколько близко к центру ядра атома алюминия может подойти α-частица из полония? (Раздел 32.4.)

19*. Который из законов сохранения используется для вычисления расстояния наибольшего сближения? (Раздел 32.4.)

20. Проведены три опыта с одинаковыми пучками α-частиц, одинаковыми счетчиками в одинаковых положениях, но с различными мишенями в виде фольги. Для подсчета частиц было расположено относительно каждой мишени и пучка пять счетчиков. Время, в течение которого проводился счет, было одинаково во всех трех опытах. Листки фольги были выбраны так, что пучок, независимо от выбора мишени, проходил через одинаковое число атомов на квадратный сантиметр. Результаты, представленные в табл. 32.1, дают число частиц, рассеянных

ТАБЛИЦА 32.1

Число сосчитанных частиц

Угол рассеяния	Мишень 1	Мишень 2	Мишень 3
30°	2790	35 920	102 810
60°	346	4 451	12 760
90°	100	1 288	3 685
120°	39	496	1 423
150°	14	187	532

в пределах одинаковой ширины интервала углов рассеяния. Например, счет при 30° включает все частицы, рассеянные в любом направлении в интервале

*) Сила, которая на некотором конечном расстоянии от ее источника делается равной нулю. *(Прим. ред.)*

между 29° и 31°; счет при 60°— все частицы в любом направлении в области между 59° и 61°, и т. д.

а) Постройте для каждой мишени график зависимости числа рассеянных частиц от угла рассеяния. (Постройте все три графика в одной системе координат.)

б) Мишень 1 была из алюминия. Из чего были другие мишени?

21. а) Объясните, почему сила тяготения между α-частицей и ядром золота оказывает малое влияние на рассеяние α-частиц золотом.

б) Чему равно отношение электрической силы, действующей на α-частицу, к силе гравитационного притяжения, когда расстояние между α-частицей и ядром золота равно 10^{-14} м? Когда оно равно 10^{-13} м?

22. Альфа-частица, кинетическая энергия которой равна 10^{-12} Дж, рассеивается ядром золота.

а) Чему равно наименьшее возможное расстояние между ними при их сближении?

б) Чему должно быть равно прицельное расстояние, для того чтобы α-частица приблизилась на это расстояние?

в) Насколько близко подойдет протон с той же энергией? Нейтрон?

23. В одном опыте по рассеянию пучок протонов ударяется о золотую мишень. Во втором опыте применяется пучок дейтонов (атомная масса 2, атомный номер 1). Кинетическая энергия частиц одинакова в обоих пучках. Сравните наименьшее расстояние сближения с ядрами золота для этих двух пучков.

24. а) Какая доля энергии α-частицы теряется при лобовом столкновении с электроном? (Масса α-частицы примерно в 7200 раз больше массы электрона.)

б) Вычислите приближенно, сколько таких столкновений должно произойти, чтобы энергия α-частицы уменьшилась на 1%.

25. Альфа-частица, скорость которой составляет 10^7 м/с, рассеивается покоящимся ядром золота под углом 60°. Предположим, что ядру золота передается настолько малая кинетическая энергия, что скорость α-частицы после рассеяния остается такой же, какой она была раньше.

а) Какой импульс передается атому золота?

б) Какая скорость сообщается атому золота?

в) Какая кинетическая энергия сообщается атому золота?

г) Приемлемо ли исходное допущение? Объясните.

26. а) Если расстояние наибольшего сближения для α-частицы в задаче 25 составляло 10^{-13} м, то какова была ее скорость в точке наибольшего сближения?

б) С какой скоростью двигалась она по направлению к ядру в этой точке?

27. В атоме водорода электрон находится в среднем на расстоянии $5 \cdot 10^{-11}$ м от положительно заряженного протона.

а) Определить среднюю силу взаимодействия между электроном и протоном.

б) Если бы атом помещался между пластинами установки в опыте Милликена (см. раздел 27.7), сколько 90-вольтовых батарей понадобилось бы включить последовательно с пластинами, чтобы разорвать атом на части?

28*. Что предсказывает резерфордовская модель атома для величины отношения частоты света, испускаемого атомом водорода после уменьшения радиуса электронной орбиты вдвое, к начальной частоте? (Раздел 32.5.)

ГЛАВА

33 ФОТОНЫ И ВОЛНЫ ВЕЩЕСТВА

Используя модель Резерфорда, классическая физика дошла до пределов своих возможностей в объяснении свойств атома. Трудности, рассмотренные в конце предыдущей главы, ясно показали, что продвинуть нас в этом вперед могут только принципиально новые идеи, относящиеся к основам физики. Но трудности, вскрытые моделью Резерфорда, отнюдь не явились первым указанием на то, что в физике необходимы коренные изменения. В конце истекшего столетия успехи классической волновой теории света были омрачены затруднениями, сходными с теми, с которыми встретилась модель Резерфорда в отношении законов динамики. Новая физика началась с таких новых открытий, как фотоэлектрический эффект, рентгеновские лучи и радиоактивность. Хотя новой физике было суждено произвести революционные изменения в динамике, но первые признаки необходимости этих изменений были обнаружены в явлениях излучения света и его взаимодействия с веществом.

Остановимся на опытных данных, которые заставили тщательно пересмотреть волновую теорию света. Далее мы увидим, как идеи, возникшие из этих исследований, в конечном счете привели к расширению ньютоновской динамики. Тогда станет ясно, насколько действительно революционными являются утверждения новой физики и в то же самое время в какой мере новая физика оказывается продолжением физики прошлого, успешно сохранившим ее великие успехи.

33.1. Зернистость света

Волновая теория достигла убедительных успехов в описании всех видов электромагнитного излучения: от радиоволн, измеряемых километрами, вплоть до световых волн, которые в наших микроскопах дают изображение мельчайшей клетки. Опишем теперь те опыты, в которых волновая картина была подвергнута новому виду проверки. Некоторые из этих опытов будут описаны так, как они действительно проводились, другие же — только как схематическая иллюстрация того, что могло бы быть сделано.

Эта проверка заключалась в выяснении отношения света к атомному строению вещества. В опыте Милликена, рассмотренном с совсем другой целью в разделе 27.5, рентгеновские лучи (иначе говоря, свет высокой частоты) выбивают отдельные электроны с поверх-

ности маленьких пылинок вещества. Многократно ставился опыт, сходный с милликеновским: рентгеновские лучи или ультрафиолетовый свет дуговой лампы падал на большое число пылинок вещества, «дрейфующих» между парой заряженных пластин (рис. 33.1). Ставился вопрос: Каких предсказаний следует ожидать от волновой теории света относительно выбрасывания электронов из мельчайших пылинок и как согласуются эти предсказания с действительностью.

Когда свет, т. е. электромагнитное излучение, освещает пылинку вещества, электрическое поле световой волны производит давление на электроны в атоме. Если электрон выбивается из атома, то это должно быть результатом действия электрического поля, которое нарушает его нормальное движение внутри атома. (Попробуйте выяснить, почему *магнитное* поле не имеет значения для выбивания электрона.)

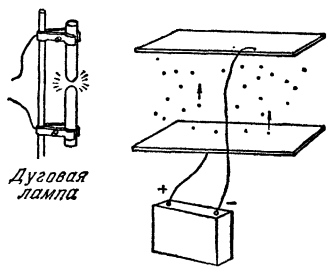


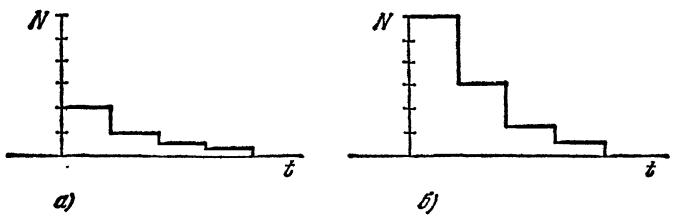
Рис. 33.1. Свет от электрической дуги освещает большое число пылинок металла. Эти пылинки были предварительно заряжены и уравновешены между заряженными параллельными пластинами; они представляют собой не что иное, как большое скопление «милликеновских капель», но только металлических. Когда свет ударяется о пылинки, они теряют электроны. При каждой потере электрона пылинка начинает двигаться вверх по направлению к отрицательной пластине, так как теперь ее положительный заряд больше, чем это требуется для уравновешивания ее веса. Наблюдения показывают, что в разных местах освещенной области пылинка внезапно начинает двигаться вверх.

Хотя электромагнитное поле быстро изменяется со временем, в определенный момент оно имеет одинаковую напряженность во всех точках вдоль фронта электромагнитной волны. Следовательно, когда такая волна встречает атом, она начинает раскачивать электроны. Так как волна однородна в большой области пространства, она раскачивает электроны в маленьких пылинках вещества почти в одно и то же время одинаковым образом во всей области между пластинами. Если освещение слабое, то световой волне потребуется значительное время, чтобы раскачать несколько электронов до их полного освобождения. Далее, так как в тождественных атомах имеется много электронов, на которые электрическое поле световой волны действует одинаковым образом, то большое число электронов должно быть выброшено почти одновременно. Поэтому можно ожидать, что при достаточно слабом освещении будет наблюдаться промежуток времени, в течение которого ничего не будет происходить. Но затем одновременно по всему фронту светового пучка отдельные пылинки должны начать терять электроны. При более сильном освещении потеря должна наступить раньше, при более слабом освещении — позже.

Действительность дает результат, разительно отличающийся от этих предположений. Вместо определенного времени ожидания, после которого все пылинки начинают терять электроны, оказывается, что одна или две пылинки сразу могут скакнуть к верхней плас-

тине. Эти скачки показывают, что пылинки уже лишились электронов и движутся теперь, подобно милликеновским шарикам, под действием электрического поля между пластинами. Первые пылинки, совершающие скачок, могут быть обнаружены в произвольном метре светового пучка. После них совершают скачки другие пылинки — одна здесь, другая там, без какого-либо определенного порядка. Через короткий промежуток времени большинство пылинок утратит электроны, но в совершенно случайном порядке. Некоторые из них потеряют несколько электронов; несколько пылинок не лишатся ни одного электрона.

Если освещение становится более слабым, то период ожидания в некоторых случаях не удлиняется. При более сильном освещении этот период иногда не становится короче. Можно сделать пылинки



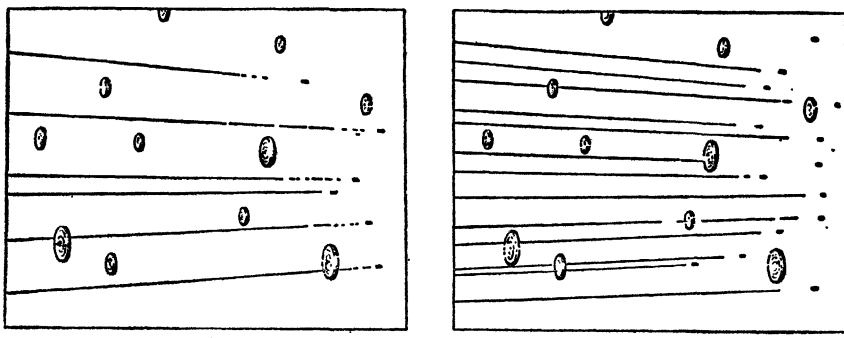
а) б)

Рис. 33.2. В приборе, изображенном на рис. 33.1, мы внезапно включаем свет и ждем момента, когда начнет двигаться вверх первая пылинка. Это время отмечается. Графики показывают результаты многих подобных измерений: N — число включений источника света, при которых за данный промежуток времени происходил первый скачок; t — время, по истечении которого происходил первый скачок. *а)* Опыт был проведен со слабым светом. *б)* Опыт с более сильным светом. Все остальное оставалось неизменным. В среднем сильный свет выбрасывает электроны быстрее, чем слабый свет, но даже для слабого света некоторые электроны выбрасываются без заметного запаздывания Более совершенные опыты показывают, что минимальное время запаздывания меньше 10^{-8} с.

сколь угодно похожими друг на друга, можно применить предельно тождественные шарики, и все же отдельные части ведут себя поразному (рис. 33.2). Только средние статистические данные соответствуют нашему ожиданию. В среднем пылинки теряют электроны в одной части однородного светового пучка так же, как и в другой. В среднем сильным освещением удаляется за одну секунду больше электронов чем слабым; но это относится лишь к среднему значению для большого числа пылинок во многих опытах. В каждом отдельном акте взаимодействия является делом случая, насколько долго приходится ожидать реакции пылинки. В какой-либо один момент даже самое слабое освещение вызовет немедленную потерю электрона; в какой-либо другой момент даже в самом мощном пучке света понадобится довольно длительное ожидание для того, чтобы отметить первый выброшенный электрон. Все эти результаты опровергают наше хорошо обоснованное представление о волновом фронте, всюду однородном и движущемся в одинаковой фазе, смещающем электроны в каждой пылинке в результате кумулятивного действия переменного электрического поля.

Предсказания, вытекающие из нашей картины электромагнитных волн, не соответствуют фактам, но нам известна другая простая

модель, давно заброшенная, которую можно сейчас воскресить. Предположим, что вместо ровного плоского фронта волны пучок света представляет собой собрание быстро движущихся мельчайших частиц, подобных потоку пуль или песка, увлекаемого струей воздуха (рис. 33.3). В таком пучке в пылинку будет только случайно попадать одна частица света. Попадания будут происходить то здесь, то там — по всему пучку. Момент, когда произойдет первое попадание в пылинку, также будет делом случая. Даже для слабого



а) *б)*

Рис. 33.3. Весьма велико сходство между пулями, беспорядочно обстреливающими ряд мишеней, и пучком света, вырывающим электроны. *а)* Если залп производится малым числом ружей, то «пучок» пуль слаб. В большинстве таких случаев приходится долго ожидать прямого попадания. Но случайное удачное попадание может последовать сразу за началом стрельбы. *б)* При большом числе стреляющих ружей получается интенсивный «пучок». Попадания становятся более частыми, и в среднем приходится меньше ожидать первого попадания. Может, однако, случиться, что первое попадание может произойти не раньше, а даже позже, чем, первое попадание в слабом пучке. Какая именно мишень будет поражена первой, конечно, является делом случая.

пучка, когда за секунду данную площадку пересекает всего несколько световых частиц, может случиться, что такая частица столкнется с какой-либо пылинкой сразу же после включения света. С другой стороны, в сильном пучке плотный «дождь» частиц может в течение заметного времени не дать ни одного прямого попадания. Только в среднем может подтвердиться, что в сильном пучке очень скоро произойдет первое попадание, за которым в быстрой последовательности произойдут остальные. Такая картина дает точное и убедительное описание того, каким путем свет действительно выбивает электроны из пылинок вещества.

Согласно этой картине свет состоит из зерен. Он распространяется в виде небольших порций, которые названы *фотонами*. Фотоны — это снарядики, или световые частицы; попадая в пылинку, они могут выбить из нее электрон.

Описанный опыт по прямому обнаружению выбивания электронов световым пучком не представляет единственного способа обнаружения зернистого характера пучка света. На фотографическую пластинку нанесен слой очень малых кристаллов, в каждом из которых под ударами света могут произойти такие изменения, что

кристаллики делаются способными чернеть под действием раствора—проявителя. Образование изображения происходит не равномерно, а в результате случайного накопления почерневших зерен. Этот процесс слишком сложен для того, чтобы послужить единственным обоснованием корпускулярной природы света (например, по той причине, что зерна пленки различаются своим атомным строением), но он дает подтверждение нашему истолкованию результатов прямого опыта по выбиванию электронов. С помощью других устройств, основой действия которых является выбивание электронов, можно наблюдать, как точка за точкой свет образует изображение. В очень слабом свете последовательные «удары» столь медленно следуют друг за другом, что глаз легко может следить за ним. Любое изображение вырисовывается медленно по мере накопления случайных ударов, которые постепенно накапливаются в большом числе там, где падает много света, и в малом числе там, где освещение слабое. Только там, где о каждую маленькую площадку ударяется очень много световых частиц, т. е. в сильном пучке за достаточное время, изображение становится столь плотным, что исчезают всякие следы зернистого строения света.

33.2. Упорядоченность в случайности

Легко убедиться, что накопление отдельных событий, происходящих случайно, но так, что некоторые из них более вероятны, чем другие, приводит в результате к образованию упорядоченной и слаженной картины. Нельзя моделировать реальный опыт, в котором осмысленный результат возникает из того, что представляется последовательностью полностью лишенных смысла и случайных явлений. Нельзя, например, имитировать бесчисленное множество зерен света, создающих хорошее фотографическое изображение, но можно вместо этого рассмотреть грубую картину, образуемую меньшим числом отдельных событий.

Представим себе, что бомбардировка некоторой приемной пластины пучком света дает картину полос, показанную на рис. 33.4, *а*. На те части фотографической пластинки, которые оказались темными, должно было упасть больше «зерен» света, чем на те, которые остались более светлыми. Получившуюся картину можно представить с помощью графика (рис. 33.4, *б*), где ордината пропорциональна полному числу ударов световых частиц, попадающих в соответствующую область на рис. 33.4, *а*. Приготовим теперь набор карточек, помеченных буквами L, C и R, имея в виду левую, центральную и правую полосы этой картины. Карточки изготовлены в числе, пропорциональном полному числу ожидаемых ударов, например, три карточки, обозначенные буквой L, одну, обозначенную буквой C, и шесть, обозначенных буквой R. Такое соотношение чисел хорошо выражает предполагаемую вероятность попадания в каждое из отмеченных нами мест. Теперь хорошо перетасуем все карточки и наугад вытащим одну из них. Прочитаем, что на ней написано, присоединим к остальным, снова перетасуем и снова вытащим одну

карточку. Проделаем это много раз. При каждом вытаскивании будем записывать букву, стоящую на карточке, и будем представлять результат каждого такого испытания, наращивая на определенную величину высоту соответствующей вертикальной полосы на графике, подобном построенному на рис. 33.4, *б*. Сначала, за исключением весьма редких случаев, не будет заметно ясных признаков нашей картины. Позже картина начнет проявляться, и если вы достаточно терпеливы, чтобы произвести несколько тысяч испытаний, то картина, возникающая путем такого подсчета случайных явлений, почти наверное будет столь же правильной, как чертеж, который вы бы обдуманно сделали. Результаты одного такого опыта представлены на рис. 33.4, *в*, а опыт, который вы сами проделаете, даст вам еще лучшее представление о том, как могут возникнуть подобные картины.

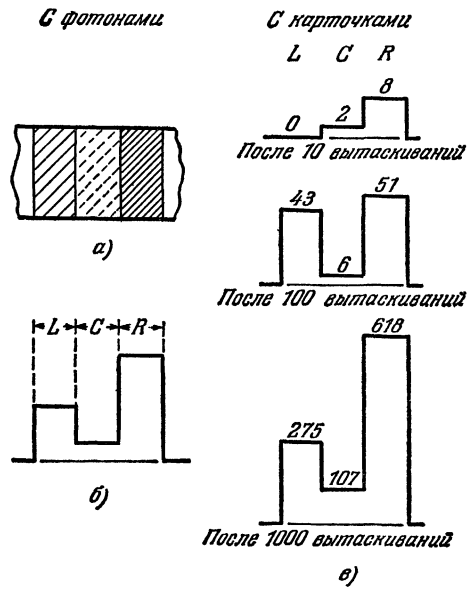


Рис. 33.4. Образование картины случайных событий. *а*) Система светлых и темных полос, представляющая некоторую интерференционную картину. *б*) Распределение в ней интенсивности света. *в*) Графики результатов опытов по повторным вытаскиваниям карточек из колоды. Картины, полученные при возрастающем числе вытаскиваний, все более приближаются к картине, предсказываемой теорией вероятности, давая сначала беспорядочное распределение событий, не обнаруживающее никакого сходства с окончательным результатом. Обычный источник света дает картины интерференции в результате примерно 10^{12} или даже большего числа ударов фотонов в секунду.

Конечно, зерна света не карточки; в действительности мы проводим опыт не со светом, а используем закономерности случайности и вероятности событий. Но во многих опытах было доказано, что образование фотоизображений происходит количественно в точности по закономерностям, которым следуют результаты случайных вытаскиваний перетасованных карточек. С помощью этой модели мы получили как конечную правильную картину, которую можно наблюдать в действительности, так и беспорядочно колеблющиеся неверные результаты, если число наблюдений мало.

В этом и заключается причина того, что изображения тонких деталей, схватываемые телевизионной камерой или фотоаппаратом, могут образоваться только при достаточном освещении. Строго необходимый минимум света определяется зернистостью света. Как бы чувствителен ни был приемник, изображение не может быть получено, если не хватает световых частиц для образования ясного изображения. Поразительно, что эффекты, связанные с присущей

свету зернистостью, были обнаружены для глаза как раз при самом слабом свете, который человек может ощущать *).

Чувствительность наших глаз развита примерно так же, как и любых искусственных приемников света, работающих с линзами таких же размеров, какими обладает глаз, с таким же временем реакции и в той же области длин волн. Все эти приемники света по чувствительности очень близки к пределу световой энергии, установленному самой природой.

33.3. Зернистость и интерференция света

В опытах со слабыми источниками света обнаруживается влияние отдельных «зерен» света. Маленькие пакеты света попадают случайно то туда, то сюда, причем число их больше там, где выше интенсивность света, и меньше в тех местах, где свет более слабый. Эта зернистая природа света весьма отлична от нашего обычного представления о волнах. Может казаться, что она не имеет ничего

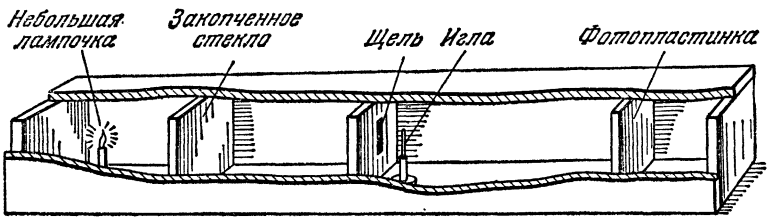


Рис. 33.5. Опыт Тэйлора, доказывающий, что правильная интерференционная картина получается даже в том случае, когда в каждый момент времени в приборе имеется только один фотон. Получились хорошие резкие полосы в области тени от иглы даже тогда, когда свет приходил от тусклого газового пламени сквозь такие густые фильтры, что требовалась трехмесячная экспозиция.

общего с интерференцией и дифракцией. Может ли статься, что волновые свойства, столь ясно проявляющиеся в опытах по интерференции, присущи только интенсивному свету, когда множество отдельных «зерен» света, каким-то образом взаимодействуя друг с другом, приводит к результату, подобному волне? Или, может быть, слабый свет также способен давать картины интерференции? 50 лет назад этот вопрос был подвергнут непосредственной проверке студентом Кембриджского университета Джоффри Тэйлором, впоследствии ставшим сэром Джоффри за долгую успешную работу в области физики.

Тэйлор установил в светонепроницаемом ящике небольшую лампочку, дававшую на фотографической пластинке теневое изображение иглы (рис. 33.5). Размеры он выбрал так, что дифракционные полосы вокруг изображения нити были хорошо видимы. Затем он стал уменьшать интенсивность света. Чтобы получать отчетливые изображения на пластинках, требовались все более и более длинные вы-

*) С. И. Вавилов впервые показал, что человеческий глаз способен «видеть» отдельные световые частицы (кванты). (*Прим. ред.*)

держки. Наконец он провел съемку с выдержкой, длившейся пару месяцев (рассказывают, что сам он в это время занимался парусным спортом). Даже на этой пластинке дифракционные полосы были совершенно отчетливы, хотя Тэйлор мог доказать, что при этом очень слабом свете в ящике в каждый момент времени находился только один фотон — один из световых пакетов. Таким образом, интерференция происходит даже с отдельными частицами света. Она осуществляется с каждым отдельным фотоном *).

Опыт Тэйлора — не единственный опыт, приводящий к такому выводу. Таких опытов много. В настоящее время фотоэлемент, приводящий в действие усилитель, может позволить отметить и даже услышать прибытие фотона. Интересно слушать щелчки, сигнализирующие о том, как отдельные фотоны вырисовывают дифракционную картину от двух щелей. Пока вы ожидаете и слушаете, эта картина создается фотонами, приходящими друг за другом. Так происходит во всех интерференционных опытах: фотоны проходят по одному. Таким образом, непосредственные экспериментальные данные принуждают нас поверить в то, что волновое поведение присуще отдельным фотонам.

Что мы понимаем под индивидуальным поведением отдельного фотона? Можно многое сказать по этому далеко не простому вопросу. На первое время удовлетворимся утверждением, что электромагнитная волна должна каким-то образом определять вероятность появления фотона. Где поле волны сильное, там вероятность найти фотон велика. Где поле исчезает, там фотоны совсем не появляются. При взаимодействии с фотоэмульсией или фотоэлементом ни один отдельный фотон не участвует в возникновении всей интерференционной картины в целом. Фотон ударяетя лишь в определенную точку этой картины. Но для любого фотона наиболее вероятно его попадание в такое место, где интерференционная картина наиболее интенсивна. Вероятность попадания в область с половинной интенсивностью в два раза меньше и т. д. Величины вероятности попадания для каждого фотона дают в точности картину интерференционных полос (ярких и темных полос). Следовательно, там, куда попало много фотонов, интерференционная картина вырисовывается лучше в результате накопления их действий.

33.4. Фотоэлектрический эффект

Где и когда ударяется фотон — дело вероятности этого события. С другой стороны, фотон *в каждый момент времени*, а не в среднем ведет себя подобно частице с определенной энергией и определенным количеством движения.

*) Тэйлор знал, что в ящике в данный момент времени находился только один (а часто и ни одного) фотон, потому что по энергии одного фотона и интенсивности света он мог найти число фотонов для любой данной длины пути светового пучка. Он нашел, что фотоны должны следовать один за другим на расстоянии, превышающем длину коробки. Следовательно, в коробке часто не оказывалось даже одного фотона. Вы сможете сами проделать такое вычисление после изучения следующего раздела.

Это непосредственно обнаруживается наблюдением выбивания электронов фотонами из отдельных атомов. На рис. 33.6 пучок фотонов, приходящий слева, попадает в газ, заполняющий камеру Вильсона. По мере прохождения пучка то там, то здесь фотон выбивает электрон из атома газа. В тех местах, откуда выходят электроны, образуются небольшие скопления водяных капелек. По мере прохождения пучок фотонов заметно ослабевает; действительно, ведь на каждый созданный электрон из светового пучка был удален один фотон. Это можно проверить, посылая поток фотонов столь глубоко в газ, что первоначальный пучок почти полностью поглощается. Энергия светового пучка переходит к газу. Значительная



Рис. 33.6. С помощью камеры Вильсона можно наблюдать поглощение фотонов одного за другим и вследствие этого ослабление пучка света. Фотоны проникают слева и поглощаются в газе атомами аргона. Фотоны выбивают электроны, вокруг которых образуются маленькие капельки воды, представляющиеся на фотографии белыми пятнышками. Отметьте сходство всех коротких «треков» фотоэлектронов. «Свет» в действительности представлял собой пучок рентгеновских лучей с длиной волны порядка 0,2 Å.

часть этой энергии появляется в виде кинетической энергии выбитых электронов.

Все электроны оставляют след почти одинаковой длины независимо от места, где начался след. Таким образом, все испущенные электроны должны обладать почти одинаковой энергией. В этом отношении все отдельные акты взаимодействия фотонов с электронами одинаковы. В частности, одинаковы и все фотоны, участвующие в этих актах. Более слабый пучок означает меньшее число фотонов, а не то, что фотоны обладают различной энергией. Если более глубоко изучить баланс энергии, то окажется, что энергия сохраняется в каждом отдельном акте, и мы снова получаем, что более слабый пучок означает только меньшее число фотонов.

Подобное исследование в камере Вильсона нельзя провести с фотонами видимого света. В опыте, показанном на рис. 33,6, применялись рентгеновские лучи, образующие пучок электромагнитного излучения с длиной волны, составляющей только несколько десятых ангстрема. При этой длине волны отдельные акты взаимодействия фотонов с электронами особенно наглядны. При рентгеновских лучах более короткой длины волны фотоэлектроны выбиваются сильнее и становится легче видеть единство природы отдельных актов взаимодействия.

Применение пучка ультрафиолетового света тоже позволяет проводить, хотя и не столь непосредственно, изучение выбрасывания

электрона из атома под действием света. Этот процесс называется фотоэлектрическим эффектом. Он может происходить на металлической поверхности, в жидкости или в отдельном атоме газа.

Для изучения фотоэлектрического эффекта можно воспользоваться простым устройством (хотя его нелегко сделать самому). Оно представляет собой стеклянный баллон, откачанный до высшей степени вакуума, с укрепленными внутри двумя малыми очень чистыми медными пластинками (рис. 33.7) и двумя проводами для электрических соединений с пластинками. Приложим между пластинками разность потенциалов в несколько вольт и направим свет на внутреннюю поверхность одной пластинки. Если освещать положительную пластинку, то в вакууме не появится тока, доступного измерению. Но если, наоборот, осветить отрицательную пластинку, то потечет ток. Очевидно, сквозь вакуум движутся электроны. Если прекратить освещение — ток исчезнет. Если снова включить пучок света, то сразу же без промедления пойдет ток; непосредственное измерение показало, что запаздывание в фотоэлектронной эмиссии (испускании электрона после облучения поверхности) во всяком случае менее 10^{-8} с. Ток невелик, но находится в легко измеримой области; медная пластинка площадью в несколько квадратных сантиметров при освещении прямыми солнечными лучами даст фотоэлектрический ток, измеряемый микроамперами. Ток возрастает и уменьшается пропорционально интенсивности света в очень широких пределах. Фотоэлектрические устройства, подобные нашему баллону, находят широкие практические применения — от автоматического открывания дверей до превращения в звук записи на кинофильме.

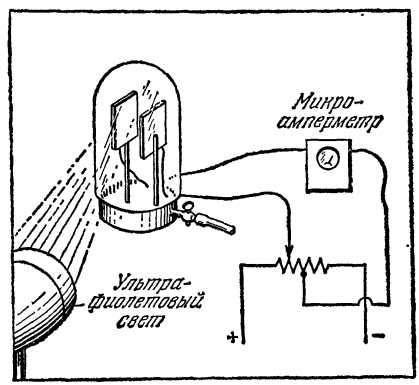


Рис. 33.7. Фотоэлемент. Два медных электрода вделаны в хорошо откачанный стеклянный баллон, и провода от них выведены наружу, как показано на рисунке. Цепь позволяет установить определенную разность потенциалов между пластинками; подвижный контакт присоединен к неосвещенной пластинке и позволяет сообщать ей положительный или отрицательный потенциал по отношению к освещенной пластинке.

Наш простой фотоэлемент подтверждает то, что мы уже знали: при падении света из поверхности вещества освобождаются электроны. Чем сильнее свет, тем больше число выбрасываемых электронов. Число выбрасываемых электронов пропорционально числу фотонов. Все это представляется разумным, но нас охватит изумление, если мы изменим длину волны применяемого света. Медный фотоэлемент не даст тока даже при самом сильном пучке красного или зеленого света; он будет работать только с ультрафиолетовым светом или светом еще более короткой длины волны.

Быть может, такой эффект получается только в меди? Попробуем другое вещество. Продолжим опыт с трубкой, в которой поверхности пластинок покрыты калием. Теперь с видимым синим светом фотоэлектрический ток получается, но красный свет его не дает. Порог чувствительности, как его называют, находится в зеленой области. (Для меди порог лежал между видимым и ультрафиолетовым светом.) Свет с длиной волны, несколько превышающий пороговое значение, не даст фототока, даже если он буквально заливает поверхность ярким потоком: с другой стороны, некоторый фототок потечет даже в самом слабом пучке света при длине волны, которая короче порогового значения.

Все вещества обладают фотоэлектрическими порогами. Пороговая длина волны зависит от природы вещества. Но здесь имеется и одна общая черта: для длинных волн фотоэлектрический эффект не имеет места, а для коротких волн — для света достаточно высокой частоты — он наблюдается. Никакая волновая модель не будет достаточна для объяснения этих результатов, но они хорошо согласуются с представлением о фотонах. Отдельный электрон выбивается из атома одним фотоном. Сила пучка определяется числом фотонов. Поэтому ток пропорционален интенсивности света. Но характер каждого столкновения фотона, его способность выбить электрон, вовсе не зависит от того, сколько имеется других фотонов. Свет с более короткой длиной волны представляется более действенным, чем с длинной. Любая поверхность будет испускать электроны, если о нее ударяются фотоны света, который окажется достаточно «синим»; только немногие поверхности будут испускать электроны под действием фотонов красной части спектра — они будут испускать электроны и под действием любого излучения с более короткой длиной волны. Для некоторых искусственных комбинаций, в частности для щелочного металла (цезия), растворенного вместе с кислородом в серебряной поверхности, порог находится в инфракрасной области; но металлы, подобные платине, не реагируют ни на какой свет, проходящий через стекло; только применение далекого ультрафиолетового света позволяет получить от таких металлов фототок.

33.5. Объяснение фотоэлектрического эффекта Эйнштейном

Мы смогли немного заглянуть в механизм фотоэлектрического эффекта. Мы теперь знаем, что он связан с какими-то фотоэлектрическими свойствами поверхности. Мы также знаем, что для него всегда требуется свет достаточно высокой, а не низкой частоты. Это приводит к предположению, что фотоны как-то различаются в зависимости от частоты. Единственно разумным допущением является то, что фотоны красного света отличаются от фотонов синего света. Фотоны должны заключать в себе свойства, которые проявляются как длина волны, когда световые волны интерферируют. Чтобы найти, каким образом частотная характеристика связана с представлением о фотонах, нужно сделать что-то новое. Мы должны выяснить, с какой энергией выбрасываются фотоэлектроны.

В установке, показанной на рис. 33.7, можно регулировать величину приложенной разности потенциалов. Мы получим максимальный фототок при определенном выборе поверхности и определенном освещении, сделав приемную пластинку слабо положительной по отношению к испускающей электроны. Дальнейшее повышение разности потенциалов не вызовет никакого увеличения фототока; очевидно, мы используем все выбрасываемые фотоэлектроны (рис. 33.8). Теперь можно понизить разность потенциалов и переменить ее знак, сделав испускающую пластинку положительной. Тогда электроны, стремящиеся покинуть пластинку, притягиваются к ней обратно; но фототок не исчезает. По-видимому, при выбрасывании фотоэлектронов светом некоторой части электронов сообщается энергия, достаточная для преодоления задерживающей разности потенциалов между пластинками. Наконец, по мере возрастания задерживающей разности потенциалов, при некотором определенном ее значении, ток прекращается. Даже более сильный свет (если длина волны остается неизменной) не вызовет никакого фототока. Ни один из фотоэлектронов не имеет достаточно энергии, чтобы пересечь снова эту задерживающую разность потенциалов между пластинками. Мы называем ее потенциалом отсечки (рис. 33.8).

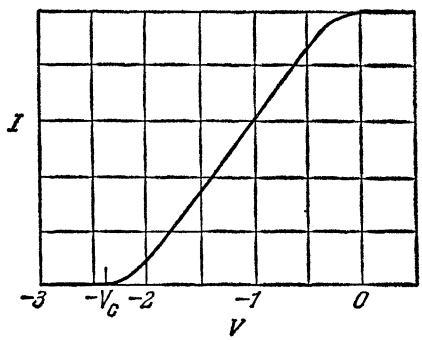


Рис. 33.8. Зависимость фотоэлектрического тока I от разности потенциалов V между пластинками для света данного вида. Заметьте, что ток не прекращается до тех пор, пока приемная пластинка не получит отрицательного потенциала порядка вольта. Эта величина представляет собой потенциал отсечки V_c

Потенциал отсечки V_c составляет средство изучения энергии, сообщаемой электрону в каждом отдельном акте испускания. Разность потенциалов отсечки, выраженная в джоулях на элементарный заряд, дает энергию, которую нужно отобрать от самых быстрых электронов, чтобы помешать им пройти путь от одной пластинки до другой. Поэтому она дает нам максимальную кинетическую энергию E, с которой испускаются такие фотоэлектроны:

$$E = 1 \text{ элем. зар.} \cdot V_c.$$

Используя потенциал отсечки, можно измерить максимальную кинетическую энергию электронов, испускаемых в опытах с пучками света различного цвета. Когда опыт производится с разностью потенциалов отсечки для одной длины волны, то оказывается, что фототок всегда можно восстановить, воспользовавшись светом более короткой длины волны. Это наблюдение показывает, что чем короче длина волны применяемого света, тем бо́льшую энергию фотоны могут сообщить выбрасываемым электронам. Можно измерить,

насколько именно больше, определяя потенциалы отсечки при все более коротких длинах волн.

Если графически представить результаты для ряда опытов с пучками света различного цвета, то получается простое и весьма важное соотношение. Оно представлено на рис. 33.9, где изображена зависимость максимальной кинетической энергии электрона от частоты (а не от длины волны) света *). Для какого-либо определенного вещества график представляет собой прямую с наклоном, который мы обозначим через h. Этот наклон h оказывается одинаковым для

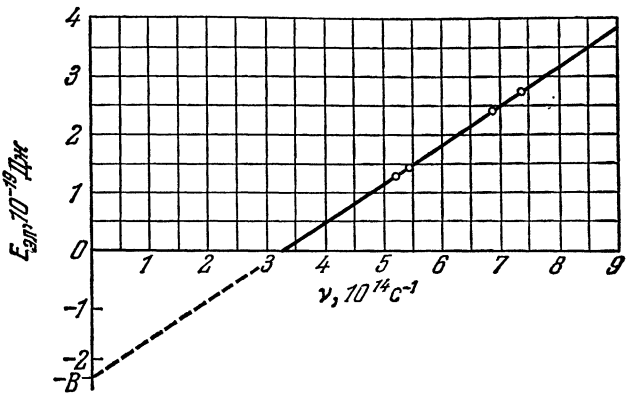


Рис. 33.9. Результаты измерений на установке, показанной на рис. 33.7, расширенные использованием различных источников света и светофильтров различных цветов. Приведена зависимость максимальной кинетической энергии E от частоты ν используемого света.

всех материалов. Только ордината B пересечения этой прямой с вертикальной осью изменяется при переходе от одного материала к другому. Следовательно, графики для всех веществ можно представить соотношением

$$E_{эл} = 1 \text{ элем. зар.} \cdot V_c = -B + h\nu,$$

где h — всегда одна и та же величина, B — постоянная для одного опыта, ν — частота света, соответствующая данному спектральному цвету.

Из последней формулы ясно видна роль светового излучения и роль поверхности в фотоэлектрическом эффекте. Поверхность представлена только слагаемым $-B$, представляющим отрезок на вертикальной оси от начала координат до пересечения с кривой фототока (в левой части рис. 33.9). Этот член не зависит от света, так

*) В современной физике частота почти всегда обозначается греческой буквой ν (произносится «ню»), а не буквой f, принятой в электротехнике. В оставшейся части курса мы будем придерживаться этого стандартного обозначения. Таким образом, при чтении других книг по современной физике обозначения будут вам знакомы. Например, соотношение между скоростью света, его частотой и длиной волны записывается в виде $c=\nu\lambda$, что означает то же самое, что и соотношение $c=f\lambda$, встречавшееся в части курса II.

как можно как угодно изменять частоту ν без какого-либо влияния на него. Следовательно, он содержит информацию только о природе поверхности. С другой стороны, свет описывается членом $h\nu$, который всегда одинаков для света одной и той же частоты. (Так как наклон h одинаков для всех веществ, этот член не имеет никакого отношения к природе фотоэлектрической поверхности.) Этот член говорит нам, каким путем фотон дает информацию о частоте света. Каждый фотон способен сообщить испускаемому электрону количество энергии, прямо пропорциональное частоте, т. е. $E_{эл}$ возрастает с увеличением ν. Мы можем истолковать последнее уравнение на основе представления о фотонах. Каждый фотон несет энергию $h\nu$. Когда фотон ударяется о поверхность, то он исчезает, а энергия $h\nu$ передается поверхности. Часть этой энергии нужна для того, чтобы вывести электрон с поверхности. Она и представляет собой пороговое значение B. Фотоны с энергией, которая меньше этой величины, не могут выбивать электроны. Но если энергия электрона больше порогового значения, то избыток энергии появляется в виде кинетической энергии испущенного электрона. Не все электроны выходят непосредственно с поверхности металла; некоторые уходят более глубоко в металл и никогда из него не выходят. Другие выходят по сложному пути, потеряв часть энергии в столкновениях на своем пути наружу. Некоторые же выходят почти прямо с полным избытком кинетической энергии, сообщенной фотоном; это те электроны, которые продолжают вылетать, когда задерживающая разность потенциалов еще не достигла значения потенциала отсечки.

Истолкование фотоэлектрического эффекта с фотонной точки зрения было впервые дано Эйнштейном в 1905 г., и полученное нами уравнение, выражающее сохранение энергии в фотоэлекрическом процессе, известно как уравнение фотоэффекта Эйнштейна. Но экспериментальных данных, использованных нами для того, чтобы установить это уравнение, в распоряжении Эйнштейна не было. Он разработал всю картину фотоэффекта на основе значительно более ограниченных данных и предсказал экспериментальные результаты, которые были нами использованы. В этой работе Эйнштейн основывался на результате, полученном Планком. В 1900 г. Планк дал объяснение спектра света, излучаемого из замкнутой камеры при постоянной температуре *). Его объяснение основывалось на предположении, что свет испускается и поглощается порциями с энергией $h\nu$. Эйнштейн привел ряд фактов, подтверждающих реальность этих порций света. Он ввел в науку представление о них, как о частицах света — фотонах; и в то же время он воспользовался ими для создания теории фотохимических процессов и для предсказания результатов позднейших фотоэлектрических опытов.

*) Замкнутая камера с небольшим отверстием в одной из стенок обычно называется «черным телом», потому что она почти полностью поглощает излучение, поступающее в него через это отверстие. Прежние теории распределения по частоте энергии излучения черного тела очень сильно расходились с экспериментальными фактами.

33.6. Механика фотона. Количество движения фотона

Фотоэлектрический эффект был объяснен с помощью представления о фотонах. В пучке света частоты ν каждый фотон обладает энергией

$$E_ф = h\nu.$$

Это и есть знаменитое соотношение Эйнштейна — Планка. Интенсивность пучка света больше или меньше в зависимости от того, больше или меньше фотонов проходит за единицу времени в данном его сечении; но энергия, приходящаяся на один фотон (квант энергии), всегда одна и та же для света определенной частоты или длины волны.

Соотношение Эйнштейна — Планка представляет собой ключ к природе фотона. Коэффициент пропорциональности h назван постоянной Планка в честь великого немецкого физика, который впервые установил это соотношение в 1900 г., за несколько лет до того, как Эйнштейн показал, что оно может объяснить природу фотоэлектрического эффекта. Эту постоянную можно непосредственно измерить с помощью последнего описанного нами опыта; как мы видели, h является наклоном для всех фотоэлектрических кривых. При этом получается

$$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Пользуясь величиной h, можно сразу же найти энергию фотонов. Видимый свет имеет длину волны примерно 5000 Å, или $5 \cdot 10^{-7}$ м. (Напоминаем, что Å обозначает ангстрем: 1 Å$=10^{-10}$ м.) Частота, таким образом, равна

$$\nu = c/\lambda = (3 \cdot 10^{8} \text{ м/с})/(5 \cdot 10^{-7} \text{ м}) = 6 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}.$$

Следовательно, соответствующий этой длине волны фотон обладает энергией, которая равна

$$E_ф = (6{,}62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}) \cdot (6 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}) = 4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Выражая этот результат в джоулях, мы получаем десятичную дробь, содержащую перед первой значащей цифрой 18 нулей, и мы видим, насколько мала энергия отдельного фотона по сравнению с энергиями обычных механических систем. Здесь мы как раз имеем дело со случаем, когда желательно применение более удобной единицы энергии для выражения энергий электронов. Такой единицей является электрон-вольт (см. гл. 28). Так как 1 эВ$=1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж, то энергия нашего фотона составляет около 2,5 эВ. Вся область фотонов видимого света простирается от энергии около 2 эВ для красного света до 3 эВ для фиолетового.

Энергии в несколько электрон-вольт на фотон относятся к области низких энергий, однако могут вызывать существенные химические изменения — очевидно (см. следующую главу) потому, что такие энергии все же достаточно высоки, чтобы создать возмущение электронов внутри атома или даже выбросить их за пределы атома.

К этим энергиям (но не более низким) чувствительны фотохимикалии, фотоэлектрические поверхности и даже сетчатка глаза. Различия между «видимыми» областями для подобных объектов существуют, но, в сущности говоря, они довольно малы. Ни одна из известных фоточувствительных поверхностей не будет реагировать на инфракрасный свет, длина волны которого в десять раз больше длинноволнового предела чувствительности человеческого глаза.

По энергии отдельного фотона можно найти число фотонов, летящих в пучке излучения, для которого известен полный поток энергии. Интересно сравнить полное число фотонов, ударяющихся о фотоэлектрическую поверхность, с числом выбитых фотоэлектронов. Даже в случае очень хорошей поверхности только малая доля фотонов выбивает электроны. Остальная часть освобождает электроны, уходящие в глубь поверхности, или теряется каким-либо другим путем. Конечно, фотоны, энергия которых меньше пороговой, совсем не могут выбивать электроны.

При столкновении фотона с атомом свет передает веществу не только энергию. Поток фотонов, ударяющихся о поверхность, передает ей также и количество движения. С фотонной точки зрения давление света нужно представлять себе точно так же, как и давление газа по кинетической теории. Давление, постоянное по величине и непрерывное, является результатом огромного числа небольших ударов, каждый из которых передает поверхности количество движения и, следовательно, импульс силы. Измерив световое давление, производимое фотонами определенной «частоты», и разделив полученное суммарное количество движения поровну между фотонами, мы найдем, что каждый фотон несет в направлении своего движения количество движения, равное $h\nu/c$.

Хотя электромагнитная теория Максвелла не имела дела с фотонами, она не противоречит понятию количества движения фотонов. Согласно электромагнитной теории любое количество лучистой энергии E, распространяющейся в определенном направлении, должно переносить в том же направлении количество движения E/c. Фотоны с энергией $h\nu$ и количеством движения $h\nu/c$ «подчиняются» этому соотношению. Следовательно, большое число фотонов может привести к таким же эффектам, как и непрерывная световая волна.

Можно непосредственно измерить количество движения фотона при столкновении отдельного фотона с электроном. Для такого опыта нужно провести наблюдение движения электрона, а это можно сделать в камере Вильсона. Источниками электронов служат атомы газа или тонкая полоска вещества, помещенная в камеру. Электроны не свободны, и фотоны должны их выбивать из атомов. Поэтому энергия фотона должна быть высока по сравнению с энергией связи электрона с атомом.

Но даже в случае фотонов, энергия которых достаточна для удаления электрона из атома, мы не получим того типа столкновения, который мы желаем изучить. Если мы не воспользуемся фотонами рентгеновских лучей — фотонами действительно высокой энергии,

мы получим обычный фотоэлектрический эффект, в котором энергия фотона делится почти поровну между кинетической энергией электрона и энергией, необходимой для того, чтобы оторвать электрон от атома, равной величине B, определяющей порог фотоэффекта. При фотоэлектрическом эффекте некоторое количество движения переходит также и к атому, и сохранение количества движения не ограничивается только электроном и фотоном. Однако если воспользоваться фотонами с более высокой энергией, фотонами

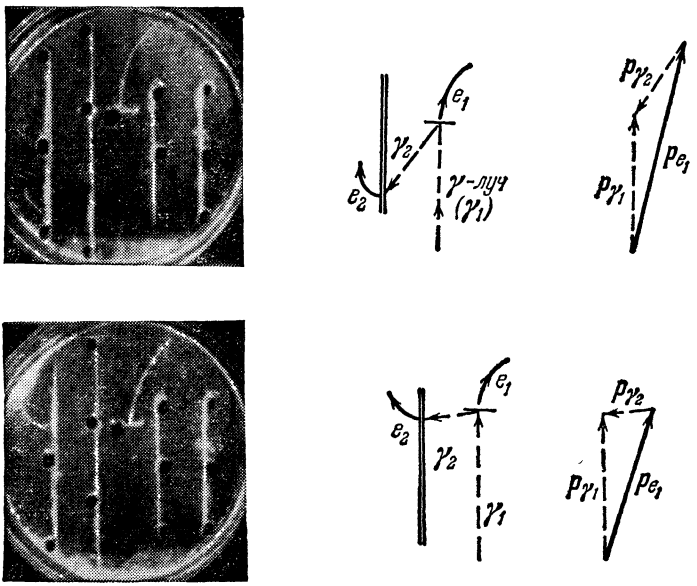


Рис. 33.10. Эффект Комптона. Слева помещены фотографии, полученные в камере Вильсона; рядом расположены схемы, показывающие пути γ-лучей и электронов; справа находятся векторные диаграммы, изображающие изменения количеств движения. В обеих сериях рисунков пучок γ-лучей с энергией около 2 МэВ входит в камеру снизу. Гамма-луч ударяется о листок фольги, и при этом случайно может быть выброшен комптоновский электрон отдачи преимущественно вперед. Рассеянный фотон, потеряв часть энергии и количества движения, летит дальше в другом направлении и выбивает фотоэлектрон из свинцовых полос, помещенных в камеру Вильсона. Это позволяет проследить за его путем, а измерение кривизны электронных треков в известном магнитном поле делает возможной проверку сохранения энергии и количества движения.

высоковольтных рентгеновских лучей или ядерных гамма-лучей, то энергия атомной связи окажется малой по сравнению с энергией фотонов. Тогда электрон выбивается, приобретая почти всю энергию и все количество движения, теряемые фотоном. Этот новый процесс был назван эффектом Комптона по имени американского физика Артура Комптона.

В комптоновском столкновении фотон не поглощается. Он сохраняется после столкновения, но, претерпев рассеяние и обладая меньшими энергией и количеством движения, движется в некотором новом направлении. Электрон отскакивает, испытывая отдачу после столкновения, также унося с собой некоторую энергию и некоторое

количество движения. В каждом столкновении такого рода энергия, приносимая падающим фотоном, разделяется на две части: на энергию электрона отдачи и энергию рассеянного фотона. Количество движения сохраняется, как и энергия. Количество движения падающего фотона превращается в полное количество движения электрона отдачи и рассеянного фотона. На рис. 33.10 слева представлены две фотографии электронов отдачи, получивших некоторые количества движения при ударе фотонов. Здесь непосредственно видно, что фотон передал часть своего количества движения. Кроме того, можно проверить и сохранение количества движения, складывая векторы количеств движения, как это сделано справа на диаграмме рис. 33.10. Сохранение количества движения оправдывается при каждом таком столкновении, причем всякий раз мы выражаем количества движения фотона величиной $h\nu/c$. В результате мы получаем убедительное доказательство того, что величина

$$p=h\nu/c=h/\lambda$$

есть количество движения фотона.

Соотношения $p=mv$ и $E_к=mv^2/2$, полученные нами для медленно движущихся тел, здесь *неприменимы*. Вместо них мы имеем $p=h\nu/c$ и $E=h\nu$, что дает $E=pc$. Это *не* является чем-то свойственным исключительно фотону; здесь мы встретились с выводами теории относительности, которая вносит изменения в законы механики для движений со скоростями, близкими к скорости света. Фотон действительно движется со скоростью света; его поведение должно описываться не ньютоновскими, а несколько отличными от них уравнениями движения Эйнштейна. Теория относительности выходит за пределы нашего курса; поэтому мы можем ограничиться только замечанием, что в атомной физике законы релятивистской механики получили обширную проверку. Они, разумеется, должны согласоваться с ньютоновской механикой во всех тех случаях, когда они применяются к телам, движущимся медленно по сравнению со скоростью света, и это согласие действительно имеет место.

Соотношение между энергией фотона и длиной волны света. Соотношение между энергией фотона и соответствующей ему длиной волны можно вывести следующим образом:

$$\lambda=c/\nu=hc/h\nu=hc/E_ф,$$

$$hc=(6{,}62\cdot10^{-34}\text{ Дж}\cdot\text{с})\cdot(3\cdot10^{8}\text{ м/с})=1{,}99\cdot10^{-25}\text{ Дж}\cdot\text{м}.$$

Учитывая, что 1 м$=10^{10}$Å, а 1 Дж$=6{,}25\cdot10^{18}$ эВ, имеем

$$hc=(1{,}99\cdot10^{-25}\text{ Дж}\cdot\text{м})\cdot(10^{10}\text{ Å/м})\cdot(6{,}25\cdot10^{18}\text{ эВ/Дж})=1{,}24\cdot10^{4}\text{ эВ}\cdot\text{Å}.$$

Таким образом,

$$\lambda\,(\text{Å})=(1{,}24\cdot10^{4})/E_ф,$$

где $E_ф$— энергия фотона в электрон-вольтах. Точнее: энергия фотона, если выражать ее в электрон-вольтах, а соответственно длина волны λ в ангстремах определяются из соотношения

$$\lambda E_ф=12\,397\text{ эВ}\cdot\text{Å}.$$

33.7. Фотоны и электромагнитные волны

Где же, однако, во всем этом волновая картина? Может показаться, что она не имеет никакого отношения к тому, что мы только что обсуждали. Но, с другой стороны, мы не можем забыть всех свидетельств в пользу существования световых волн, рассмотренных во второй части, равно как и данных об электромагнитных волнах всех типов. Каким-то образом фотоны и электромагнитные волны должны быть связаны друг с другом, и мы уже отметили, что это возможно для усредненных эффектов, определяемых большим числом фотонов. В разделе 33.3 мы видели, что интерференционные картины — типично волновой эффект — вырисовываются фотонами, попадающими поодиночке в множество различных точек. Теперь мы снова будем искать связь между волнами и фотонами.

Прежде всего следует установить, что представление о фотонах совместимо со всем тем, что нам известно об электромагнитных волнах в диапазоне длин волн от миллиметров до километров. Такие волны создаются и обнаруживаются не с помощью отдельных электронов или атомов, а путем применения радиоламп и антенн, по которым взад и вперед текут токи. Существует множество данных в пользу того, что волновая картина согласуется с фактами радиосвязи.

В этом диапазоне частоты малы по отношению к частоте света. Частота в несколько килогерц представляет в радиотехнике нижний предел частоты, между тем как частота в миллион мегагерц находится за пределами наиболее совершенной радарной и микроволновой техники и лежит на пороге далекой инфракрасной области. Однако даже такие наиболее высокие радиочастоты, благодаря малости атомной постоянной h, дают энергию фотонов, которая действительно весьма мала.

Например, для 1 МГц фотоны в радиоволне обладают энергией

$$h\nu=(6{,}62\cdot10^{-34}\ \text{Дж}\cdot\text{с})\cdot10^{6}=6{,}62\cdot10^{-28}\ \text{Дж}.$$

Так как 1 Дж$=6{,}25\cdot10^{18}$ эВ, то

$$h\nu=4\cdot10^{-9}\ \text{эВ}.$$

Столь малые энергии фотонов означают, что радиосигнал можно обнаружить только в том случае, если он содержит очень много фотонов. Нижний предел для хорошего приемника связи составляет около 10^{10} фотонов в секунду. Для такого огромного числа фотонов можно обнаружить только их среднее поведение. Результатом является плавный перенос энергии от волны к веществу, какого и следует ожидать по волновой теории. Большое число фотонов дает гарантию того, что зернистость обычно не обнаруживается, если не прилагать больших стараний, чтобы ее обнаружить.

Могло даже возникнуть подозрение, что в длинноволновом излучении нет фотонов. Но теперь имеются экспериментальные доказательства поглощения и испускания «радиочастотных» фотонов

атомами и молекулами (см. раздел 34.3). Таким образом, нам известно, что здесь применимы и фотонные, и волновые представления.

При переходе к более высоким частотам мы попадаем в область видимого света. Здесь число фотонов велико в любом световом пучке, который представляется ярким нашему глазу. Например, солнечный свет представляет собой дождь порядка 10^{17} фотонов сквозь 1 см^2 за 1 с. В таком обильном потоке не легко заметить прибытие отдельных фотонов. В другом предельном случае, однако, мы можем различать свечение слабого источника света, посылающего в наш адаптированный к темноте глаз лишь сотню фотонов на площадь зрачка за 1 с. Таким образом, для видимого света возможны оба способа наблюдения — волновой и фотонный.

Фотопластинка и фотоэлемент способны, подобно глазу, отзываться на непрерывный, подобный волне, поток большого числа фотонов не в меньшей степени, чем на неравномерное и случайное попадание нескольких фотонов в секунду. По этой причине именно при изучении видимого света, а не длинноволновых частей спектра электромагнитных волн возникло и получило проверку представление о фотонах.

С увеличением частоты света и повышением энергии фотона и его количества движения трактовка явлений излучения с точки зрения представления о фотонах становится все более и более преобладающей. Энергия фотона в рентгеновской области достаточно велика для обнаружения отдельных фотонов. Попадание отдельного фотона γ-лучей, связанного с еще более высокой частотой и соответственно более короткой длиной волны, является событием, ощутимым в энергетическом отношении. Его можно зарегистрировать с помощью различных «счетчиков». Фотоны γ-лучей, которые обладают энергиями, достигающими 10^{14} эВ, были обнаружены в высоких слоях атмосферы. Они создаются там частицами космических лучей, взаимодействующими с атомами воздуха. Такой фотон производит десятки миллионов электронов отдачи.

С другой стороны, при увеличении частоты и соответственном уменьшении длины волны волновые эффекты менее выражены. Например, становится труднее продемонстрировать интерференцию и дифракцию. Длины волн рентгеновских лучей не превышают размеров атомов. Для них вряд ли удастся сделать щели, достаточно узкие для того, что бы получить интерференционные максимумы заметной ширины. Хотя интерференция рентгеновских лучей и широко применяется, но предназначенные для ее наблюдения дифракционные приборы редко являются делом рук человека. Здесь используется правильное расположение атомов в кристаллах. Но для γ-лучей даже кристаллы не могут служить средством обнаружения их дифракции; можно применять только ядра отдельных атомов, но такой метод является весьма косвенным.

У нас нет выбора: электромагнитное излучение любого вида следует понимать с двух точек зрения. Если нас интересует общая картина, получающаяся в пространстве или во времени, то для

этого следует прибегать к теории электромагнитных волн, изложенной в гл. 31. Мы умеем конструировать антенны, линзы и решетки. Все они работают в полном соответствии с предсказаниями волновой теории. Но мы должны признать, что не в состоянии точно сказать, когда или где энергия будет передана детектору или импульс отдачи будет сообщен экрану или электрону. Волновая теория дает нам вероятность обнаружения фотона. Она говорит только о вероятности того, что фотон передаст свою энергию и импульс данному предмету в течение определенного времени. Здесь, таким образом, господствуют законы случая. Фотон нельзя привязать к определенному месту на основании какого-либо волнового предсказания. В опыте с интерференцией данный фотон может оказаться в любой яркой полосе, и мы не можем проследить за его путем сквозь щели прибора. Но где бы и когда бы он ни взаимодействовал, мы можем быть уверены, что там в точности сохраняются энергия и количество движения.

В классической механике и физике принималось, что можно знать энергию и количество движения частицы и указать, когда и где произойдет столкновение. Это было наивно, и изучение поведения фотона оказалось суровой школой, пройдя которую физики стали лучше понимать, насколько сложен мир. Для фотонов, когда известны их энергия и количество движения, мы можем указать только вероятности времени и места прибытия частицы. Эти сведения получаются на основе волновых свойств света, присущих фотонам. Поэтому мы можем использовать только часть представлений, которые раньше мы связывали с частицами и их движениями. В то же самое время необходимо дополнительно ввести новые волновые представления, а также представления теории вероятности, чтобы получить полное описание действительно происходящих явлений.

Иногда можно ограничиться только одной из старых моделей. Например, когда много фотонов участвует в возникновении какого-либо эффекта, то на первом плане находится только волновая картина явления. В другом крайнем случае, когда отдельный фотон обладает столь большой энергией, что его легко наблюдать, и когда он к тому же имеет столь короткую длину волны, что наблюдение интерференции почти невозможно, достаточна фотонная картина. Но истинная природа света более сложна. Свет обнаруживает как волновые, так и фотонные свойства. Поэтому мы вынуждены ввести новые представления о свете, объединяющие некоторые стороны волновых свойств в нашем старом понимании природы света с некоторыми сторонами поведения фотонов или частиц. Мы должны принять эти новые представления, потому что такова природа света, так устроен мир. Ньютоновская корпускулярная модель света никоим образом не восстанавливается открытием фотонов. Она не более верна, чем чисто электромагнитная модель с ее волновым непрерывным распределением энергии и количества движения. Свет можно полностью понять только на основе новой схемы, которую мы пытались здесь обрисовать.

33.8. Волны вещества

К 1923 г. фотонный урок был хорошо усвоен. В последующие годы он был снова повторен в новой и неожиданной связи. Примерно в это время французский физик Луи де Бройль задал следующий вопрос.

Поскольку свет, который мы принимали за непрерывную волну, обладает также фотонной природой, не могут ли и частицы

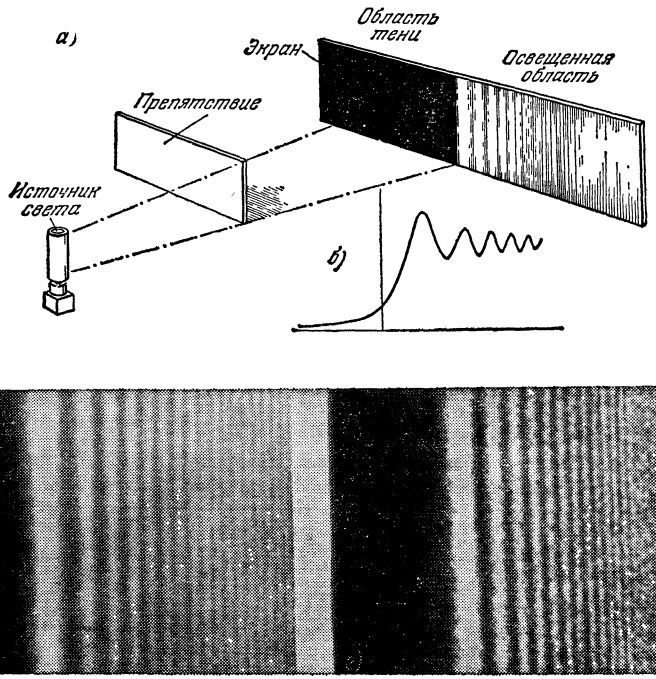


Рис. 33.11. Дифракция электронов в сравнении с соответствующими дифракционными полосами видимого света в области тени от края экрана. *а*) Схема установки, применяемой для видимого света. Может быть использован тщательно сошлифованный прямолинейный край металлической или стеклянной пластинки. *б*) Ожидаемое распределение освещенности на экране. *в*) Дифракционная картина, созданная светом. *г*) Дифракционная картина, созданная электронами. Для электронов прямолинейным краем является небольшой кубический кристалл MgO размерами значительно меньше микрона; дифракционные полосы сфотографированы с помощью электронного микроскопа.

вещества иметь волновые свойства? Предположение де Бройля было, пожалуй, не более чем чисто умозрительным; но он мог сделать на его основе некоторые выводы, допускающие опытную проверку. В частности, он мог приписать некоторую длину своим гипотетическим волнам вещества. Частицы с количеством движения p должны иметь ту же связанную с ними длину волны, как фотоны с тем же количеством движения. λ должна быть равна h/p. После этого, на протяжении немногих лет, заданный де Бройлем вопрос был

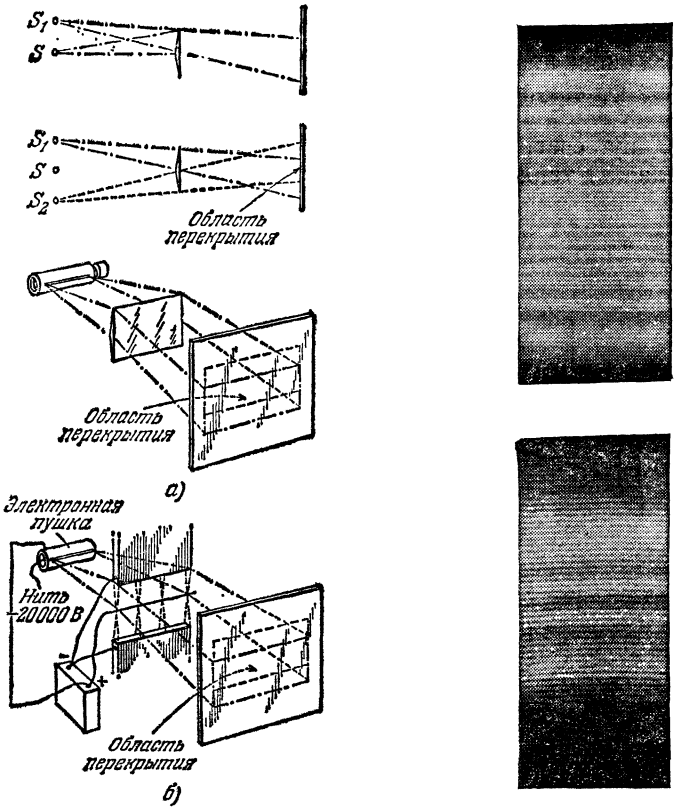


Рис. 33.12. Два сходных опыта, показывающих интерференцию волн. Оба дают интерференционные полосы от бипризмы Френеля — прибора, в котором волны исходят от одной щели, как источника света, а эффект создается, как с волнами от двух щелей. Сходство картин, полученных со светом и с электронами, поразительно. Преломление происходит так, как если бы электроны вели себя подобно заряженным частицам; но особенность заключается в том, что там, где два потока электронов накладываются, получаются освещенные и темные полосы, очень похожие на полосы от световых волн, хотя и в сильно уменьшенном масштабе. *а)* Стеклянная бипризма для видимого света (два стеклянных клина, направленных в противоположные стороны) отклоняет две половины пучка света от одной щели, так что они перекрываются на фотопленке, находящейся на достаточно большом расстоянии от бипризмы. Свет, проходящий через верхнюю половину бипризмы, отклоняется вниз, а свет, проходящий через нижнюю половину, отклоняется вверх, так что в области перекрытия световых волн на фотопленке свет представляется приходящим от двух щелей S_1 и S_2. В этой области наблюдается интерференция. В некоторых местах фотопленки гребни, которые представляются идущими от S_1, приходят вместе со впадинами, которые кажутся выходящими из S_2, и вместе образуют темную полосу. В других местах гребни приходят вместе, создавая светлую полосу. *б)* Источником электронов является 20000-вольтовая пушка, дающая электроны, у которых длина волны де Бройля составляет 0,086 Å. Электрическое поле, действующее в качестве бипризмы, создается тонкой посеребренной кварцевой нитью, подвешенной в широкой щели, сделанной в металлическом экране. На нити поддерживается положительная разность потенциалов около 6 В по отношению к щели. На схеме представлены электрическая бипризма и линии ее электрического поля. Электрическое поле отклоняет потоки электронов, проходящих с каждой стороны нити. Эти потоки накладываются друг на друга на фотопленке так, как если бы они приходили от двух источников. *в)* Интерференционная картина для света. *г)* Интерференционная картина, созданная электронами. Она очень сильно увеличена в электронном микроскопе.

решен большим числом различных опытов. Ответ был положительный: существуют волны, связанные с движущимися частицами вещества.

В это же самое время представление о волнах вещества возникло в связи с рядом теоретических идей, которые внесли изменения в ньютоновскую механику, расширяя и совершенствуя ее для согласования с результатами наблюдений в атомной физике. Вскоре оказалось, что все эти представления согласуются друг с другом. Вместе они образуют наиболее мощную из наших теорий — квантовую механику, которая за одно десятилетие после своего рождения распространилась на всю физику. Теперь эта теория представляет основу наших знаний как о веществе, так и об излучениях.

Хотя идеи квантовой механики можно изучать в свете уточнений ньютоновской динамики, внесенных Бором, Гейзенбергом и другими членами Копенгагенской школы физиков, мы все же попытаемся здесь немного познакомиться с этими идеями, придерживаясь представлений о волнах де Бройля.

Наиболее прямым доказательством существования волн вещества служит наблюдение дифракции пучков частиц. Электроны дают изящные картины дифракции и интерференции (рис. 33.11 и 33.12). Электронами легко управлять; пучки электронов с почти одинаковыми количествами движения легко получать. С такими пучками картины распределения интенсивности похожи на оптические картины дифракции и интерференции света одной длины волны и вообще похожи на картины, которые получаются для любого типа волн одной длины.

Далее, изменяя количество движения электронов, можно изменять наблюдаемую длину волны. Тогда оказывается, что длина волны обратно пропорциональна количеству движения. Получается соотношение

$$\lambda = h/p,$$

где h — снова постоянная Планка. Как и предсказал де Бройль, это соотношение в точности такое же, как между количеством движения фотона и длиной связанной с ним волны.

Это соотношение де Бройля пригодно во всех случаях, к какому бы сорту частиц оно ни применялось. В одном из первых исследований были взяты атомы гелия (рис. 33.13 и 33.14). На рис. 33.15 показана четкая картина, которую они дают при отражении от молекулярной решетки, начерченной природой на поверхности кристалла фтористого лития. Здесь атомы пучка не обладали одинаковым строго определенным количеством движения. Пучок состоял из атомов, выходящих из нагретого сосуда с гелием. Тем не менее на рисунке отчетливо видны интерференционные максимумы, отвечающие длине волны, вычисляемой из тепловой энергии и соответствующего количества движения атомов.

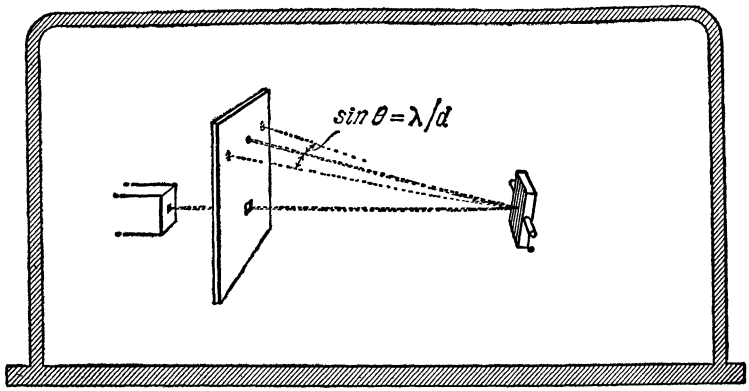


Рис. 38.13. Общая схема опыта с атомным пучком гелия для наблюдения интерференции волн вещества, отраженных от решетки спектроскопа. Пучок гелия направляется на поверхность кристалла, которая, благодаря правильной повторяемости расстояний между молекулами, действует как дифракционная решетка. Источником пучка является слегка нагретый резервуар, наполняемый весьма малым количеством газа. Благодаря правильному расположению атомов в кристалле отраженные волны обнаруживают максимум интерференции под углами, зависящими от длины волны. При таком применении кристалл ведет себя по отношению к атомам гелия точно так же, как штриховая оптическая решетка по отношению к свету. Вы можете измерить длину волны вещества по углам интерференционных максимумов точно так же, как можно измерить длину волны света с помощью отражательной решетки. См. рис. 33.14 и 33.15.

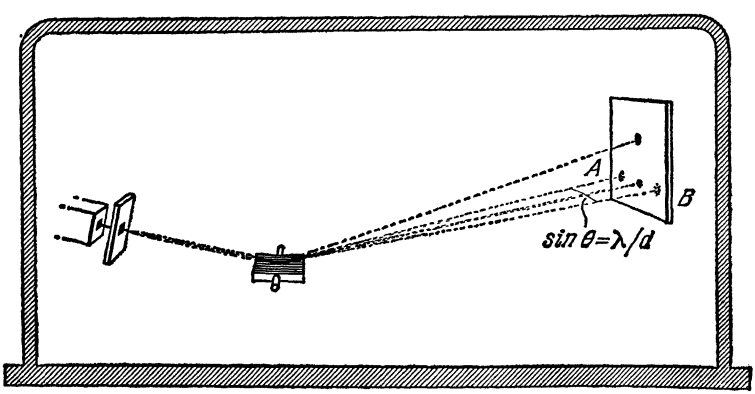


Рис. 33.14. В реальном опыте весь прибор представляет собой откачанную до высокого вакуума камеру, которая и во время опыта непрерывно откачивается. Гелиевый пучок ударяется о кристалл под малым углом скольжения для усиления отраженной части пучка. Пучок, отклоненный вверх, представляет собой интерференционный максимум 1-го порядка, образованный волнами, которые рассеяны атомными рядами, перпендикулярными к атомным рядам, создающим пучки, отклоненные к A и B. Интенсивность измеряется вдоль прямой AB.

После этого опыта были испробованы частицы всех видов. За последние годы, с появлением интенсивных пучков нейтронов из ядерных реакторов, даже нейтрон был подвергнут проверке. С помощью высокоскоростных механических селекторов скорости (быстро вращающихся колес, задерживающих все нейтроны, проходящие через канал со скоростями, которые отличаются от одной заранее заданной) получаются пучки с почти постоянным количеством движения частиц. Другой, и зачастую более практичный метод заключается в том, что пучок нейтронов посылается на поверхность дифракционной решетки, где щели или отражающие участки находятся на известном расстоянии друг от друга. Тогда нейтронные волны, выходящие из решетки в данном направлении, будут иметь определенную длину волны — именно ту, для которой при этом угле получается максимум волнового возмущения. Исследуя данный пучок нейтронов с помощью второй дифракционной решетки, легко убедиться в успешности такого метода. Таким образом, теперь можно пользоваться и нейтронным пучком для проведения опытов с интерференцией и дифракцией. Получаются настолько хорошие результаты, что в настоящее время нейтронные интерференционные картины применяются для получения новых данных о положениях атомов в кристаллических решетках. Например, атомы водорода, правильное расположение которых не удается достаточно хорошо установить при интерференции рентгеновских лучей, образуют гораздо более эффективную решетку по отношению к нейтронам. Определение их правильного расположения в кристалле представляет только одну из задач, которые позволяют решать нейтроны благодаря своей волновой природе и присущему им характеру взаимодействия с другими частицами вещества. На рис. 33.16—33.18 показано условие образования интерференционного максимума пучка нейтронов.

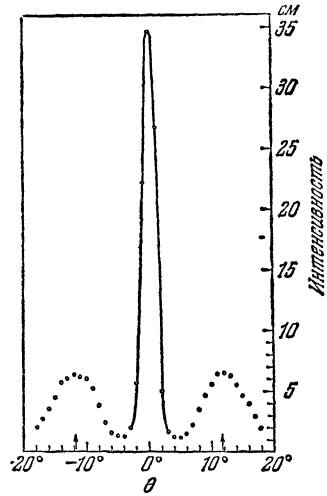


Рис. 33.15. График показывает результат опыта с гелиевым пучком, направленным на свежесрезанную поверхность кристалла фтористого лития. Наличие интерференции свидетельствует о волновой природе пучка атомов гелия, а угол первого максимума является мерой длины волны. (Пучок атомов гелия получался из порции газа, в которой поддерживалась комнатная температура; не все атомы имеют одинаковую скорость, но их скорости стремятся группироваться вокруг некоторого среднего значения, определяющего угол, при котором в дифрагированном пучке заметен максимум. Из постоянной решетки, составляющей 2,85 Å, и из измеренного угла, равного примерно 11,8°, можно вычислить длину волны де Бройля, оказывающуюся равной приблизительно 0,57 Å. Длина волны де Бройля, вычисленная из соотношения $\lambda = h/mv$, для гелия при скоростях, соответствующих комнатной температуре, также равна 0,57 Å.)

Нейтроны могут проходить длинные пути в воздухе, но опыты с атомами и электронами следует проводить в вакууме. Иначе

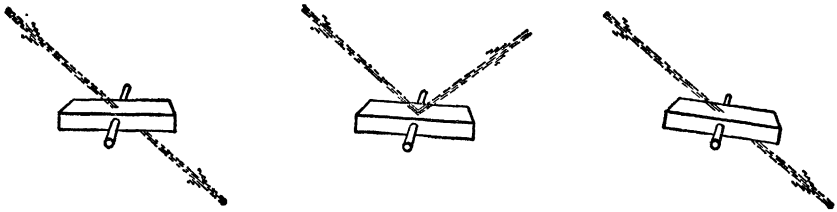


Рис. 33.16. Опыт с интерференцией для обнаружения волновых свойств нейтронов. Пучок нейтронов направляется на кристалл каменной соли, укрепленный так, что он может вращаться вокруг определенной оси. При большинстве углов падения пучок будет прямо проходить сквозь кристалл. Однако если вращать кристалл (сохраняя неизменным направление пучка), то найдется угол, при котором внезапно появится отраженный пучок. Если повернуть кристалл еще больше, то отражение прекратится, и нейтроны снова будут проходить сквозь кристалл. Отражение появляется, когда разность хода пучков, отраженных от слоев кристалла, расположенных на равных расстояниях друг от друга, создает интерференцию нейтронных волн с их взаимным усилением. Это явление сходно с интерференцией в тонкой пленке, описанной в гл. 18. См. также рис. 33.17 и 33.18.

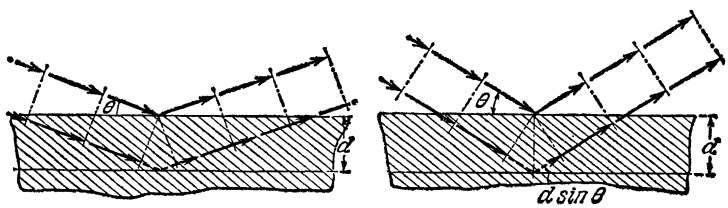


Рис. 33.17. Пунктирная ломаная линия изображает разность хода нейтронных волн, отраженных от второго и первого слоев в кристалле. Для того чтобы пучки от каждого слоя интерферировали, давая максимум отражения, это расстояние должно равняться целому числу длин волн. С другой стороны, это расстояние равно $2d \sin\theta$, где d — расстояние между отражающими слоями атомов. Поэтому первая «вспышка» отраженного луча должна произойти, когда $2d \sin\theta = \lambda$.

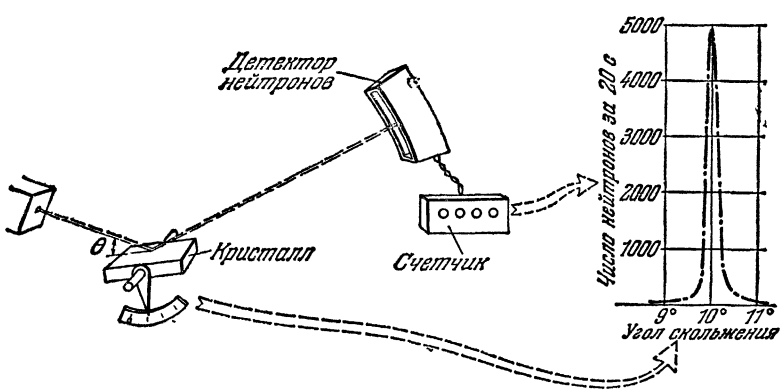


Рис. 33.18. Схема опыта. Пучок нейтронов, имеющих одну и ту же скорость $4{,}04 \cdot 10^4$ м/с (или с длиной волны де Бройля 0,98 Å), падает на кристалл слева. Когда пучок отражается, детектор реагирует посылкой счетчику сигнала от каждого захваченного нейтрона. Построим график зависимости числа зарегистрированных нейтронов от угла, измеряемого указателем на держателе кристалла. Угол скольжения для первого максимума равен $\theta = 10{,}01°$. Постоянная d для кристалла каменной соли равна 2,815 Å. Вычислите длину волны. Совпадает ли она с ожидаемой длиной волны де Бройля?

молекулы воздуха рассеивают пучок до такой степени, что им нельзя воспользоваться для точных измерений. Когда в качестве решеток применяются кристаллы, то частицы проникают в вещество на очень малую глубину, прежде чем они потеряют свою энергию. Дифракционную картину могут дать только те немногие частицы, которые выйдя из вещества мишени, потеряли весьма небольшую часть своей энергии. При применении пучков атомов большинство атомов, отразившихся от поверхности кристалла, претерпело какие-то внутренние возмущения благодаря столкновениям с кристаллом или сообщило кристаллу различные доли своей кинетической энергии. Такие атомы не проявляют ясно своих волновых свойств. В дифрагировавшей волне обнаруживаются только те атомы, которые на протяжении всего процесса вели себя как простые бесструктурные тела, без всякого изменения их внутреннего состояния. Все частицы, дифрагировавшие в определенном направлении, обладают одинаковыми скоростями; это обстоятельство было подвергнуто специальной проверке. Любая движущаяся частица до тех пор, пока она ведет себя как целое и пока не происходит никаких изменений внутри нее или в ее кинетической энергии, имеет единственную длину волны, определяемую соотношением де Бройля

$$\lambda = h/p.$$

Понятие длины волны де Бройля применимо к движению центра масс частицы в целом.

33.9. Когда становится существенной волновая природа вещества?

Посмотрим, какие встречаются длины волн вещества. Если взять массу микроба, около 10^{-15} кг, и скорость, свойственную сонливой улитке, скажем около 10 см в день, то длина волны де Бройля получается равной

$$(6{,}62 \cdot 10^{-34}\ \text{Дж} \cdot \text{с})/(10^{-15}\ \text{кг} \cdot 10^{-6}\ \text{м/с}) = 6 \cdot 10^{-13}\ \text{м} = 6 \cdot 10^{-3}\ \text{Å}.$$

Частица, участвующая в движении подобного рода и являющаяся наименьшей механической системой, которую можно рассчитывать найти за пределами атомной физики, имеет столь же короткую длину волны, как фотон с энергией в несколько миллионов электронвольт. Такой фотон является ядерным γ-лучом, и его длина волны составляет одну миллионную часть длины волны видимого света. Даже для видимого света волновые свойства иногда не важны. Для того чтобы знать, по какому пути пойдет луч света и какую тень он создаст, обычно достаточно «лучевого» приближения. Ядерный γ-луч значительно более «лучеподобен». Найти его волновые свойства путем дифракции или интерференции почти невозможно. Аналогично и движущийся микроб с такой же длиной волны проявляет только обычные свойства частицы (корпускулярные свойства). Обнаружить его волновую природу невозможно. Его физическое поведение полностью описывается ньютоновской механикой. Обыч-

ное тело, вроде мяча для бейсбола, имеет массу, которая примерно в 10^{14} раз больше. Совершенно безнадежно увидеть его волновые свойства, и это позволяет понять, почему для открытия волновой природы вещества понадобилось так много времени.

Для наблюдения эффектов, обнаруживающих волновую природу вещества, необходимо иметь достаточно большие длины волн де Бройля. Как можно увеличить длину волны де Бройля? Можно пытаться уменьшить скорость, но это практически затруднительно. Тепловое движение ограничивает фактически осуществимые движения. Единственный другой фактор, который остается изменить, это — масса; можно брать меньшие массы. Наименьшими массами обладают частицы, из которых состоит вещество: молекулы, атомы, электроны

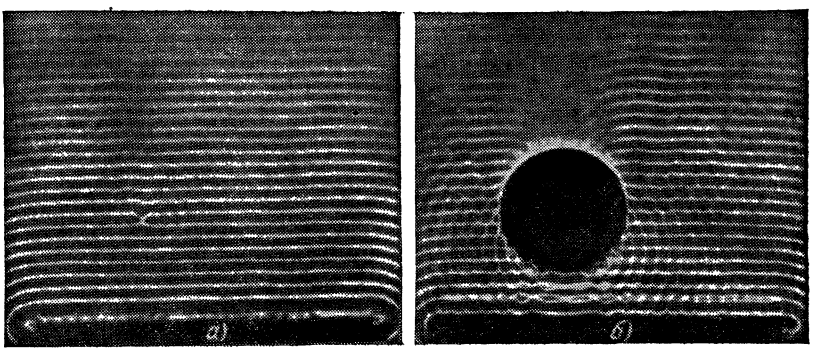


Рис. 33.19. Фотографии волн, встречающих препятствия в волновой кювете. Слева небольшой предмет помещен в том месте, где волны, как бы изгибаясь, сливаются. Заметьте, что этот небольшой барьер очень мало искажает волны. Справа в бассейн помещено большое препятствие. Волны сильно отражаются, и здесь имеется значительная «теневая» область.

и частицы внутри ядер. Мы уже видели, что их длины волн могут быть достаточно велики для того, чтобы от них были видны дифракционные картины. Так как масса электрона составляет только 10^{-30} кг, то при соответствующей скорости он будет иметь волну с длиной размера атома.

Электрон, движущийся с кинетической энергией около 90 эВ, имеет, как мы установили в разделе 28.1, скорость, равную $5{,}6 \cdot 10^{6}$ м/с. Его количество движения поэтому равно

$$(0{,}91 \cdot 10^{-30}\ \text{кг}) \cdot (5{,}6 \cdot 10^{6}\ \text{м/с}) = 5 \cdot 10^{-24}\ \text{кг} \cdot \text{м/с}.$$

Следовательно, его длина волны де Бройля составляет около $1{,}3 \cdot 10^{-10}$ м, что относится к области атомных размеров. Достаточно медленный электрон с кинетической энергией 1 эВ, движется со скоростью, которая в десять раз меньше приведенной выше, и имеет длину волны около 10 атомных размеров. Атомы представляют малые препятствия для таких электронов. Связанные с такими электронами волны легко могут дифрагировать на атомах (рис. 33.19).

Эти примеры показывают, что волновые свойства существенны во всех случаях, когда электрон с малой кинетической энергией движется внутри или вблизи атома. Для таких движений наш повседневный опыт по применению ньютоновской механики материальной точки не является подходящим путеводителем.

Такое же положение имеет место для протонов и нейтронов по отношению к размерам атомного ядра. Длина волны протона или нейтрона с кинетической энергией 100 эВ составляет $3 \cdot 10^{-12}$ м. Такая длина волны велика по сравнению с размерами ядер, диаметр которых 10^{-14} м или меньше. Следовательно, подобный нейтрон, приближаясь к ядру снаружи, найдет в лице этого ядра малое препятствие, на котором и произойдет дифракция. Нейтроны с десятком миллионов электрон-вольт имеют длину волны в 10^{-14} м, сравнимую с размером ядра. Поэтому нейтроны с такой энергией попадают прямо внутрь ядра. Нейтрон, находящийся внутри ядра и являющийся его составной частью, практически не может оказаться вне этого ядра и должен иметь длину волны такого же размера или меньшего. Следовательно, можно ожидать, что нейтроны и протоны в ядрах обладают кинетическими энергиями около 10 МэВ или больше. Даже при таких энергиях их волновая природа существенна, так как они движутся внутри ядра.

Альфа-частицы, испускаемые ядрами, обладают подобными же кинетическими энергиями, и их длины волн имеют тот же порядок величины. Когда их применяют в опытах по рассеянию, то волновой эффект объясняет, почему вся картина рассеяния α-частиц может изменяться при энергиях, при которых α-частицы проходят вблизи определенных ядер. Волны α-частиц могут дифрагировать на ядре, вследствие чего рассеяние под многими углами отличается от кулоновского рассеяния, хотя по ньютоновской механике должно было бы изменяться только рассеяние в обратном направлении (противоположном начальному движению α-частиц). Этот эффект полностью устраняет одно из кажущихся затруднений, упомянутых в разделе 32.5 при обсуждении планетарной модели атома.

Мы снова обнаружили, что атомный мир нельзя полностью описать с помощью простых моделей старой физики. Атомные частицы принципиально невозможно проследить во время их полета внутри атома, как можно было бы в принципе проследить полет пуль. Частицы при этом повинуются законам, которым следуют волны. Вероятное местонахождение частиц определяется волнами, а вероятное движение частиц определяется движением групп волн. Там, где амплитуда волны велика, там частицу можно найти с большой вероятностью; там, где амплитуда мала, там частицу можно найти редко. Но определить можно только вероятность.

Нельзя предсказать точно, где именно в атоме окажутся электроны. Внутри атома мы должны быть готовы к применению нового варианта механики, объединяющего определенные части ньютоновской механики материальной точки с эффектами волновой природы материи.

33.10. Свет и вещество

Круг замкнулся. Оказалось, что световые волны служат для описания вероятности появления в данном месте фотонов — особой разновидности материальных частиц; частицы вещества в свою очередь управляются величиной, имеющей волновой характер. Постоянная Планка управляет величинами в обоих случаях.

Путь частиц сквозь щели дифракционной решетки можно проследить не точнее, чем путь фотона. Связанные с ними волны претерпевают дифракцию, и с помощью этих волн можно вычислить вероятные местопребывания частицы и вероятные числа попаданий частиц в ту или иную точку. Но так же, как это имеет место с фотонами, в каждом отдельном столкновении частицы передают энергию и импульс таким же образом, как этого можно ожидать по механике Ньютона. Волновая природа не вносит в это никаких изменений. Поэтому независимо от того, малы ли длины волн по сравнению с размерами щелей или препятствий, малы ли они по сравнению с размерами атомов или измерительных приборов, получаются результаты, совпадающие с предсказаниями обыкновенной механики. Именно по этой причине мы можем пользоваться здесь обычными измерительными приборами, и по этой же причине обычные измерения позволяют находить те же величины, с которыми имеет дело ньютоновская механика.

Для всех предметов, с которыми мы имеем дело в повседневной жизни, или для объектов, подобных планетам, механика Ньютона почти безошибочна; но если смотреть глубже или рассматривать явления атомного масштаба, то классическая физика (как часто называют физику, развитую до 1900 г.) оставляет желать лучшего. Она остается основой физики, потому что сами инструменты и приборы, с помощью которых производятся измерения, хорошо можно понять с классической точки зрения, но она бессильна объяснить атом. Только квантовая теория в состоянии это сделать с ее порядками величин, определяемыми постоянной Планка, и с ее тонкой картиной атомного мира. Фотон, управляемый в пространстве и во времени своей электромагнитной волной вероятности, как и частица вещества и ее волна вероятности,— все они, вместе с длиной волны де Бройля, являются ключами, с помощью которых мы намереваемся проникнуть внутрь атома.

Во всем сказанном до сих пор поразительными были черты сходства между поведением света и вещества. Свет ведет себя как волны и как частицы — фотоны. Вещество ведет себя одновременно как частицы и как волны. Но это сходство имеет свои ограничения. Имеется одно резкое различие между фотоном и частицей как крошечным осколком вещества. Число фотонов не сохраняется; они легко создаются и легко разрушаются. Включение света создает рой фотонов; они устремляются к стенкам электрической лампочки. Часть их отражается, но в конце концов они все погибают, отдав свою энергию атомам, с которыми они сталкиваются. Энергия сохраняется, так как энергия фотонов переходит в теплоту или хими-

ческие изменения, но число «частиц» не сохраняется. Такое поведение резко отличается от поведения электронов и атомов. Эти частицы не могут создаваться или уничтожаться (по крайней мере в обычных условиях). Они обладают постоянством, а фотоны — нет. В этом смысле фотон очень отличается от крошечных зерен вещества.

В современной физике мы рассматриваем соотношение волна — частица как основное для любого из объектов в масштабе атомов; главное различие между светом и веществом состоит в постоянстве частиц и легкости создания или поглощения фотонов.

33.11. Что же такое волны?

Если мы имеем дело с волновой кюветой, то совершенно ясно, что «волны» — это водяные волны. Вода движется, форма ее поверхности изменяется, правильный характер картин обусловлен в конце концов упорядоченным поведением крошечных масс воды. Но в электромагнитной волне нет вещества, изменяющего свою форму, свое движение или плотность. Самый высокий вакуум передает свет или радиоволны так же хорошо (и в сущности даже лучше), как и область, заполненная любым известным нам веществом. Волны являются картинами электрических и магнитных полей, образованных в пространстве. В прошлом столетии одно время было принято думать, что пустое пространство заполнено некоторым странным веществом — «светоносным» эфиром и что световые волны представляют собой движение этого любопытного вещества. Постепенно пришли к убеждению, что говорить о пространстве, заполненном эфиром, значит сказать очень мало. Теперь мы рассматриваем как свойство самого пространства то обстоятельство, что электромагнитное возмущение может в нем распространяться. «Пустое» пространство лишено атомов и вообще каких-либо вещественных предметов, но это больше уж не означает, что мы должны думать о нем, как о лишенном всяких свойств. Одним из свойств пространства является его способность передавать энергию в электромагнитной форме и быть носителем волн электрического и магнитного полей,— волн, которые мы обнаруживаем в виде радиоволн или света.

Та же точка зрения сохраняется и в отношении волн де Бройля. Волны де Бройля не представляют собой изменений формы или движения электронов, вероятность местоположения которых они описывают. Они дают просто распределение вероятности, которое во многих отношениях сходно с волнами, излучавшимися нами в волновой кювете. Нет никаких оснований считать, что здесь совершает колебания какое-либо вещество. Нам удалось показать, что основные свойства материи похожи на некоторые простые модели, которые можно построить в лаборатории. Но нет никаких оснований распространять это решительно на все свойства: электромагнитные волны и волны де Бройля не являются, насколько мы теперь знаем, волнами какого-либо вещества. Можно лишь удивляться, что эти волны столь сходны с волнами в волновой кювете;

но нет никаких оснований настаивать на том, что каждая особенность волн в кювете будет обнаружена в атоме или в фотоне.

Физики начала XX столетия, переживавшие затруднения современной физики, находили это время чудесным и вместе с тем мучительным. Оно казалось полным парадоксов: предметы были одновременно волнами и частицами, волнами «никакого» вещества, частицами без определенных путей в пространстве. Новизна объединения этих представлений в новую непротиворечивую картину нередко заставляла считать все это невозможным. Но мы выяснили, что старые модели, основанные на опыте с веществом в более или менее обычном масштабе, совершенно не подходят к миру атомных масштабов. Новая картина значительно совершеннее. Поразительно именно то, что в качестве аналогии для понимания атомов можно использовать значительную часть нашего повседневного опыта. Квантовая теория — объединение волны и частицы — явилась величайшим триумфом. Перед физикой, желавшей смело смотреть на факты и не пугаться загадок нового, она открыла совершенно новую область. Как именно она раскрыла глубины атома — это предмет следующей главы.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

1*. Как выглядели бы два графика на рис. 33.2, если бы электроны вырывались по волновой теории света? (Раздел 33.1.)

2. В некий фотоаппарат в сумерки через объектив попадает так мало света, что на 10 мм^2 за 0,01 с на пленку попадает в среднем один фотон. Что надо сделать, чтобы получить четкое изображение с высоким разрешением?

3*. Некоторая поверхность испускает электроны при падении на нее зеленого, но не желтого света. Следует ли ожидать испускания электронов при падении на нее:

а) красного света;

б) голубого света? (Раздел 33.4.)

4. Некоторые фотоматериалы не боятся красного света, но мгновенно портятся при включении белого света. Как это объяснить?

5*. Какие точки на рис. 33.9 были получены при фиолетовом освещении? (Раздел 33.5.)

6*. Какая наименьшая энергия в электрон-вольтах требуется фотону для вырывания электрона из фотоэмиттирующей поверхности, относящейся к рис. 33.9? (Раздел 33.5.)

7. В опыте, длившемся 3 месяца, Тэйлор определил световую энергию, попавшую на фотопластинку (см. раздел 33.3). Он нашел, что она составляет $5 \cdot 10^{-13}$ Дж/с. (Он получил это значение, сопоставив среднее почернение пластинки с тем почернением, которое создавала за 2 с свеча на расстоянии 2 ярдов без всяких экранов из закопченного стекла.) Пользуясь этим результатом, вычислите среднее расстояние между фотонами следующим образом:

а) Предположите, что длина волны применявшегося света была около 5000 Å. Какова энергия каждого фотона?

б) Вычислите для данного потока энергии средний промежуток времени между попаданием одного фотона и следующего за ним.

в) Из среднего промежутка времени вычислите среднее расстояние в пучке света между одним фотоном и следующим за ним.

г) Если бы вас спросили: «Сколько фотонов имеется в камере в какой-то определенный момент времени?», то вы должны были бы ответить: «Ни одного бо́льшую часть времени, но, глядя снова и снова, можно ожидать «увидеть» один фотон

в камере примерно за столько-то попыток». Сколько же надо сделать таких попыток? Предположите, что длина камеры 1,2 м.

8. Срисуйте график с рис. 33.9 в виде наброска в произвольном масштабе. Постройте другой график в том же масштабе, но для другой фотоэлектрической поверхности, например для металла, требующего для удаления электрона вдвое или втрое большей энергии.

9. Хорошее зеркало отражает около 80% падающего света. Как выяснить, происходит ли потеря в 20% вследствие того, что 20% фотонов не отражается, или из-за того, что у каждого отраженного фотона недостает 20% его начальной энергии?

10. Длина волны красного света составляет около 6500 Å.

а) Вычислите его частоту.

б) Вычислите энергию фотона этого света в электрон-вольтах.

в) Вычислите энергию того же фотона в джоулях.

г) Вспомните приближенные значения наибольшей и наименьшей длин волн видимого света и вычислите энергию соответствующих фотонов.

11. Свет с длиной волны 5000 Å освещает поверхность. Какое напряжение требуется для того, чтобы остановить все электроны, испускаемые поверхностью, если их энергия связи с поверхностью равна 2 эВ?

12. Обычная радиовещательная станция работает на волне длиной 3 м.

а) Вычислите энергию одного фотона в этом излучении.

б) Вычислите число фотонов, излучаемых за 1 с, если излучаемая мощность составляет 10 кВт.

в) Вычислите приближенное число фотонов, получаемых радиоприемником за время одного колебания звуковой частоты при произнесении буквы «с». Приемник удален на 100 км от передающей станции. (Сделайте следующие упрощающие предположения: 1) излучение распространяется равномерно во всех направлениях вдоль радиусов от источника, так что для потока энергии выполняется закон обратной пропорциональности квадрату расстояния,— в действительности это не соблюдается ни для какой антенны обычного типа; 2) приемная антенна собирает излучение с площади в 1 м^2, перпендикулярной к направлению распространения волн; 3) звук «с» создается колебаниями воздуха с частотой около 4000 периодов в секунду.)

г) Замечаете ли вы обычно отдельные фотоны, слыша звук «с»?

13. а) Сколько энергии переносится «средним» фотоном видимого света с длиной около 5000 Å? Каково его количество движения?

б) Вычислите число фотонов видимого света, испускаемых за секунду 100-ваттной электролампой, излучающей в видимой области 1% своей мощности.

в) Каково световое давление, создаваемое фотонами от такой лампы при их падении на черное тело, находящееся на расстоянии 2 м?

14. В некоторой рентгеновской трубке электроны ударяются о мишень после того, как они были ускорены разностью потенциалов 20000 В. При их замедлении на мишени до полной остановки некоторые из них испускают рентгеновские лучи.

а) Почему существует определенная наименьшая длина волны фотонов, испускаемых этой трубкой? (Этот предел получил название предела Дьюэна — Ханта.)

б) Вычислите эту наименьшую длину волны.

15. Фотон с длиной волны 1 Å сталкивается с «покоящимся» электроном. Фотон отскакивает под прямым углом к своей первоначальной траектории.

а) Начертите векторную диаграмму для количества движения фотона до столкновения и количества движения фотона и электрона после столкновения. (При таком столкновении относительная потеря энергии мала: ν' почти равна ν, и поэтому при построении векторной диаграммы количеств движения для определения направления отдачи электрона можно принять количество движения фотона после столкновения по величине практически равным его количеству движения до столкновения. Приняв, что отдача электрона определяется этим допущением, примените сохранение количества движения и сохранение энергии к получению ответов на следующие вопросы.)

б) Каково количество движения фотона после столкновения?

в) Какова кинетическая энергия электрона после столкновения?

г) Какова энергия фотона после столкновения?

д) Отличается ли ν' от ν?

16. Плоское зеркало освещается нормально падающим светом частоты ν. На единицу площади в единицу времени падает N фотонов.

а) Каково изменение количества движения одного фотона при отражении от зеркала?

б) Каково давление света на это зеркало?

в) Выразить давление через полную энергию E, падающую на единицу площади зеркала в единицу времени. Изменится ли давление от замены монохроматического света светом, распределенным по некоторому непрерывному диапазону частот?

г) Каково числовое значение этого давления, если известно, что освещенность соответствует 10^3 Дж/(м^2·с)? (Приблизительно такая освещенность имеет место при прямом падении солнечных лучей в полдень в летнее время.)

17. Из величин плотности кристаллов и из числа Авогадро известно, что слои атомов в кристаллах находятся на расстоянии нескольких ангстрем друг от друга, например $3 \cdot 10^{-10}$ м. Рентгеновские лучи от обыкновенных рентгеновских трубок дифрагируют на таких кристаллах, действующих в качестве дифракционных решеток, под довольно большими углами, скажем 10°. Проделайте приближенное вычисление энергии фотонов в таких рентгеновских лучах.

18. Чему равна длина волны электрона, имеющего скорость $1 \cdot 10^7$ м/с? (Раздел 33.8.)

19*. При увеличении угла θ на рис. 33.18 луч будет вновь очень интенсивно отражаться кристаллом. Чему должна при этом равняться величина $2d\sin\theta$? (Раздел 33.8.)

20. Узкий пучок 100-вольтовых электронов пропускается через две параллельные очень близкие щели. Расстояние между щелями оценивается в 100 Å. Электроны, прошедшие через щели, попадают на экран, находящийся на расстоянии 3 м, и образуют картину интерференционных полос. (По-видимому, совершенно невозможно приготовить такую пару щелей в каком-либо реальном веществе, состоящем из атомов, которые сами имеют диаметр 1 Å и более; и еще труднее измерить расстояние между такими щелями, так как свет имеет длину волны в тысячи ангстрем. Однако можно сделать прибор, заменяющий такую пару щелей. Он был сделан и применялся. Это «бипризма» на рис. 33.12,*б*.)

а) Вычислите расстояние между одной светлой полосой и следующей за ней.

б) Светлые полосы будут выглядеть как светлые линии на флуоресцирующем экране, достаточно чувствительном для того, чтобы светиться при бомбардировке 100-вольтовыми электронами (или это будут темные линии на фотопленке, или, наконец, большие отклонения стрелки на каком-либо измерительном приборе, присоединенном к коллектору электронов). К чему сводится существенное различие между электронами, дающими светлые полосы, и теми электронами, которые достигают экрана, попадая в темную полосу: обладают они большими размерами или большей массой? Или лучшего качества? Или обладают бо́льшим зарядом или чем-нибудь еще?

21. Электроны, проходящие через двойную щель (хотя и фантастическую, но все же возможную, как разъяснено в предыдущей задаче), создают интерференционную картину на удаленном экране. Если напряжение в электронной пушке, употребляемой для получения первоначального потока электронов с определенной кинетической энергией, изменить с 50 В на 5000 В, то как это отразится на расстоянии между полосами?

22. Размеры атомных ядер трудно измерить с помощью α-частиц, так как при этом приходится искать малые отклонения от кулоновского рассеяния. Для этого часто применяются нейтроны.

а) Чему равны длины волн де Бройля для нейтронов с кинетической энергией 10^4 эВ? 10^6 эВ? 10^8 эВ?

б) Сравните эти длины волн с диаметром ядра золота ($15 \cdot 10^{-15}$ м).

в) Взгляните снова на рис. 33.15 для того, чтобы видеть, как ведут себя волны, когда они встречают препятствие. Предположите, что поток нейтронов бомбардирует небольшую мишень из золота. Для какой из нейтронных волн, перечисляемых в п. а), вы ожидаете найти, что: 1) большинство нейтронов прохо-

дит сквозь ядра, не испытывая никакого отклонения; некоторые из них поглощаются, а некоторые отскакивают подобно шарикам в ньютоновской механике; 2) большинство нейтронов проходит через ядра без заметного возмущения, а октальные выходят из золотой мишени равномерно по всем направлениям независимо от вида ядра.

г) Нейтронами какой энергии вы предпочли бы измерять размеры ядер?

23. а) Чему равна длина волны рентгеновских лучей, каждый фотон которых обладает энергией 40 000 эВ?

б) Электроны какой энергии имеют длину волны де Бройля, равную длине волны 40 000-вольтовых рентгеновских лучей? (Ответ дайте в электрон-вольтах.)

в) Чему равна энергия теннисных мячей?

г) Чему равна длина волны теннисного мяча, движущегося со скоростью 10 м/с?

24. Зависимость между энергией фотона в электрон-вольтах и длиной волны в ангстремах приведена в тексте, набранном мелким шрифтом на стр. 205.

а) Вывести аналогичное соотношение между кинетической энергией частицы и ее де-бройлевской длиной волны.

б) Если частицей является электрон и его кинетическая энергия накапливается путем его ускорения на известной разности потенциалов, какова будет зависимость де-бройлевской длины волны в ангстремах от пройденной разности потенциалов в вольтах?

в) Какова энергия электронов, длина волн которых соответствует желтому свету?

25. На рис. 33.20 показан электронномикроскопический снимок белковых молекул.

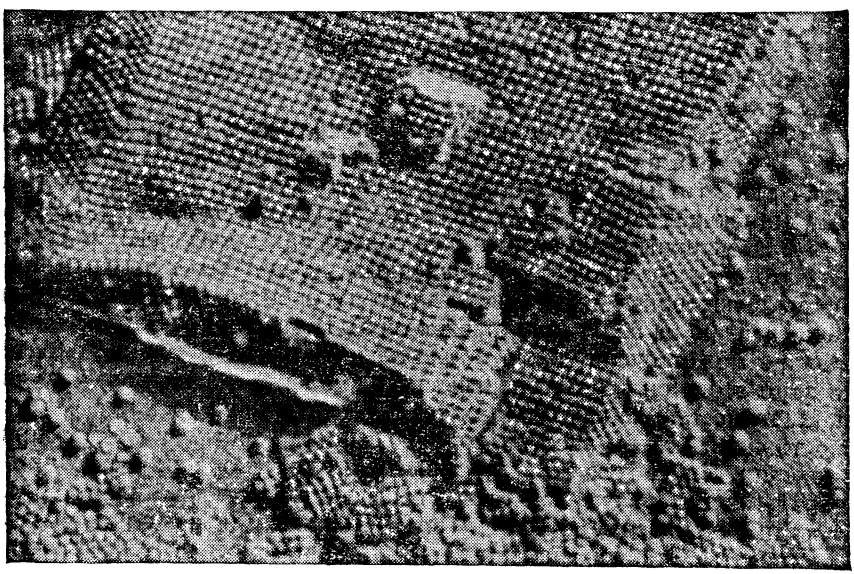


Рис. 33.20. К задаче 25.

а) Вычислить размеры молекул на основании снимка.

б) Найти отношение диаметра молекулы к длине волны видимого света. Почему эти молекулы не могут наблюдаться в видимом свете?

в) Почему белковые молекулы можно фотографировать, если использовать электроны вместо света?

ГЛАВА

34 КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ И СТРОЕНИЕ АТОМОВ

Введение

Главой 33 мы начали физику XX столетия. Описанные там прямые и убедительные опыты показали, что старая картина мира с волнами для света и частицами для вещества была слишком упрощенной. Природа сложнее этих устарелых моделей: фотоны, с одной стороны, и волны де Бройля, с другой,— вот в чем основная сложность. Старая механика оказалась недостаточной. Энергия и количество движения сохраняются в каждом отдельном событии, но для описания общей картины явлений необходима волновая механика. Например, каждый электрон, попадающий на детектор, передает количество движения и энергию в согласии с законами сохранения, но чтобы узнать, куда электроны попадают чаще всего, необходима волновая картина. С помощью понятия вероятности мы нашли простую единую точку зрения, объединяющую волновое и корпускулярное поведение. Глава 33 заканчивалась, таким образом, спокойной нотой победы.

Глава 32, однако, заканчивалась неприятной загадкой. Опыты по рассеянию, в которых в качестве зондов применялись α-частицы, показали, что атом представляет собой ажурное строение, чем-то напоминающее гигантскую ньютоновскую махину — Солнечную систему. Электроны здесь кружились совсем как крошечные планеты. Все это казалось прочно установленным, но привело к трудной проблеме. Электроны, движущиеся по своим орбитам должны тратить всю энергию на излучение (раздел 32.5). В отличие от Земли, электрон не может очень долго оставаться на одной и той же орбите. Вместо этого он теряет энергию в виде электромагнитного излучения, точно так же как спутник теряет энергию при трении о воздух; постоянная потеря энергии должна сжимать орбиту к центру притяжения. Иначе говоря, вследствие того, что ускоренно движущиеся заряды излучают энергию, атом, построенный согласно планетарной модели Резерфорда, не мог бы быть устойчивым и мир не мог бы существовать. Эта невозможность планетарной модели ясно указала на ограниченность классической физики. Объединение механики Ньютона и классического электромагнетизма не может правильно описать атомы.

Помимо этого основного затруднения — потеря энергии через излучение — физики имели другое основание сомневаться в том, что законы механики Ньютона смогут объяснить атом Резерфорда.

Солнечная и атомная системы обе могут быть планетарными, но при переходе к очень малому масштабу возникает качественное отличие.

Мы можем представить себе некую внешнюю причину (например, блуждающую звезду), которая изменит нашу солнечную систему в любой степени — малой, средней или большой — вплоть до разрушения, но когда причина возмущения будет устранена, создается новое расположение масс. Можно представить себе солнечную систему с широким диапазоном размеров, с орбитами, массами и числом планет, отличными от наших, но столь же устойчивую, как наша. Собрание подобных солнечных систем, которые мы можем найти вокруг других звезд, будет сходно с другими объектами, наблюдаемыми в природе; подобно розам в букете или дождевым каплям, они будут обладать сильным семейным сходством, но будут солнцами и планетами различных размеров с различными орбитами; среди них не будет даже двух совершенно сходных.

С атомами обстоит дело совсем по-другому. Наиболее замечательным свойством атомов является их сходство друг с другом. Все атомы водорода вступают во взаимодействие одинаково, все атомы гелия одинаковы и т. д. Атомы одного вида более сходны, чем бобы первого сорта. Правда, у этих атомов различные судьбы: различные эпизоды столкновений, ионизаций и химических соединений сменяют друг друга. Но они проходят через все это, оставаясь неизменными, давая те же спектральные линии и вступая в те же химические реакции с теми же количествами энергии *). Атом может быть планетной системой, но он — планетная система, которая существует в миллиардах тождественных экземпляров.

Тождественность атомов и устойчивость их внутренних движений необъяснима с точки зрения ньютоновских законов механики. Это свойство повторяемости требует нового объяснения, требует основательного изменения теории. При этом происходит нечто замечательное: представления, которые мы ввели, чтобы придать смысл фотонам и волнам де Бройля, одновременно дают ясное и исчерпывающее объяснение тождественности и устойчивости атомов. Для учета волнового поведения вещества мы должны изменить механику Ньютона, превратив ее в новую, квантовую механику. Тогда мы найдем путь к объяснению всего, что мы до сих пор наблюдали в строении материи. Объединенный взгляд на волновое и корпускулярное поведение охватывает все, что нам известно о природе.

34.1. Опыты Франка и Герца. Атомные уровни энергии

В планетной системе, согласно ньютоновской механике, возможны движения с любыми значениями полной энергии. С другой стороны, мы подозреваем, что для атома может иметь место только

*) Хотя атомы одного элемента имеют в основном одинаковое строение, они могут, как мы увидим ниже, приобретать энергию и переходить в «возбужденное состояние». Однако, в отличие от солнечной системы, которая будет сохранять любое внесенное в нее изменение, возбужденный атом, когда он предоставлен самому себе, переходит обратно в начальное состояние.

ограниченная (дискретная) совокупность движений. Мысль о таком ограничении вызывается воспроизводимостью состояний атомов и их устойчивостью. На это указывает также тождественность представителей одного атомного вида.

Если возможны только определенные схемы движения, то следует ожидать, что атомная система может обладать только определенными величинами полных энергий, соответствующих этим движениям. Тогда должны существовать промежутки между возможными энергиями; и, в таком случае, внутренняя энергия атома может изменяться только на определенные количества энергии, сообщаемые извне.

Действительно ли существуют промежутки между возможными энергиями, которые может иметь атом? Непосредственная проверка этой мысли весьма важна. Ее можно произвести, пытаясь изменить энергию атомов непосредственно, бомбардируя их электронами. Может ли атом, который сталкивается с электроном, получить некоторую энергию и сохранить ее, как добавку к его внутренней энергии? Если это так, то может ли он сохранить *любую* добавку, от малой до большой, или он ограничен набором строго определенных количеств энергии? Такая проверка была произведена в 1914 г. в Германии. Джемс Франк и Густав Герц провели опыт с бомбардировкой электронами атомов ртути, за который впоследствии они получили Нобелевскую премию. Этот опыт и многие другие, которые были им стимулированы, являются ключом к вопросам устойчивости и строения атомов. Здесь будет описан опыт, несколько отличающийся от первоначальных опытов Франка и Герца, но дающий те же сведения с помощью весьма сходных средств. Данный опыт выбран потому, что его легче истолковать, хотя и труднее провести.

Следуя Франку и Герцу, используем электроны для бомбардировки атомов. Это можно сделать, применяя электронную пушку, подобную тем, которые описаны в гл. 26. Электронная пушка сообщает кинетическую энергию электронам, испаряющимся с раскаленной проволочки. Если ускоряющее напряжение в пушке равно V_A, то электроны покидают пушку с кинетической энергией, равной произведению одного электронного заряда на V_A вольт, или V_A электронвольт.

Электроны, выйдя из пушки, переходят в камеру сквозь малое отверстие, а электронная пушка работает в хорошем вакууме, потому что любой газ, который попадает из камеры в пушку, непрерывно и быстро откачивается (рис. 34.1). Камера, содержащая газ, изготовлена из электропроводящего материала, так что вся она находится при одном потенциале и внутри нее нет электрического поля, которое могло бы изменять энергию электронов. Следовательно, любое изменение энергии электронов возникает благодаря их взаимодействию с атомами газа.

Теперь с целью исследовать, что же происходит с электронами, когда они сталкиваются с атомами газа, позволим некоторым электронам выходить из газовой камеры сквозь другое малое боковое от-

верстие, ведущее во второе откачанное пространство. Здесь измеряется энергия электронов, прошедших сквозь газ. Это измерение можно произвести одним из ряда способов. Например, применим магнитный масс-спектрограф, подобный описанному в гл. 30. Тогда, зная массу электрона и кривизну траектории электрона в магнитном поле, можно определить энергию. Энергию электрона можно также определить, заставив электрон двигаться против замедляющей разности потенциалов, которая как раз не позволяет электронам достигнуть коллектора. Можно даже пользоваться измерениями времени пролета в детектирующей камере для нахождения скорости электрона и затем его кинетической энергии.

Детали этих измерений оказываются на практике очень сложными, но, несмотря на затруднения, мы в результате определяем искомую энергию электронов после столкновения с атомами газа.

Какие же сведения дает такой прибор? Рассмотрим какой-либо пример. Что произойдет, если в газовой камере находятся пары ртути? Пока ускоряющий потенциал в электронной пушке составляет только несколько вольт, мы находим, что электроны, попадающие в коллектор после столкновений с атомами газа, обладают почти той же самой энергией, которая была сообщена им пушкой. Столкновения с атомами газа при этой низкой энергии являются упругими. (При таких столкновениях массивные атомы получают незначительную долю кинетической энергии). Однако, когда ускоряющий потенциал переходит за 5 В, так что электроны, бомбардирующие атомы, обладают кинетической энергией в 5 эВ или больше, происходит драматическое изменение. Электроны, попадающие в детектор, больше уже не имеют той энергии, с которой они покидали пушку; практически они совсем не имеют кинетической энергии.

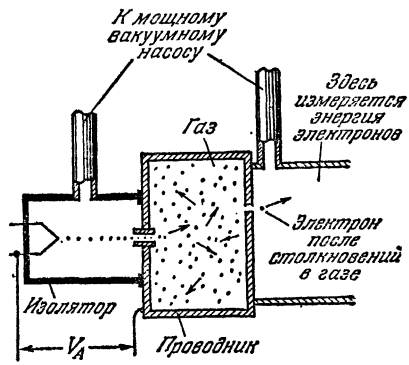


Рис. 34.1. Общая схема опыта для определения изменений энергии электронов, сталкивающихся с атомами газа. Электроны проходят через газ (ртутный пар) в средней камере. Они выходят из пушки с энергией, сообщаемой им ускоряющим напряжением. Энергия электронов после столкновений измеряется в камере справа. Обратите внимание на то, что отверстие в камеру (справа) для измерения энергии не находится на одной прямой с первоначальным пучком электронов. Это сделано для того, чтобы обеспечить попадание в эту камеру только тех электронов, которые отклонились при столкновениях.

Увеличим теперь потенциал пушки так, чтобы кинетическая энергия бомбардирующих электронов возросла. Мы обнаружим также увеличение и энергии электронов, достигающих детектора. При повышении V_A с 5 до 6 В кинетическая энергия электронов, измеренная в детекторе, возрастает от малой доли электрон-вольта до значения, превышающего предыдущее на 1 эВ. Тщательные измерения, в которых точно определяются напряжение на пушке и кинетическая

энергия в детекторе, показывают, что в столкновениях с атомами электроны теряют почти точно 4,9 эВ. Эта потеря происходит только тогда, когда бомбардирующий электрон имеет кинетическую энергию 4,9 эВ и величина этой потери остается неизменной при дальнейшем увеличении энергии снарядов еще на пару электрон-вольт. Атом ртути не может поглощать энергию в количествах, меньших 4,9 эВ, и даже когда к нему подводится несколько бо́льшая энергия, он все же принимает это же самое количество.

Однако 4,9 эВ — не единственное количество энергии, которое атом может получить. Если бомбардирующая энергия составляет 6,7 эВ или более, то электроны потеряют либо 4,9, либо 6,7 эВ. При дальнейшем увеличении бомбардирующей энергии мы найдем другие пороги, при которых могут происходить большие потери и за пределами которых любое из нескольких дискретных количеств энергии может быть отнято от электронов. Это и есть основное свойство, которое искали Франк и Герц: атомы могут изменять свою внутреннюю энергию, но эти изменения ограничены строго определенными ступенями.

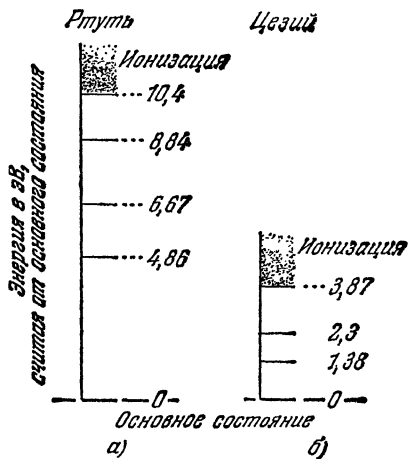


Рис. 34.2. *а*) Некоторые энергетические уровни атома ртути. На этой диаграмме энергия в нормальном, основном состоянии принята за нуль; показано несколько вполне определенных порций энергии, которые способен принять атом. *б*) Такая же диаграмма для атома цезия.

Наименьшее количество энергии, которое может быть воспринято атомом, называется его наименьшей *энергией возбуждения*. Для ртути энергия возбуждения составляет 4,9 эВ. Для гелия, который имеет самую высокую энергию возбуждения, ее значение равно 19,8 эВ. Наименьшая энергия возбуждения из всех атомов приходится на цезий, который не отказывается от порции в 1,4 эВ. Другие атомы также принимают определенные порции энергии, и эти порции характерны для каждого вида атомов.

Описанный нами эксперимент является идеализацией; приведенные нами результаты были собраны из ряда подобных опытов, приводящих к согласующимся данным. Таким образом, опыт Франка и Герца и его позднейшие видоизменения показали, что атомы могут принимать только определенные порции энергии. Внутренняя энергия атома не может изменяться непрерывно. Она изменяется только ступенями. Последовательные значения внутренней энергии, которые может иметь атом, называются его *энергетическими уровнями*. Часто они изображаются схематически так, как показано на рис. 34.2.

Основное состояние атома есть то состояние, в котором мы находим атом до того, как ему была сообщена какая-либо энергия возбуждения. Выше основного лежат различные возбужденные состояния, разделенные промежутками. Эти возбужденные состояния возникают, когда атому ударяющим электроном сообщается соответствующая данному уровню порция энергии. Наконец, когда об атом ударяется электрон с достаточно высокой энергией, то атом фактически разрушается. Из атома выбрасывается электрон, после чего остается положительный ион. Так как энергия выброшенного электрона может иметь любые значения, то атом может принять любую порцию энергии, которая превышает энергию ионизации. Для ртути, как указано на рис. 34.2, энергия ионизации оказывается равной 10,4 эВ.

С помощью электронных столкновений были изучены атомы многих элементов. Из этих опытов было найдено, что каждый вид атомов имеет свою собственную совокупность уровней энергии и свою собственную энергию ионизации. Совокупность уровней энергии и энергия ионизации определяют индивидуальность атома так же, как его способность вступать в химические реакции или его оптический спектр.

34.2. Последовательное возбуждение спектральных линий. Возбуждение и испускание

Существование уровней энергии убедительно подтверждается и совершенно иными средствами измерения. При бомбардировке газа электронами наблюдается свет, испускаемый газом. При низких энергиях бомбардирующих электронов мы не видим свечения газа. Но при переходе через наименьшую энергию возбуждения свет внезапно появляется. Исследуя этот свет с помощью спектроскопа, мы видим резкую линию, указывающую на излучение света с определенной длиной волны и частотой, т. е. указывающую на фотоны какой-то одной энергии.

Например, со ртутью, когда бомбардирующие электроны переходят за 4,9 эВ, спектроскоп, в который мы наблюдаем газ, внезапно показывает присутствие ультрафиолетового света, имеющего длину волны 2537 Å. Эта яркая спектральная линия является одной из линий, по которым распознается спектр ртути. Но такой спектр ртути с одной линией необычен. От разрядной трубки, наполненной ртутным паром, мы обычно видим много характерных спектральных линий ртути, много линий определенной длины волны, которые позволяют опознать этот элемент. Здесь же мы получили только одну часть нормального спектра ртути.

Опыты, описанные в предыдущем разделе, свидетельствуют о том, что в данном случае нам удалось сообщить некоторым атомам ртути в газе порции энергии по 4,9 эВ. Мы начинаем видеть это излучение ртути только тогда, когда сообщены такие порции энергии. Видимо, энергия возбуждения, которую мы сообщаем за счет кинетической энергии электронов, излучается в виде фотонов отдельными атомами

по мере того, как они возвращаются в основное состояние. (Вспомните, что основное состояние является состоянием с наиболее низкой энергией — состоянием, в котором атом ртути находится на естественном уровне энергии до того, как ему передана энергия 4,9 эВ от столкнувшегося с ним электрона.)

Если атом получает энергию сразу в виде целой порции, то фотоны должны иметь энергию 4,9 эВ и длина волны соответствующего света должна быть равна *)

$$\lambda = \frac{12\,400\ \text{эВ}\cdot\text{Å}}{E} = \frac{12\,400\ \text{эВ}\cdot\text{Å}}{4{,}9\ \text{эВ}} = 2530\ \text{Å}.$$

Если бы атом ртути мог получать свою избыточную энергию в количестве более одного фотона, то был бы виден свет с бóльшими длинами волн. Следовательно, опыт со спектроскопом показывает, что атомы не только принимают от электронов определенное количество энергии, но что, возвращаясь в нормальное состояние, они в данном случае могут излучать только в точности то же количество энергии. Как получая энергию от электронной бомбардировки, так и испуская энергию в виде света, атомы одним скачком совершают переходы между двумя энергетическими состояниями, расстояние между которыми составляет немного менее 4,9 эВ (рис. 34.3). Это представляет собой замечательное подтверждение того предположения, что атомы могут испытывать только вполне определенные дискретные изменения их внутренней энергии.

Продолжим опыт со спектроскопом, увеличивая энергию, с которой электроны бомбардируют атомы ртути, и будем наблюдать свет, который они испускают. По мере увеличения энергии бомбардировки появляются остальные известные линии спектра ртути. Они появляются группами по мере того, как энергия бомбардировки последовательно повышается над порогами возбуждения все более и более высоких энергетических состояний. Следовательно, такой способ позволяет как бы разделять спектр ртути и наблюдать, как он возникает.

До того как атом испытал удар электрона, он находится в состоянии, соответствующем самой низкой внутренней энергии, т. е. в основном состоянии. Если об атом ударится электрон с энергией, которая меньше разности энергий между основным состоянием и первым возбужденным состоянием, то с атомом не произойдет ничего. Однако электрон с большей энергией может передать энергию внутрь атома. Если этой энергии достаточно только для достижения первого возбужденного состояния, то от электрона будет отнята энергия, как раз равная энергии первого возбуждения, и атом затем излучит фотон, который примет участие в создании линии 2537 Å — первой из появившихся линий. Фотоны излучаются многими атомами ртути, и все фотоны имеют одинаковую энергию, так как каждый отдельный атом переходит с первого возбужденного состояния в основное. Если

*) Это выражение уже было выведено в разделе 33.6.

электроны могут дать еще больше энергии, то отдельные атомы могут возбудиться до еще более высоких уровней внутренней энергии. Тогда при возвращении атома в основное состояние он может излучить

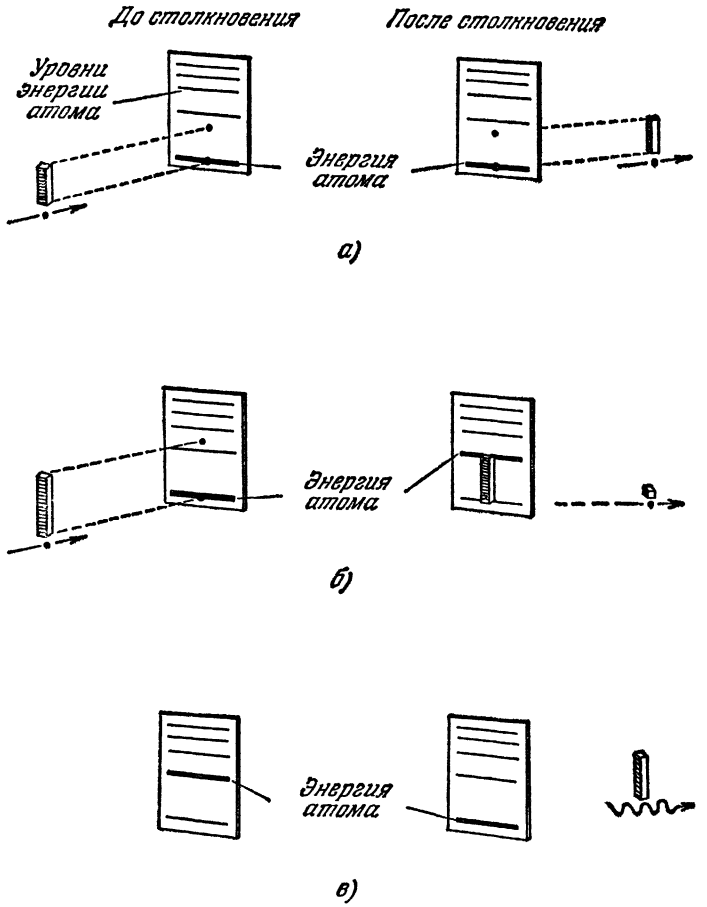


Рис. 34.3. Изменения энергии при бомбардировке атома электронами. *а*) Упругое столкновение между бомбардирующим электроном и атомом. Стрелка показывает путь приходящего электрона. «Груз» над электроном представляет его кинетическую энергию. Атом и его уровни энергии представлены прямоугольниками. В рассматриваемом случае у электрона недостаточно энергии для того, чтобы поднять атом на ближайший, более высокий энергетический уровень, вследствие чего электрон рассеивается упруго, сохраняя свою кинетическую энергию. *б*) Здесь электрон имеет больше энергии. Атом поглощает ровно столько энергии, сколько ему нужно, чтобы достигнуть своего второго уровня, а электрон уносит только избыточную кинетическую энергию. Произошло неупругое столкновение. *в*) Атом находится на своем втором энергетическом уровне, в возбужденном состоянии. Возвращаясь в основное состояние, атом испускает фотон с энергией, равной разности энергий между обоими состояниями.

фотон с большей энергией или, возможно, несколько фотонов с энергиями, равными разностям энергий между несколькими внутренними энергетическими состояниями, в которых может существовать атом.

В излучении фотонов, как и во всех известных нам процессах, энергия сохраняется. Энергия $h\nu$ испущенного фотона равна разности между начальной и конечной внутренней энергией атома при его переходе из одного состояния в другое:

$$E_{\text{ф}} = h\nu = E_{\text{н}} - E_{\text{к}}.$$

Каждая спектральная линия образована излучением многих атомов; во всех атомах независимо друг от друга происходят переходы между одними и теми же внутренними энергетическими состояниями. На рис. 34.4 проанализирован спектр ртути и показана его связь с энергетическими уровнями атома ртути. Вертикальные прямые на схеме энергетических уровней показывают энергии фотонов, которые могут быть испущены. Для испускания каждого фотона какой-либо один атом должен перейти скачком из более высокого энергетического состояния вниз, в более низкое состояние, и фотон при этом уносит с собой освобождаемую энергию.

Обратите внимание на то, что линии ртути с большей длиной волны соответствуют перескокам между состояниями, которые оба находятся выше основного состояния. Разности их энергий меньше, так что испущенные фотоны обладают более низкой частотой и большей длиной волны. Однако для получения таких длинноволновых линий некоторые атомы ртути должны быть сначала проведены в более высокие энергетические состояния. Для этого требуется более 5 эВ. Так можно объяснить явление, которое иначе представляется странным: длинноволновые линии ртути образованы фотонами с энергией, которая мньше 5 эВ, но для их получения требуются электроны с энергией, которая больше той, которая нужна для получения яркой линии при 2537 Å. Причина ясна: спектральные линии образуются переходами атомов между отдельными внутренними энергетическими состояниями. Ни одного из этих начальных состояний, необходимых для таких длинноволновых переходов, нельзя достигнуть из основного состояния ртути без сообщения энергии, которая должна быть безусловно выше 5 эВ.

До сих пор предполагалось, что атомы ртути в нормальном состоянии находятся на наиболее низком уровне энергии, т. е. в основном состоянии. Это справедливо при низкой температуре. Однако при повышении температуры столкновения между атомами ртути становятся более сильными. При достаточно высокой температуре некоторые столкновения атомов могут оказаться неупругими, точно так же как это бывает при столкновениях с электронами. После таких столкновений один или оба сталкивающихся атома остаются в возбужденном состоянии. Когда в возбужденных состояниях оказывается достаточное число атомов, газ начинает светиться. Свет испускается по мере того, как атомы возвращаются в основное состояние, время от времени переходя с одного энергетического уровня на другой и испуская при этом фотоны, иногда перескакивая с очень высокого уровня на низкий с испусканием высокочастотного фотона.

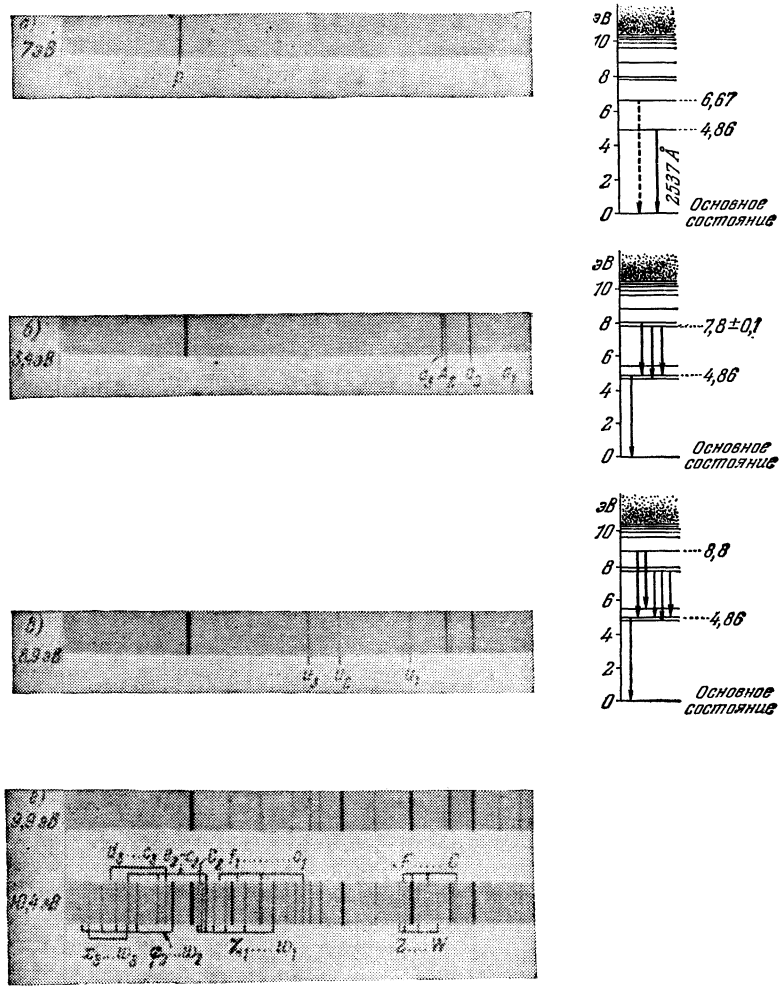


Рис. 34.4. Постепенное возбуждение спектра ртути при возрастании энергии бомбардирующих электронов. Фотоснимки показывают спектральные линии, которые появляются при бомбардировке ртутного пара электронами. В каждом случае бомбардирующие электроны обладают определенной энергией, которая указана слева от фотоснимка. *а)* В случае электронов с любой энергией выше 4,9 эВ испускается яркая ультрафиолетовая линия с длиной волны 2537 Å. Это соответствует, как показано справа, изменению энергии атома при переходе из первого возбужденного состояния в основное состояние. Когда энергия электрона приближается к 7 эВ, имеется также изменение энергии с 6,67 эВ до основного состояния, дающее линию с длиной волны 1849 Å. Длина волны такого света, однако, слишком коротка для того, чтобы подействовать на фотопластинку. Здесь этот переход показан прерывистой стрелкой. В последующих рисунках эта стрелка убрана. *б)* При 8,4 эВ в фотографируемой области появляются три новые линии бо́льшей длины волны. Соответствующие фотоны имеют энергию, которая дает переход с уровней вблизи 7,8 эВ на уровни вблизи 4,9 эВ. *в)* Если энергию бомбардирующих электронов поднять до 8,9 эВ, то появляются еще две линии промежуточной длины волны. Фотоны обладают энергиями, которые получаются при переходах с уровней вблизи 8,8 эВ на уровни вблизи 4,9 эВ. *г)* При дальнейшем увеличении напряжения, ускоряющего электроны, появляется все больше и больше линий. При 10,4 эВ атом ионизуется, и получается полный спектр. Здесь надписи над фотоснимком и под ним помогают различать группы линий.

Высокие температуры, электронные столкновения (и любой другой способ возбуждения свечения атомов газа) являются средствами перевода атомов в возбужденные состояния. Атомы испускают фотоны, энергии которых соответствуют разностям энергий между атомными энергетическими уровнями. Эти фотоны и создают спектр атома. Данный сорт атомов может испускать только линии, которые обладают характеристическими частотами, определяемыми разностями между энергетическими уровнями:

$$\nu = (E_н - E_к)/h.$$

Разумеется, различные методы сообщения энергии газу могут приводить к тому, что в различных возбужденных состояниях находится различное число атомов. Как мы увидим в следующем разделе, фотоны света одной длины волны могут возбудить атомы до одного более высокого энергетического уровня; и лишь немногие из других состояний могут быть достигнуты в процессе излучения и возврата атомов к основному состоянию. Тщательно отрегулированный пучок электронов с энергией 5 эВ дает только первое возбужденное состояние ртути. Высокие температуры производят иное действие. Столкновения беспорядочно движущихся атомов могут поднять внутренние энергии нескольких атомов на высокие энергетические уровни, но при этом имеется много атомов на низких уровнях. Таким образом может изменяться яркость линий, хотя отдельная линия атома всегда имеет одну и ту же частоту, где бы она ни появилась.

34.3. Спектры поглощения

Спектры испускания — яркие линии, которые мы видим в спектрах возбужденных атомов,— не единственные спектры, с помощью которых мы получаем сведения о состояниях внутренней энергии атомов. Подобную же информацию можно получить, посылая сквозь газ белый свет и затем анализируя его с помощью спектроскопа. Белый свет представляет собой смесь (в определенных пределах) всех частот; соответственно он содержит и фотоны всех возможных энергий. Большинство этих фотонов проходит сквозь газ и обнаруживается в спектре на фотопластинке. Они не поглотились, потому что энергия фотона не всегда может быть принята атомом для совершения перехода с одного внутреннего энергетического уровня на другой. Но некоторые фотоны захватываются. Их отсутствие обнаруживается в виде узких пробелов в спектре света, прошедшего сквозь газ. Каждый недостающий фотон был поглощен атомом, когда этот фотон вызывал переход атома с одного внутреннего энергетического уровня на другой. Эти пробелы в спектре соответствуют вполне определенным внутренним энергетическим состояниям атома (рис. 34.5).

Здесь применимы такое же объяснение, как для спектров испускания, и тот же самый закон сохранения энергии; только последовательность процессов другая (рис. 34.6). В этом случае начальным состоянием атома является более низкое внутреннее энергетическое

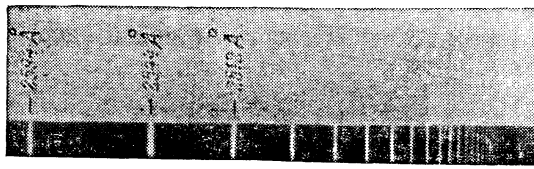


Рис. 34.5. Коротковолновая область спектра поглощения натрия. Так как этот рисунок представляет собой репродукцию фотографического негатива, то поглощенные длины волн выглядят как светлые линии на непрерывном темном фоне.

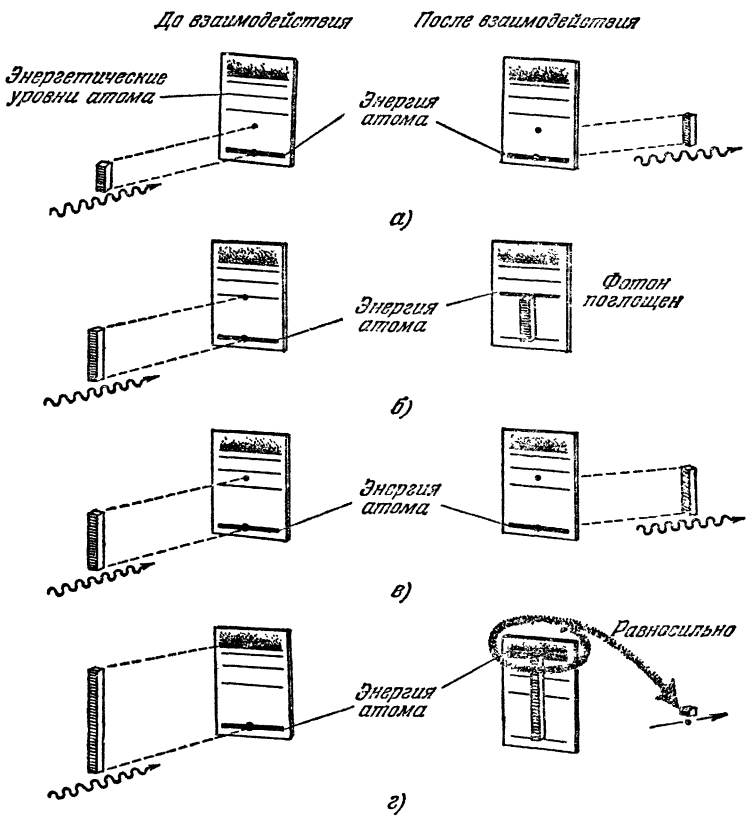


Рис. 34.6. Изменение энергии, происходящее при бомбардировке атома световыми фотонами различных энергий. «Груз», изображенный над фотоном, представляет его энергию. *а*) Атом находится в основном состоянии, а фотон имеет слишком малую энергию для того, чтобы перевести атом в ближайшее возбужденное состояние. Фотон просто проходит сквозь атом или упруго рассеивается. *б*) Фотон имеет как раз такую энергию, которая необходима и достаточна для перевода атома в его первое возбужденное состояние Фотон поглощается атомом, который забирает всю его энергию. *в*) Фотон таков, что у него энергии больше, чем нужно для возбуждения атома, но недостаточно для достижения другого возбужденного состояния. Этот фотон тоже должен рассеяться упруго, так как, если бы он был поглощен, атом не мог бы одновременно обеспечить сохранение энергии и оказаться на дозволенном энергетическом уровне. Единственной возможностью является испускание атомом такого же фотона. *г*) В этом случае фотон таков, что его энергии достаточно для ионизации атома. Он переводит атом в область энергетических уровней с положительными значениями энергии. Это лишь другая формулировка утверждения, что электронная оболочка атома нарушена и что снятый с орбиты электрон уносит в виде кинетической энергии избыток энергии сверх ионизационного порога.

состояние; конечное состояние лежит выше, потому что оно соответствует сумме полной исходной энергии атома и энергии поглощенного фотона света:

$$E_к = E_н + E_ф = E_н + h\nu.$$

Отсюда можно, например, понять, почему ртутный пар при комнатной температуре прозрачен для видимого света. Ни один фотон в видимом свете не обладает энергией, достаточной для перевода атома ртути из основного состояния в его первое возбужденное состояние. Подходящие для этого фотоны появляются только в ультрафиолетовом свете с длиной волны 2537 Å. Как и следовало ожидать, именно этот свет очень сильно поглощается. То же самое заключение применимо к другим, обычно бесцветным газам — кислороду, азоту, гелию и всем остальным. Они могут поглощать свет только в ультрафиолетовой области. И там мы находим ряд линий поглощения.

Если частота света достаточно велика и лежит в далекой ультрафиолетовой области или за ее пределами, фотон может полностью удалить электрон из атома. Атом оказывается ионизованным, и любой избыток энергии уносится электроном в виде кинетической энергии. Это и есть фотоэлектрический эффект. Не существует предела для количества кинетической энергии, которая может быть сообщена электрону. Поэтому нет никаких ограничений для частоты света, который выбрасывает электроны, при условии, что она превосходит определенное минимальное «пороговое» значение. Наблюдаемый порог фотоэлектрического эффекта в атомах дает как раз минимальную частоту, необходимую для того, чтобы полностью оторвать электрон от атома. Спектральные данные при этом полностью согласуются с данными, полученными при наблюдении фотоэлектронов.

Любой свет, любое электромагнитное излучение могут возбуждать атомы или испускаться ими при скачках или переходах между энергетическими уровнями. Рассмотрим, например, случай излучения, испускаемого далеко за областью видимого света. Хотя мы привыкли думать о взаимодействии радиоволн с антеннами, а не с атомами, излучение атомных спектров при радио- и микроволновых частотах является современным и мощным орудием для физика и химика. Благодаря большой длине радиоволн их фотоны обладают малой энергией, и следовательно, они возникают за счет переходов между энергетическими уровнями, лежащими очень близко друг от друга. Все щелочные металлы — литий, калий, рубидий и цезий (и натрий.— *Прим. ред.*) — имеют пáры близколежащих энергетических уровней. Фотоны от переходов между такими пáрами энергетических уровней находятся в радиочастотной части спектра. В частности, основное состояние элемента цезия представляет собой пару уровней энергии, разделенных примерно $4{,}14 \cdot 10^{-5}$ электрон-вольтами. Излучение от перехода между такими энергетическими уровнями имеет частоту

$$\nu = 9{,}19263177 \cdot 10^9 \text{ периодов в секунду.}$$

Эта частота сейчас применяется в качестве стандарта частоты и времени.

Изучение спектра оказалось лучшим ключом к измерению энергетических уровней любого излучающего атома. Но потребовалась большая изобретательность для того, чтобы установить это, и с помощью этих ключей установить уровни энергии. Если известны длины волн спектральных линий, их нужно перевести в частоты, а частоты изучить и увязать друг с другом так, чтобы найти сами энергетические уровни.

Каждая спектральная линия дает разность двух уровней энергии, и несколько уровней могут дать довольно сложную совокупность десятков и сотен линий. Таким образом, это не легкое дело. Разобраться в этой сложной картине помогают спектры поглощения, спектры возбуждения при поглощении фотонов, а также другие особые виды спектров возбуждения. Используя все эти возможности, спектроскописты в конце концов представляют свои результаты в виде таблицы или схемы энергетических уровней, принадлежащих изучаемому атому. В результате их трудов были точно установлены многочисленные внутренние энергетические состояния практически для всех видов атомов.

34.4. Уровни энергии атома водорода

Энергетические уровни атомарного водорода и некоторые из его спектральных линий представлены на рис. 34.7. Это — результат работы почти двух поколений спектроскопистов; в нем представлена структура уровней простейшего из атомов.

Замечательно то, что все эти многочисленные энергетические уровни, которые порождают еще большее число спектральных линий, могут быть представлены весьма простой формулой

$$E_n = E_i - E_i/n^2,$$

где E_i — энергия ионизации (13,6 эВ), а n — любое положительное целое число.

Если $n=1$, то эта формула дает $E_1=0$, т. е. нуль для энергии основного состояния.

Если $n=2$, то получается

$$E_2=13{,}6 \text{ эВ}-13{,}6 \text{ эВ}/2^2=10{,}2 \text{ эВ},$$

что составляет энергию первого возбужденного состояния. Для других значений n получаются другие наблюдаемые энергетические состояния.

Множество уровней было экспериментально обнаружено в положениях, предсказанных этой формулой. Формула великолепно работает, согласуясь с опытами с точностью до одной десятитысячной или даже еще лучше.

Во всех этих энергетических состояниях электрон и протон связаны между собой. Они не могут удаляться друг от друга до

бесконечности. Однако для более высоких значений энергетические состояния приближаются к энергии ионизации, и, когда n становится бесконечно большим, мы достигаем энергии, при которой электрон как раз может покинуть протон.

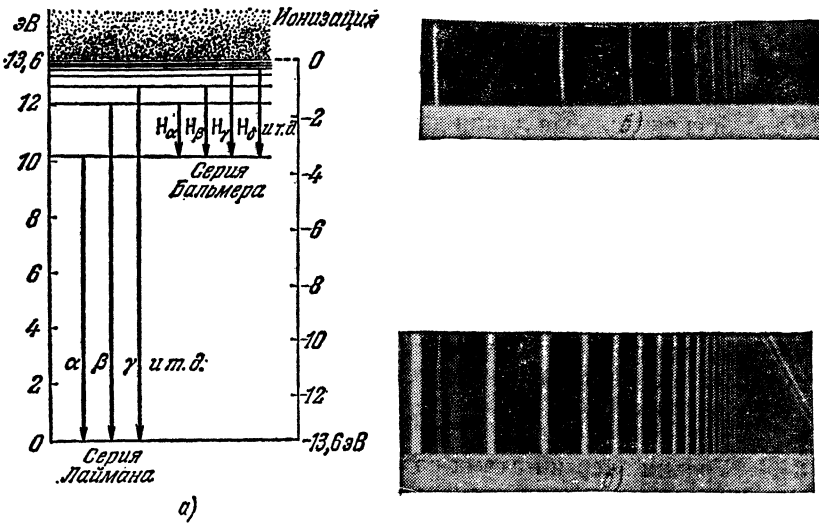


Рис. 34.7. *а*) Схема энергии простейшего атома — атома водорода. Стрелки указывают изменения энергии для двух совокупностей спектральных линий, характерных для водорода. Перескоки, обозначенные H_α, H_β и т. д., образуют так называемую серию Бальмера. Показаны также линии серии Лаймана в ультрафиолетовой области. Эта схема значительно упрощена, так как масштаб не позволяет вычертить «тонкую структуру» спектра. *б*) Фотоснимок первых двенадцати линий серии Бальмера, испускаемых светящимся водородом. *в*) Фотоснимок серии Бальмера от $n=6$ до $n=20$ и выше. Положения линий соответствуют вычисленным значениям с точностью более чем до одной десятитысячной.

При еще более высоких энергиях электрон и протон уже не связаны друг с другом. При таких энергиях, даже если электрон бесконечно удаляется от протона, у него остается избыток кинетической энергии. На схеме уровней энергии обратите внимание на существенное различие между этими последними энергетическими состояниями, в которых электрон свободно уходит с любой энергией, и связанными состояниями (ниже энергии ионизации). Выше энергии ионизации возможны свободные состояния с любыми энергиями, в то время как между отдельными связанными энергетическими состояниями имеются строго определенные интервалы.

В гл. 32 мы видели, что атом сходен с планетной системой. В частности, по модели Резерфорда атом водорода состоит из Солнца — протона с одной планетой — электроном. Кулоновская сила между ними убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между ними — точно так же как сила между Солнцем и планетой, или в системе спутник — Земля сила между Землей и спутником. В разделе 24.5 мы изучили связь и отрыв тел в таких именно системах. Там

мы нашли, что естественно принять за нуль энергию состояния, в котором Солнце и планета, Земля и спутник или протон и электрон находятся на бесконечном расстоянии друг от друга. Эта энергия отмечает границу между связанными и свободными состояниями. Для атома это есть энергия ионизации.

Если поднять нуль шкалы энергетических уровней на 13,6 эВ, то формула для энергетических состояний водорода становится еще проще. Она принимает вид

$$E_n = -13{,}6 \text{ эВ}/n^2.$$

Значение $E_1 = -13{,}6$ эВ теперь прямо показывает, что основное состояние на 13,6 эВ ниже энергии ионизации. Энергия связи атома составляет 13,6 эВ.

Значение

$$E_2 = -13{,}6 \text{ эВ}/2^2 = -3{,}4 \text{ эВ}$$

говорит о том, что первое возбужденное состояние находится только на 3,4 эВ ниже уровня ионизации, и т. д. У правого края рис. 34.7, *а* нанесена шкала энергии, начинающаяся сверху с энергии ионизации. Можно сравнить предыдущий результат с уровнями энергии, измеренными по этой шкале.

Простая формула для энергий состояний была впервые получена на основании таблиц спектральных линий. Спектроскописты Бальмер и Ридберг нашли ее эмпирически, подобрав для спектров изящное математическое выражение, причем то, что сейчас мы называем уровнями энергии, на языке спектроскопистов называлось термами. Затем в 1913 г. Нильс Бор указал на связь между планетарной моделью и формулой $E_n = -13{,}6 \text{ эВ}/n^2$. Ему действительно удалось вывести значение 13,6 эВ, исходя из основных констант: кулоновской постоянной k, постоянной Планка h и массы электрона m. Успех Бора можно считать началом нашей современной теории строения материи *).

---

*) Бор обосновывал свой вывод, обращаясь к общему принципу, который мы теперь называем принципом соответствия Бора. Предположим, что имеется удачная теория, развитая для того, чтобы систематизировать известные факты в некоторой области знаний. По мере расширения знаний теория может встретить затруднения; она может не суметь достигнуть согласия со всеми новыми фактами. Тогда для замены старой теории должна получить развитие новая теория. Но новая теория не может надеяться на успех, если она не согласуется со старой теорией по всем вопросам, где старая теория сама согласовалась с фактами. Иначе говоря, новая теория должна делать те же предсказания в том же виде, как старая теория, в области, где старая теория была удовлетворительной. Таким образом, структура и содержание старой теории могут послужить для существенной проверки новой теории и могут даже дать больше — указать направление, в котором должна развиваться новая теория.

Первое применение принципа соответствия, сделанное Бором, состояло в обосновании его вывода постоянной для уровней энергии водорода. Он вообразил себе атом, возбужденный почти до состояния ионизации, так что электрон движется вокруг протона по огромной орбите размером примерно метр или более, когда

Несмотря на имеющееся сходство, описание атома водорода должно быть иным, чем описание планеты, движущейся вокруг Солнца. Это описание должно учитывать устойчивость основного состояния, существование особых возбужденных состояний и тождественность всех отдельных атомов водорода во всем мире. Атом может находиться некоторое время только на том или ином из его отдельных уровней энергии. Если атом находится на каком-либо уровне энергии выше основного состояния, то он не останется на нем вечно. Рано или поздно он излучит энергию; он будет терять энергию не до тех пор, пока электрон упадет на протон, но только до тех пор, пока он достигнет основного состояния. В следующих разделах мы увидим, как свойства волн де Бройля, которые описывают электрон, движущийся в электростатическом поле протона, позволяют нам вычислить значения энергии внутренних состояний водорода.

34.5. Происхождение уровней энергии

Как можно объяснить существование определенных внутренних уровней энергии и простые численные соотношения, которые наблюдаются в ряде случаев? Мы надеемся сделать это, используя представления последней главы. В ней мы узнали о волнах вещества, интенсивность которых в каком-либо месте указывает вероятность нахождения там частицы. Как же могут эти представления объяснить существование отдельных точно определенных уровней энергии?

Волна вещества для определенного уровня энергии должна оставаться без изменений очень долгое время. Из опытов Франка и Герца и из строения линейчатых спектров элементов известно, что в атомах имеются вполне определенные энергетические состояния. Этого не было бы, если бы длина волны вещества для определенного уровня энергии колебалась, а не оставалась длительное время без изменений. Кроме того, должны существовать различные волны вещества, соответствующие отдельным уровням энергии, потому что эти уровни различны. Поэтому мы должны искать такие волновые картины, каждая из которых отлична от других, но сама остается неизменной. Единственные волны, которые дают сколь угодно долго такую картину и никуда не смещаются, это стоячие волны. Таковы, например, стоячие волны, которые возникают в колеблющихся стру-

---

$n = 10\,000$ или около этого. Подобная орбита имеет размеры радиоантенны или синхротрона, а мы знаем, что в таких случаях излучаемая частота равна частоте движения (вниз и вверх по антенне или вокруг «беговой дорожки»). Поэтому частота фотонов, испускаемых при перескоках в атоме водорода между уровнями вблизи ионизации, должна быть такой же, как частота орбитального движения. Приравнивая частоту фотона частоте орбитального движения, получаем комбинацию величин k, h и m, которая должна появиться в выражении для этих энергетических состояний и для всех других энергетических состояний атома водорода. Таким путем Бор вывел свою формулу, полагаясь на всеобщий принцип соответствия между старой теорией и новой. Однако в разделе 34.6 мы выведем этот же результат из других соображений.

нах или в бассейнах с водой. У них нет возвратно-поступательного движения. Напротив, они остаются на месте и сохраняют свою форму, причем смещения частиц периодически нарастают и падают до нуля, без перемещения горбов и впадин вдоль волн.

Взгляните, например, на второй снимок слева на рис. 34.8. На обоих концах волны и посередине имеются узлы — неподвижные точки. В промежутках между каждой парой узлов имеются области максимального смещения (пучности). Эти области всегда остаются

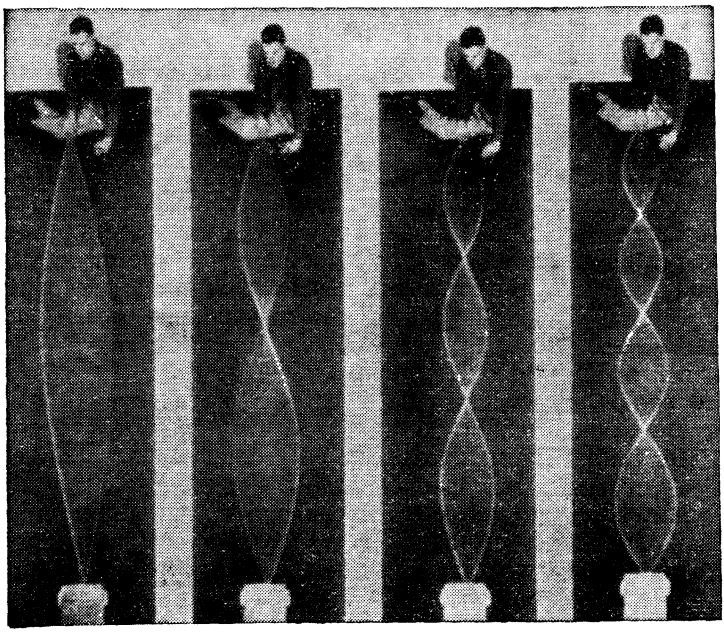


Рис. 34.8. Стоячие волны. Если конец трубки раскачивать из стороны в сторону со все увеличивающейся частотой, то будут образовываться картины со все большим и большим числом петель. Обратите, однако, внимание на то, что только вполне определенные частоты будут создавать устойчивые картины стоячих волн.

на том же месте, если вести отсчеты вдоль волны, но с течением времени смещение изменяется от максимального в одном направлении, проходя через нуль, до максимального в другом направлении. В боковых направлениях смещения везде одинаковы и периодически изменяются по величине, но не видно никаких перемещений вдоль волны.

Попытайтесь сами воспроизвести стоячие волны. Привяжите резиновую трубку к двум прочным опорам и рукой раскачивайте трубку вверх и вниз около одной из опор. Подобрав правильную частоту движения руки, можно образовать картину стоячей волны, в которой трубка колеблется вверх и вниз, но картина не движется

вдоль трубки. Может получиться картина с одной пучностью между конечными опорами или с двумя, тремя, четырьмя пучностями и т. д. (рис. 34.8)*). Остановите теперь руку и наблюдайте за дальнейшим движением трубки. Если исключить потери на трение, то движение продолжается и трубка колеблется, давая ту же неизменную картину. Стоячая волна остается на месте и не изменяется. Такова картина волнового движения, которую мы предполагаем обнаружить и в атоме, когда он находится в устойчивом состоянии.

Заметьте, что такие стоячие волны полностью определяются естественными условиями. При закрепленных концах вдоль резиновой трубки будут устанавливаться только стоячие волны с целым числом пучностей (и соответствующими частотами). Если попытаться раскачивать трубку с какой-либо другой частотой, то вы убедитесь, что движение вашей руки не совпадает в чем-то с движением трубки, не попадает в такт с этим движением и не усиливает его. Таким образом, если не применять правильную частоту, то ваши усилия окажут весьма слабое действие. Вам не удастся образовать стоячую волну, которая смогла бы установиться на трубке. Совокупность различных стоячих волн с целыми числами пучностей представляет собой единственно возможную совокупность неизменных волновых картин.

Хотя стоячие волны колеблются поперечно, мы можем рассматривать их как наложение двух одинаковых цугов бегущих волн, движущихся в противоположных направлениях. Если нарисовать две бегущие волны, перемещать их навстречу друг другу и сложить соответственные смещения, то окажется, что они образуют стоячую волну. Вы также обнаружите, что расстояние между пучностями стоячей волны как раз равно $\lambda/2$, где λ — длина волны одного из цугов волн. Нечто подобное мы проделали в разделе 15.3.

Если вам трудно представить себе, что стоячие волны образуются двумя отдельными одинаковыми цугами волн, распространяющимися в противоположных направлениях навстречу друг другу, то попытайтесь проделать это на опыте с настоящими волнами. Возьмите длинную веревку, и пусть два человека держат ее за концы. Затем пусть каждый из них посылает вдоль веревки цуг, скажем, состоящий из дюжины длин волн. Посмотрите, что произойдет, когда оба эти цуга волн будут проходить один через другой.

С этой точки зрения стоячие волны между двумя опорами очень сходны со стоячими волнами, которые вы раньше видели перед отражающей стенкой в волновой кювете. Там вы можете задавать волну, идущую к стенке, с любой частотой, и отраженные волны, возвращающиеся от стенки, взаимодействуют с волнами, идущими им навстречу, и образуют стоячие волны. Однако для заданного положения генератора волн и стенки нужно выбрать «правильную» частоту: в противном случае окажется, что генератору придется совершать движение с очень большим размахом, чтобы получить замет-

*) Эти снимки не очень удачны: они сделаны в перспективе и поэтому (особенно в крайнем снимке) длина полуволны кажется непостоянной. (*Прим. ред.*)

ное действие. При правильной же частоте весьма слабые колебания генератора дают большой эффект.

Как видно из рис. 34.8, можно создать хорошие стоячие волны и в резиновой трубке, привязав один конец к твердой опоре и слегка колебля другой конец с «правильной» частотой. Тогда отражение от опоры на другом конце даст цуг волн в противоположном направлении, который, взаимодействуя с волнами, движущимися вперед, образует стоячие волны. Когда такая стоячая волна установится, можно представить себе, что в узлах стоячей волны были внезапно поставлены две твердые отражающие стенки. Так как стенки устанавливаются в тех местах, где движение отсутствует, то они ограничивают отрезок стоячей волны. В любом таком отрезке мы, вместо картины бегущей волны, видим картину «стоячих» колебаний.

Таким образом, мы видим, что картину стоячей волны в трубке между твердыми опорами можно создать сложением двух волновых цугов, один из которых движется вперед, а другой возвращается назад после отражения. Для получения стоячих волн необходимо, чтобы расстояние между опорами составляло половину длины волны, или две полуволны, или три и т. д.

Применим теперь понятие стоячих волн к обсуждению атомных моделей.

Нам известно, что существуют волны вещества. Когда они ограничены конечной областью пространства, как это имеет место в атомах, то они должны принимать форму стоячих волн. Мы увидим, как эти стоячие волны вещества объясняют наблюдаемые уровни энергии в атомах. Но для того, чтобы получить общее представление, мы начнем с примера, который проще любого атома. Рассмотрим частицу, движущуюся взад и вперед между отражающими стенками, и отыщем картину стоячих волн, соответствующую этому движению. Когда частица движется с постоянной скоростью между стенками в одном направлении, она имеет постоянное количество движения, так что имеется волна де Бройля определенной длины, связанная с ее движением. Когда она упруго отскакивает от стенки и движется в обратном направлении, то величина импульса остается той же, так что с движением частицы также связана отраженная волна де Бройля той же длины. Мы представляем себе, что обе эти волны вещества сосуществуют в области между стенками. Длина волны определяется величиной количества движения частицы. Если эта длина волны окажется подходящей для данных условий, то два цуга волн создадут стоячую волну между стенками.

Тут-то и сказывается существенным образом волновая природа вещества. Между фиксированными стенками могут существовать только определенные стоячие волны, так что могут иметь место только вполне определенные движения частицы с соответствующими определенными значениями количества движения. Простейшая стоячая волна похожа на первый фотоснимок на рис. 34.8. Там длина волны равна удвоенному расстоянию d между стенками: $\lambda=2d$. Это длина волны, принадлежащая одному из возможных движений частицы.

(Другие виды движения, с несколькими пучностями, дают более короткие длины волн и бóльшие количества движения. Таким образом, волну с одной пучностью дает самое медленное движение частицы.)

Энергию частицы для этого движения можно найти из соотношения

$$E=mv^2/2=(mv)^2/2m=p^2/2m.$$

Применяя соотношение де Бройля $p=h/\lambda$, находим отсюда

$$E=h^2/2m\lambda^2.$$

Так как $\lambda=2d$, получаем окончательно

$$E=h^2/8md^2$$

для кинетической энергии частицы, скачущей взад и вперед в «ящике» длиной d. Это наименьшая энергия, при которой стоячая волна де Бройля может существовать. При более низких энергиях длина волны слишком велика, и никакая волна, связанная с частицей массы m, не может поместиться в ящике. Хотя в ньютоновской механике частица могла бы двигаться и с меньшей энергией, в нашей волновой механике здесь не существует никакого возможного состояния движения с меньшей энергией. Таким образом, эта наименьшая энергия представляет основное состояние.

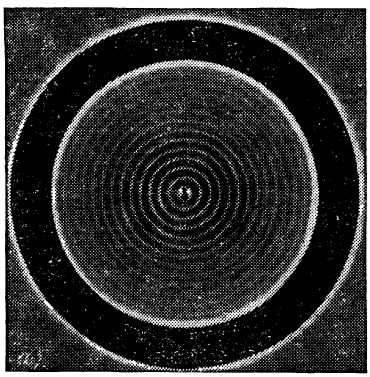
Теперь, снова возвращаясь к атому водорода, мы видим, что мы стоим на многообещающем пути. По таким же точно причинам атом водорода должен иметь основное состояние, хотя ньютоновская механика допускает для него неизмеримо меньшие энергии. Таким образом, вырисовывается перспектива объяснения устойчивости атомов. Кроме того, имеется много волн вещества с более высокими энергиями, которые могут поместиться в ящике. Имеются стоячие волны с двумя, тремя,..., n пучностями и т. д. Эти устойчивые состояния волн с их определенными значениями энергии дают модель возбужденных состояний атома.

34.6. Волновая теория уровней энергии атома водорода

Применим теперь представление о стоячих волнах к водородному атому. Атом не является ящиком с твердыми стенками, от которых отскакивает частица; в нем электрон удерживается кулоновской силой между ядром и электроном. Эта сила заставляет электрон отскакивать взад и вперед или кружиться внутри небольшой области вблизи ядра. Поэтому в теории атома водорода ставится задача о стоячей волне в трех измерениях, о волне в поле переменной кулоновской силы, вмéсто более простой волны в пространстве между твердыми стенками. Эта задача сходна с задачей нахождения картин стоячих волн на поверхности воды в чашке. (Можно получить прекрасные симметричные картины стоячих волн в чашке путем простого покачивания чашки; см. также рис. 34.9.) Математическую теорию волн можно легко применить к подобным волновым картинам, а также к волнам в атоме водорода. Здесь мы прибегнем к некоторым упрощениям,

но постараемся доказать правдоподобность результатов, хотя и не сможем претендовать на строгость рассуждений.

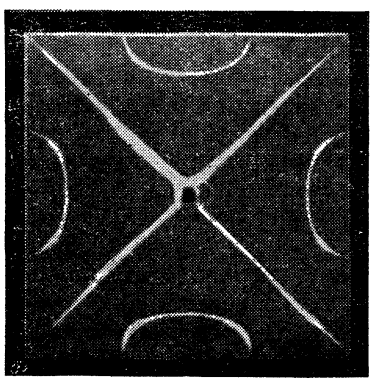
Для начала рассмотрим электрон, движущийся по круговой орбите на расстоянии r от центра атома. Центростремительная сила, необходимая для удержания электрона, движущегося по окружности, должна быть равна электростатическому притяжению kq_1q_2/r^2. Следовательно,



$$mv^2/r=kq_1q_2/r^2, \text{ или } mv^2=kq_1q_2/r.$$

Это уравнение связывает скорость v с радиусом r.

Так как электрон движется на постоянном расстоянии от ядра и, следовательно, с постоянной скоростью, величина его количества движения при движении по орбите остается постоянной. Поэтому для такой орбиты



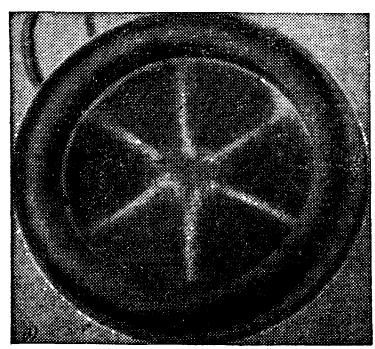


Рис. 34.9. *а*) Выполненный с большой выдержкой снимок стоячих волн на поверхности жидкости, ограниченной кольцевым барьером в волновой кювете. Приводилась в колебание вся кювета, но бегущие волны за пределами барьера не видны на фотографии—изображение их размыто. *б*) Система стоячих волн на металлической пластинке, неподвижно закрепленной в центре. Такие картины (часто называемые фигурами Хладни) образуются мелким песком, рассыпаемым по пластинке, когда она приведена в колебательное движение. Песок собирается на неподвижных узловых линиях. *в*) Узоры из песка, образованные стоячими волнами на мембране телефона.

волна вещества де Бройля имеет вполне определенную длину:

$$\lambda=h/mv.$$

Конечно, волна вещества не может в действительности располагаться вдоль классической орбиты, так как все волны в атоме, по-

добно волнам в чашке, простираются на некоторую область как вдоль орбиты, так и в стороны от нее. Но можно надеяться приблизиться к поведению волны вещества, представляя ее себе как волну в узком круговом канале радиуса r. В таком канале волна может существовать, если окружность «орбиты» содержит целое число длин волн. Тогда бегущие волны, движущиеся в противоположных направлениях и образующие стоячую волну, будут, обойдя всю орбиту, приходить с максимумом в прежний максимум и с минимумом в прежний минимум (рис. 34.10). Если на орбите не укладывается целое число длин волн, то через несколько обходов окажется, что теперь на прежний максимум приходится минимум, так что стоячая волна перестанет быть стоячей и не сможет существовать; в частности, для круговых каналов должно соблюдаться соотношение

$$n\lambda = 2\pi r.$$

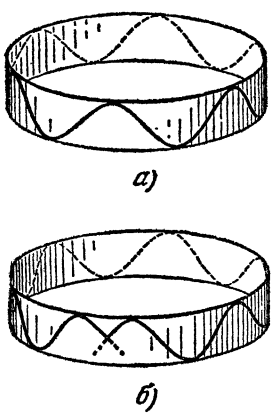


Рис. 34.10. *а*) Схема водяных волн в узком круговом канале, в котором образованы стоячие волны. Волна, движущаяся вокруг канала, возвращается к своей исходной точке так, что гребень совпадает с гребнем, а впадина со впадиной. Это происходит тогда, когда длина канала равна целому числу длин волн. *б*) Длина канала не равна целому числу длин волн. В этом случае, когда волна приходит обратно в свою исходную точку, гребни (или впадины) не точно накладываются на другие гребни (или впадины). Волны стремятся погасить друг друга, и устойчивой картины не получается.

Длина волны де Бройля определяется количеством движения: $\lambda = h/mv$, и это условие дает нам второе соотношение между радиусом r орбиты и скоростью электрона:

$$nh/mv = 2\pi r.$$

Из этих двух условий — одного для стоячих волн в канале и другого, которое показывает нам, как каналы укладываются в «ящик», образованный кулоновской силой,— можно найти скорости и соответствующие радиусы, для которых могут существовать стоячие волны. Алгебраические преобразования, с помощью которых вычисляются скорости и радиусы, приведены ниже в тексте, набранном мелким шрифтом. Узнав скорость и радиус, мы можем вычислить как кинетическую энергию $mv^2/2$, так и электрическую потенциальную энергию — kq_1q_2/r. Это дает нам энергии состояний стоячих волн. Результат следующий:

$$E = -m(2\pi k q_1 q_2/nh)^2/2.$$

Теперь для сравнения этих энергий для стоячих волн с действительными энергиями состояний водорода мы должны подставить значения постоянной Планка, постоянной в законе Кулона и массы электрона:

$$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}\ \text{Дж} \cdot \text{с},$$

$$k = 2{,}3 \cdot 10^{-28}\ \text{Н} \cdot \text{м}^2/(\text{элем. зар.})^2,$$

$$m = 0{,}911 \cdot 10^{-30}\ \text{кг}.$$

Припоминая, что заряды электрона и протона равны элементарной единице заряда, получаем

$$E = -\frac{(0{,}911\cdot 10^{-30})\cdot[2\pi\cdot(2{,}3\cdot 10^{-28})\cdot 1\cdot 1]^2}{2\cdot(6{,}62\cdot 10^{-34})^2}\cdot\frac{1}{n^2} = 2{,}17\cdot 10^{-18}/n^2 \text{ Дж},$$

где $n=1, 2, 3, \ldots$ Так как 1 Дж$=6{,}25\cdot 10^{28}$ эВ, то это дает для энергий состояний стоячей волны в водороде

$$E_n = 13{,}6/n^2 \text{ эВ}.$$

Этот результат в точности совпадает с выражением для уровней энергии атома водорода, которое мы получили в разделе 34.4. Там это выражение получилось из экспериментальных работ спектроскопистов. Оно выражает энергетические состояния водорода, которые приводят к наблюдаемым спектральным линиям испускаемого и поглощаемого света. Оно также согласуется с измеренной энергией, необходимой для ионизации атома водорода; 13,6 эВ — это как раз энергия, необходимая для того, чтобы вывести атом водорода из его

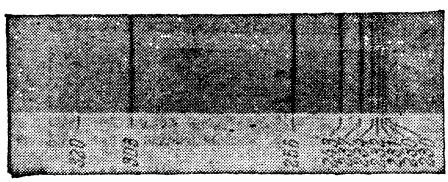


Рис. 34.11. Спектр однократно ионизованного гелия с длинами волн, указанными в ангстремах. Эти линии соответствуют водородной серии Лаймана (см. рис. 34.7), измененной благодаря тому, что заряд ядра равен двум единицам. Обратите внимание на то, что они лежат в чрезвычайно коротковолновой ультрафиолетовой области.

основного состояния — состояния стоячей волны с наиболее низкой энергией, где $n=1$, — и перевести его в состояние нулевой энергии, за которое мы принимаем состояние, в точности соответствующее ионизации атома водорода. Результат для стоячей волны, таким образом, полностью совпадает с экспериментальными данными.

Наш теоретический результат можно проверить несколькими способами. В соответствии с нашим анализом состояний стоячих волн энергии должны быть пропорциональны квадрату числа элементарных зарядов ядра. Поэтому любая атомная система с центральным ядром и только одним электроном должна дать спектр, похожий на спектр водорода, в котором, однако, все энергии увеличены пропорционально квадрату заряда ядра. Например, атом гелия может потерять один из своих двух электронов. Тогда ион гелия состоит из одного электрона, движущегося вокруг ядра с двумя положительными элементарными зарядами. Такой ион гелия получается, когда атом гелия возбужден до энергии, превышающей его энергию ионизации. Его спектр наблюдался в атмосфере синих горячих звезд и в лаборатории, когда сквозь гелий посылались интенсивные искры. На рис. 34.11 представлено несколько его спектральных линий. Они в точности

выражаются нашей формулой для уровней энергии водорода с множителем 4 при квадрате заряда ядра. Наблюденный спектр дважды ионизованного лития также находится в согласии с формулой волновой механики, но там заряд ядра имеет 3, а не 2 элементарных заряда. Следовательно, все энергии в 9 раз больше, чем у водорода.

В действительности сам водород встречается в трех различных формах. Кроме нормального водорода имеются два редких тяжелых изотопа. Спектры этих изотопов выглядят почти так же, как спектр обыкновенного водорода, но имеются незначительные различия. Для того чтобы понять их, нужно более пристально рассмотреть наше вычисление уровней энергии водорода. При нахождении энергетических состояний мы предполагали, что тяжелое ядро оставалось неподвижным. Но это справедливо только приближенно. Две взаимно

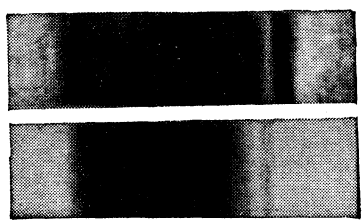


Рис. 34.12. Фотоснимки, показывающие детали двух разных спектральных линий водорода. Видны слабые спектральные линии дейтерия (с длиной волны, которая короче на 1 или 2 Å) справа от линий обыкновенного водорода, снятых с очень большой выдержкой. Этот опыт впервые показал, что существует тяжелый изотоп водорода. Линии дейтерия слабы, потому что концентрация атомов дейтерия составляет только около 1 : 6500. Для этих фотоснимков концентрация была несколько увеличена испарением жидкого водорода. Пользуясь современными методами, можно разделять изотопы и получать сравнительно чистый дейтерий, это позволяет точнее определить длину волны его линий.

притягивающиеся массы, ядро и электрон, вращаются вокруг своего общего центра масс, подобно Земле и Солнцу. Этот центр массы почти совпадает с ядром, потому что последнее во много раз тяжелее своего партнера. Но имеющееся малое расстояние между центром масс и ядром приводит к тому, что уровни энергии зависят, хотя и очень мало, от массы ядра. Величина этого эффекта была вычислена Бором в его первой статье, в которой он применил метод, совершенно отличный от рассмотренного нами. Для ядра массы M (вместо бесконечной массы) каждую энергию нужно умножать на множитель $1/(1+m/M)$. Так как протон примерно в 2000 раз тяжелее электрона, то это значит, что каждая частота в спектре обыкновенного водорода должна быть на 1/2000 меньше вычисленной нами ранее. (Действительно, после внесения этой поправки вычисленные и экспериментальные результаты различаются менее чем на 1/10 000). Для других изотопов водорода вычисления дают теперь несколько иные результаты.

Например, масса ядра дейтерия (дейтрона) почти вдвое больше массы протона. Следовательно, частоты дейтерия ниже частот для

атома с бесконечно тяжелым ядром только на 1/4000. Таким образом, частоты в спектре дейтерия должны быть несколько больше, чем у обыкновенного водорода. Спектроскопия является настолько тонким методом исследования, что такое малое различие может быть обнаружено. Действительно, оно сыграло решающую роль в открытии дейтерия (рис. 34.12).

Вычисление энергий стоячих волн. Два условия связывают скорость с радиусом орбиты, по которой заряженная частица движется вокруг ядра. Вследствие того, что кулоновская сила должна составлять достаточную отклоняющую силу для удержания частицы на орбите, имеем

$$mv^2/r=kq_1q_2/r^2, \quad \text{или} \quad mv^2=kq_1q_2/r. \tag{1}$$

Для волн вещества, которые могут создать стоячую картину,

$$n\lambda=2\pi r \quad \text{и} \quad \lambda=h/mv;$$

следовательно,

$$nh/mv=2\pi r. \tag{2}$$

Перемножив в уравнениях (1) и (2) соответственно левые и правые стороны, получаем

$$(mv^2)\,(nh/mv)=(kq_1q_2/r)\,(2\pi r),$$

$$nhv=2\pi kq_1q_2.$$

Это дает нам возможные скорости частицы:

$$v=2\pi kq_1q_2/nh, \qquad \text{где } n=1,2,3,... \tag{3}$$

Подставив (3) в (2), получаем соответствующие радиусы орбит:

$$r=nh/2\pi mv=n^2h^2/[(2\pi)^2mkq_1q_2], \qquad \text{где } n=1,\ 2,\ 3,\ ... \tag{4}$$

Полная внутренняя энергия равна

$$E=mv^2/2+(-kq_1q_2/r).$$

Подставляя возможные значения v из (3) и соответствующие значения r из (4), получаем для полной внутренней энергии

$$E=m\,(2\pi kq_1q_2/nh)^2/2. \tag{5}$$

Наконец, если подставить числовые значения постоянных

$$k=2{,}3\cdot 10^{-27}\ \text{Н}\cdot\text{м}^2/(\text{элем.зар.})^2,$$
$$h=6{,}62\cdot 10^{-34}\ \text{Дж}\cdot\text{с},$$
$$m=0{,}911\cdot 10^{-30}\ \text{кг}$$

в (3), (4) и (5), мы получим

$$v=2{,}18\cdot 10^6\ q_1q_2/n\ \text{м/с};$$
$$r=0{,}53\cdot 10^{-10}\ n^2/q_1q_2\ \text{м};$$
$$E=-2{,}17\cdot 10^{-18}\ (q_1q_2)^2/n^2\ \text{Дж}.$$

Обратите внимание на то, что величины элементарных электрических зарядов были включены в постоянные. Таким образом, q_1 и q_2— отвлеченные числа, выражающие числа элементарных зарядов ядра и движущегося вокруг него электрона. Квантовое число n, соответствующее данному состоянию, является мерой сложности картины стоячей волны.

34.7. Заключение

Рассказ, который мы вели, в некотором отношении теперь закончен. Волны, с которыми мы впервые встретились в части II, оказались связанными с энергией и количеством движения, появившимися в части III. Однако эта связь была раскрыта только в части IV, где зондирование атома потребовало от нас замены ньютоновской механики более тонкой квантовой механикой. Для понимания мира атома и фотона существенны как волновые, так и корпускулярные свойства материи.

В последнем разделе мы нашли энергетические состояния водорода, применяя одну из моделей стоячей волны, которая дает некоторые из возможных волновых картин. Имеются также другие картины стоячих волн, которые не соответствуют круговым каналам, но полная волновая теория показывает, что другие подобные картины дают те же самые энергетические уровни, которые мы вычислили. Наш успех в этом отношении весьма важен как в отношении количественного согласия нашего теоретического вычисления константы 13,6 эВ с ее наблюденным значением, так в еще большей степени потому, что общая картина состояний стоячих волн дает нам уверенность в том, что волны вещества существенны для описания всех атомов. Но мы еще не дошли до конца, успешно описав водород с помощью объединенной картины волн и частиц. Напротив, в действительности мы находимся в самой начальной стадии понимания ядер, атомов, молекул и вообще строения вещества. Во всех этих физических системах встречаются энергетические уровни со значительными расстояниями между ними, и все они могут быть объяснены с точки зрения картин стоячих волн. При рассмотрении таких систем возникают вопросы, на которые никогда нельзя было бы правильно ответить в рамках ньютоновской динамики. Другие вопросы даже нельзя сформулировать без глубокого понимания основ волновой механики.

Но это еще не все. Волновое поведение отличается от поведения частиц, предсказываемого ньютоновской механикой, не только тем, что оно приводит к определенным раздельным энергетическим состояниям (и к основному состоянию с нижним пределом энергии), но также и в других неожиданных отношениях. Одним из примеров может служить то обстоятельство, что рассмотрение связанных с частицами волн вещества объяснило одну из непонятных деталей в поведении частиц. Волновые картины часто распространяются на области, в которые, согласно ньютоновской механике, частицы никогда не могли бы проникнуть. Для света, например, ньютоновские представления о частицах заставляют ожидать на поверхности между воздухом и стеклом либо отражения, либо прохождения в стекле, но не того и другого одновременно. Волны, однако, расщепляются: они частично отражаются и частично проходят дальше, и фотоны можно найти с одинаковой вероятностью как в отраженном, так и в прошедшем свете. С другой стороны, волны вещества могут испытывать частичное отражение и частичное прохождение там, где согласно ньютоновской механике будет иметь место только то или дру-

гое. Точно таким же образом волны вещества привели к пониманию радиоактивного распада как прохождения частиц через область, через которую в ньютоновской механике ни одна частица не могла бы проникнуть. Представление о волнах вещества объясняет также некоторые химические реакции.

Таким образом, мы подошли к порогу многих новых открытий. В годы после 1925 г. (когда были сформулированы принципы волновой механики) эта новая механика объяснила многие явления физики, остававшиеся ранее таинственными. В этих новых областях многое еще нужно изучить, кое-что уже хорошо объяснено, и значительная часть этого материала явилась предметом настоящего курса. Но этот курс представляет собой только введение. На изучение физического мира можно затратить целую жизнь.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

1*. Электрон с кинетической энергией 4,2 эВ сталкивается с атомом ртути. Чему будет равна кинетическая энергия этого электрона после столкновения? (Раздел 34.1.)

2. Предположим, что вы собираетесь бомбардировать пар из атомов цезия электронами с энергией 4 эВ. Воспользуйтесь рис. 34.2 для того, чтобы предсказать некоторые явления, которые, как вы можете ожидать, произойдут при этом.

3. Если вы нагреете газообразный гелий до достаточно высокой температуры, то средняя кинетическая энергия атомов, участвующих в тепловом движении, будет настолько велика, что неупругое столкновение между двумя атомами гелия легко сможет перевести один из них в его первое возбужденное состояние, отличающееся на 19,8 эВ от основного состояния. Определите эту температуру, использовав все необходимые вам данные из части III.

4. Рис. 34.13 представляет собой схему электровакуумного прибора, в котором испускаемые с поверхности S электроны могут ускоряться разностями потенциалов V_1 или V_2. Положим, что в приборе (трубке) содержится немного паров ртути для выполнения опыта Франка и Герца.

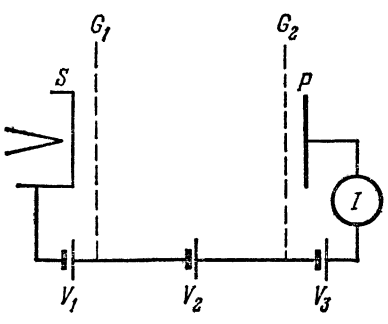


Рис. 34.13. К задаче 4.

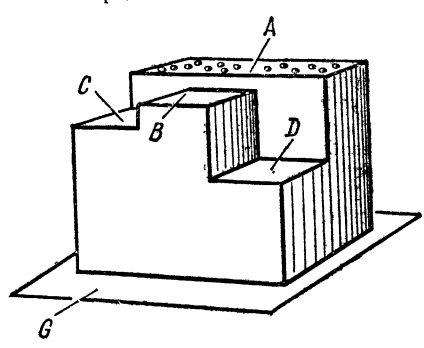


Рис. 34.14. К задаче 7.

а) Если $V_1=0$, $V_2=5$ В и поле между G_1 и G_2 однородно, то в какой области пространства между G_1 и G_2 электроны смогут отдавать 4,9 эВ при неупругих соударениях?

б) Если $V_1=0$ и $V_2=10$ В, то в какой области пространства между G_1 и G_2 электроны смогут отдавать 4,9 эВ и в какой 6,7 эВ при неупругих соударениях?

в) Если $V_1=10$ В и $V_2=0$, то какие пути должны пройти электроны через газ прежде, чем они смогут потерять 4,9 и 6,7 эВ при неупругих соударениях? Какие энергии электронов можно будет находить справа от G_2?

г) Передача энергии в 6,7 эВ может наблюдаться, когда прибор работает как в случае в), и не может, когда он работает как в случае б). Объясните, почему это так, основываясь на ответах пп. б) и в).

5*. Пары ртути бомбардируются электронами с кинетической энергией 6,67 эВ. Каковы возможные значения энергии излучаемых фотонов? (Раздел 34.2.)

6*. Атом некоторого элемента излучает фотон с длиной волны 6838 Å. Какую энергию он при этом теряет? (Раздел 34.2.)

7. На рис. 34.14 изображена механическая модель энергетических уровней в виде четырех площадок на разных расстояниях от основания. На площадке A расположено некоторое число одинаковых шариков из мастики. Когда они сталкиваются с площадки A и попадают на какую-нибудь нижележащую площадку, их температура повышается пропорционально потере кинетической энергии. Шарики, попавшие на площадки B, C и D, вновь сталкиваются, пока все не упадут на основание G. Сколько разных скачков температуры здесь возможно? Изобразите энергетические уровни и возможные перескоки.

8. При введении обыкновенной поваренной соли или стеклянной палочки в пламя газовой горелки последнее приобретает характерную желтую окраску от излучения атомов натрия, имеющего длину волны 5890 Å. Это излучение сопровождает обратные переходы электронов с первого возбужденного уровня в основное состояние.

а) Каков этот уровень в эВ, считая от основного состояния?

б) Какова была бы температура газа, молекулы которого обладали бы такой же средней кинетической энергией?

в) Средняя температура молекул в пламени газовой горелки составляет около 2100 °К. Почему в этом пламени атомы натрия могут возбуждаться до первого возбужденного энергетического уровня?

9*. Сравните энергию, поглощаемую при бомбардировке ртутных паров электронами на 6 эВ, с энергией, поглощаемой при бомбардировке фотонами той же энергии. (Раздел 34.3.)

10*. Если принять за нуль энергетической шкалы энергию ионизованного атома ртути, какова будет энергия основного состояния атома ртути? (Раздел 34.4.)

11*. Который из семи перескоков, обозначенных стрелками на схеме уровней энергии на рис. 34.7, *а*, соответствует спектральной линии наименьшей длины волны? (Раздел 34.4.)

12*. Вычислить E_{10} для водорода, если нуль шкалы энергий соответствует:

а) основному уровню,

б) уровню ионизации. (Раздел 34.4.)

13*. а) Электронами какой энергии следует бомбардировать атомы водорода, чтобы возбудить их до первого возбужденного состояния, показанного на рис. 34.7? (Это состояние на 10.2 эВ выше основного состояния.)

б) Если вы посылаете электроны с кинетической энергией 12,1 эВ (как раз достаточной для достижения второго возбужденного состояния), то какие энергии они могут терять в неупругих столкновениях с атомами водорода? (Раздел 34.4.)

14. На рис. 34.7, *б* и *в* линии справа приближаются к пределу. Какова длина волны для этого предела?

15. Видимый спектр простирается от 4000 до 7500 Å. Все ли линии серии Бальмера в спектре водорода видимы?

16. а) Электроны какой энергии использовали бы вы в опыте Франка и Герца с целью «увидеть» лаймановскую линию α? (См. рис. 34.7.)

б) Для того чтобы увидеть линию H_α?

в) Какую другую спектральную линию вы ожидали бы «увидеть», если вы можете видеть линию H_α?

17. а) Свет какой длины волны необходим для возбуждения молекул водорода (H_2) из их основного состояния, чтобы они испустили линию α (рис. 34.7)?

б) Какова наибольшая длина волны, которая может быть поглощена атомами водорода при переходе из основного состояния? (См. рис. 34.7.)

в) Сравните свой ответ с длиной волны линии α (для выражения их отношения потребуется только одна значащая цифра).

18*. Если «ящик», рассмотренный в разделе 34.5, имеет длину d, ограничена ли частица в этом ящике только одним возможным значением энергии? (Раздел 34.5.)

19*. Каков порядок величины кинетической энергии электрона (масса 10^{-30} кг), колеблющегося в «ящике» длиной в 1 Å? (Раздел 34.5.)

20. а) Вычислите кинетическую энергию нейтрона в ядре радиусом $R=6\cdot10^{-15}$ м. (Это большое ядро.) Достаточно предположить, что ядро представляет собой ящик длиной R.

б) Если ядро меньше, то будет ли кинетическая энергия меньше?

21. Допустим, что электрон заключен в кубическом кристаллике с длиной ребра около 10^{-6} м. Будут ли заметны квантовые эффекты, если удастся наблюдать изменения энергии электрона? (Вычислить низшее возможное значение энергии, рассматривая электрон как стоячую волну в кристалле.)

22. Предположим, что частица между фиксированными стенками (раздел 34.5) заряжена и, следовательно, может излучать; какова частота ее излучения при переходе из первого возбужденного состояния в основное состояние? Выразите ваш ответ через h, m и d.

23*. Одинаковы ли длины волн электрона в атоме водорода в основном и во втором возбужденном состояниях? (Раздел 34.6.)

24. б) Вычислите две первые длины волны, которые вы ожидаете для лаймановской серии водорода.

б) Сравните эти результаты со спектром однократно ионизованного гелия (рис. 34.11). Объясните, почему ваше сравнение указывает на то, что рис. 34.11 изображает серию Лаймана для ионизованного гелия.

IV.1. Наэлектризованные тела

Многие из качественных сведений о поведении электрических зарядов были открыты в XVIII столетии. Для создания электрических зарядов использовали обычные материалы наподобие стекла, натирая их различными видами тканей. Мы также можем проследить поведение электрических зарядов, натирая слегка заряженную полоску из пластмассы куском шерсти или хлопчатобумажной ткани.

Подвесим полоску из ацетилцеллюлозы и полоску из винилита с помощью коротких отрезков изоляционной ленты к лапке штатива так, чтобы они могли легко качаться без закручивания. Быстро натрем полоску из винилита куском сухой шерсти, а полоску из ацетилцеллюлозы — куском сухой хлопчатобумажной ткани. Старайтесь не касаться натертых полосок. Натрем другую полоску из винилита шерстью и поднесем ее к каждой из подвешенных полосок. Какой вывод следует из этого опыта?

Теперь натрем полоску ацетилцеллюлозы куском хлопчатобумажной ткани и поднесем ее к каждой из подвешенных полосок. Какие выводы следуют из этого опыта?

Перезарядим подвешенную полоску из винилита, натирая ее куском шерстяной ткани. Расправим кусок шерстяной ткани и, поддерживая его за концы, поднесем к полоске винилита. Что следует из этого опыта?

Сколько видов зарядов вы обнаружили: один, два или три? Дайте название каждому виду заряда и пользуйтесь ими в дальнейшем.

Натрем расческу, линейку из пластмассы или другое легко заряжающееся тело об одежду и проследим влияние каждого из этих тел на подвешенные полоски. Какие заряды имеют эти тела?

Какое общее заключение об электризации тел можно сделать по результатам наблюдений в проведенных опытах?

Что происходит, когда заряженная полоска подносится близко к крошечному листку незаряженной бумаги или куску нити?

IV.2. Электростатическая индукция

Из повседневного опыта известно, что электрические заряды встречают большое сопротивление при движении в таких веществах, как стекло, пластмасса, керамика. Эти вещества называются изоляторами. Другие материалы, в первую очередь металлы, легко проводят электрические заряды и называются проводниками. В этом опыте исследуются результаты свободного движения зарядов в проводнике.

Расположим два металлических стержня, лежащих на химических стаканчиках, так, чтобы их торцы касались друг друга, и поднесем заряженный кусок пластмассы к концу одного из стержней (рис. IV.1). (Не следует подносить пластмассу так близко к стержню, чтобы между ними проскочила искра.) Не отнимая пластмассу, раздвинем стержни, отодвигая один из стаканчиков и не касаясь стержня. Отнимем пластмассу и разрядим ее на кусок фольги, подвешенной на штативе с помощью нити. Поднесем один и затем другой стержень близко к фольге. Как объяснить полученные результаты?

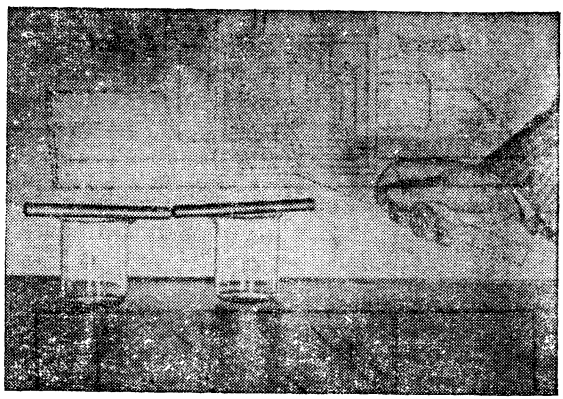


Рис. IV.1.

Соединим стержни и затем снова поднесем их к куску фольги. Как при этом ведет себя заряженная фольга?

Поднесем заряженную пластмассу к концу одного из стержней и быстро коснемся пальцем другого его конца. Удалим пластмассу и проверим наличие зарядов на стержне с помощью заряженной фольги. Совпадают или противоположны заряды стержня и пластмассы?

Металлическая фольга, используемая в этом опыте, указывает на присутствие зарядов и определяет их знак, но не подходит для количественных измерений. Электроскоп является прибором, который позволяет измерить величину заряда точнее, чем кусок фольги. Повторим последнюю часть опыта, используя электроскоп вместо стержней и фольги.

IV.3. Сила взаимодействия между двумя заряженными шариками

Сила взаимодействия между электрически заряженными телами зависит от расстояния между ними и от величины их зарядов. Характер этой зависимости можно определить несколькими путями. Одним из простых методов, который будет использоваться в этом опыте, является измерение силы, действующей на заряженное тело, путем

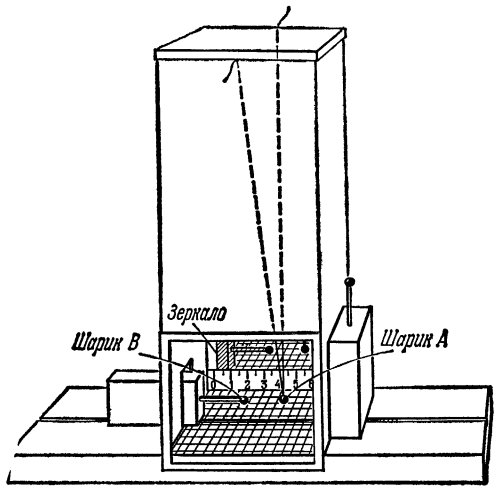


Рис. IV.2.

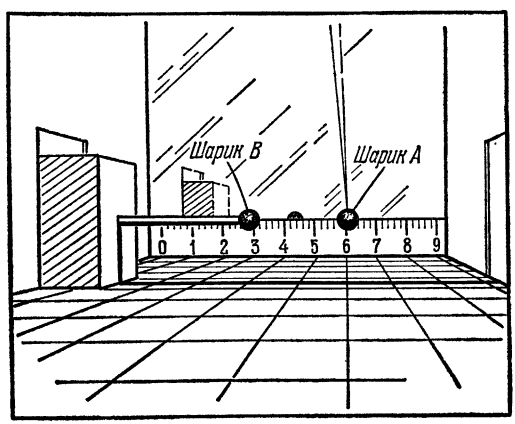


Рис. IV.3.

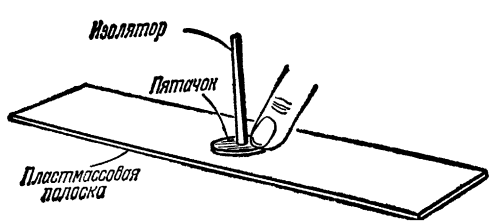


Рис. IV.4.

уравновешивания ее другой, известной силой, например силой тяжести. Можно подвесить небольшой заряженный шарик на изолирующей нити и поднести к нему другой заряженный шарик. Определяя отклонение подвешенного шарика от вертикали, можно измерять действующие на него электрические силы в единицах веса.

На рис. IV.2 изображен легкий проводящий шарик A, подвешенный в нижнем углу V-образного бифилярного подвеса из очень тонкой нейлоновой нити. Шарик способен качаться только в одной вертикальной плоскости. На шкале отсчитывается положение одного из краев (всегда одного и того же) подвешенного шарика. Отсчет нужно делать так, чтобы зеркальное изображение шарика закрывалось самим шариком. Это обеспечивает перпендикулярность луча зрения к шкале в момент отсчета (рис. IV.3). (Луч зрения перпендикулярен к шкале в точке расположения шара A, зеркальное изображение которого заслонено. Чтобы найти положение шарика B на шкале, нужно слегка сдвинуть голову влево, пока зеркальное изображение шарика B не заслонится самим шариком.) Шарик заряжается соприкосновением с предварительно заряженным пятачком с изолирующей рукояткой (рис. IV.4). Ацетатная или поливиниловая полоска натирается бумагой и кладется на стол. Пятачок кладется плашмя на полоску, рукояткой вверх. Если на мгновение прикоснуться к верхней поверхности пятачка пальцем и потом поднять его за рукоятку, он окажется заряженным. Заряд можно затем передать шарикам прикосновением. Затем к заряженному шарику A приближается одноименно заряженный шарик B, укрепленный на изолирующем держателе. Производятся последовательные отсчеты положений обоих шариков по мере приближения B к A. Необходимо помнить, что отсчеты нужно каждый раз делать по одному и тому же краю шарика. Часть зарядов может медленно стекать по поверхности нити или изолирующего держателя, что может привести к ошибкам в измерениях. Каким образом можно проверить наличие утечки? Когда следует делать эту проверку: во время измерений или после них?

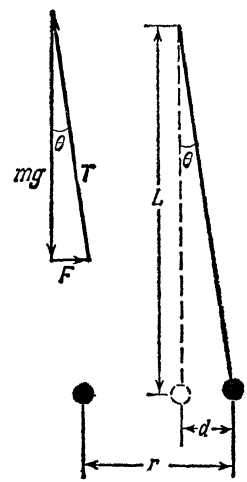


Рис. IV.5.

Когда подвешенный шарик находится в покое, действующая на него результирующая сила равна нулю. Иначе говоря, векторная сумма натяжения нити $\boldsymbol{T}$ и веса шарика $\boldsymbol{mg}$ равнопротивоположна электрической силе $\boldsymbol{F}$. Из рис. IV.5 видно, что при малых углах отношение F/mg абсолютных величин электрической силы и веса равно отношению d/L горизонтального смещения подвешенного шарика к длине подвеса. Отсюда

$$F=(mg/L)d=\text{const}\cdot d.$$

Поскольку выбор единицы силы здесь не имеет значения, можно выражать значения силы через значения d. Можно, следовательно, изучать зависимость F от r по графику зависимости d от r.

Таким образом и строится график зависимости силы от расстояния между шариками. Как относится сила при расстоянии r к силам при расстояниях $^1/_2\ r$ и $^2/_3 r$? На какую зависимость это указывает? Постройте график для проверки этой зависимости.

IV.4. Сложение электрических сил

Предположим, что к двум заряженным шарикам A и B подносится третий заряженный шарик C. Как связана сила суммарного действия A и B, приложенная к шарику C, с силами раздельного действия A и B на C?

Если подвесить шарик C с помощью одной нити, то можно измерить как величину, так и направление действующей на него силы,

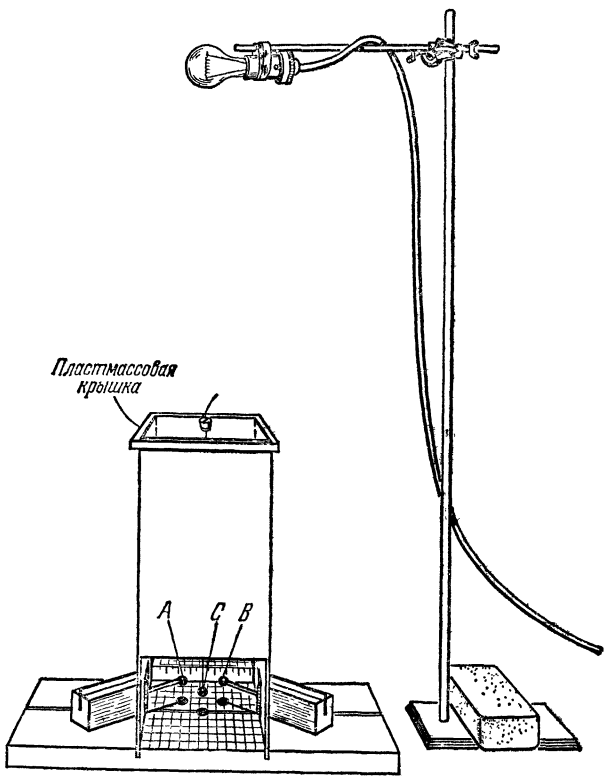


Рис. IV.6.

измеряя направление и величину отклонения шарика C. Освещая шарик сверху (рис. IV.6), можно найти отклонение подвешенного шарика и положения двух других шариков по их теням на миллиметро-

вой бумаге, прикрепленной к столу Затем мы можем узнать, как складываются электрические силы.

Отметим положения центра тени подвешенного шарика в его вертикальном положении.

Зарядим одинаково все три шарика. Отклоняем шарик C с помощью шарика B на несколько сантиметров; при этом шарик A должен быть удален на достаточно большое расстояние. На какое расстояние следует удалить один шарик при измерении действия другого? Сделаем отсчет координат теней шариков B и C. (Почему не следует отмечать карандашом положение тени подвешенного шарика C непосредственно на бумаге?) Теперь удалим шарик B и отклоним шарик C с помощью шарика A, отметив новое положение теней на бумаге. Затем, используя сразу два шарика, A и B, отклоним шарик C на несколько сантиметров. Прежде чем анализировать результаты, необходимо оценить утечку зарядов. Если утечка значительна, повторим опыт по возможности быстрее для уменьшения этих потерь.

Используя обратную пропорциональность квадратам расстояний, можно подсчитать для любого расстояния силу, с которой каждый из шариков, A или B, действует на C. На основании результатов измерений рассчитаем силу совместного действия шариков A и B на шарик C. Как складываются эти силы?

Если есть время, повторите опыт для различных положений шариков A и B.

IV.5. Движущая сила и конечная скорость

Чтобы ответить на вопрос «существует ли минимальный, неделимый электрический заряд», требуется возможность оперировать с весьма малыми зарядами и измерять их. О присутствии зарядов на телах можно судить по электрическим силам, действующим на эти тела. Таким образом, для обнаружения очень малых зарядов необходима возможность оперировать с весьма малыми силами. Вес и другие силы, обычно действующие на тела обыкновенных размеров, настолько велики, что электрические силы могут проявляться лишь при больших зарядах; необходимы, следовательно, крайне малые тела. Полезными объектами для этой цели могут служить маленькие пластмассовые шарики, применяемые при градуировке электронных микроскопов. Несколько таких шариков показано на рис. IV.7. Эти шарики редко бывают незаряженными; большинство имеет небольшие электрические заряды. Попытаемся измерить эти заряды, определяя величину действующих на них электрических сил.

Прибор показан на рис. IV.8. (Баночка содержит водную суспензию шариков. При сдавливании груши, тонкая струя воды со множеством шариков вдувается в пространство между пластинами. Вода быстро испаряется, оставляя облако шариков, наблюдаемых в микроскоп в виде ярких точек). Единственной ответственной регулировкой является подбор положения осветителя с тем, чтобы изображение нити накала лампочки получалось точно в центре пластин. Для нахождения этого положения можно держать лист бумаги вертикально

над серединой пластин, наклоняя осветитель так, чтобы он светил на лист бумаги, и двигая осветитель взад и вперед до тех пор, пока не получится яркого изображения нити накала на бумаге. Эта нить должна располагаться вертикально.

Провода от пластин вставляются в соединительные гнезда. (Напряжение в сети в опасной степени высоко; не следует включать питание, пока не произведены все соединения!) Заряд пластин регулируется

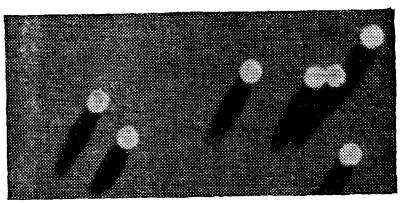


Рис. IV.7.

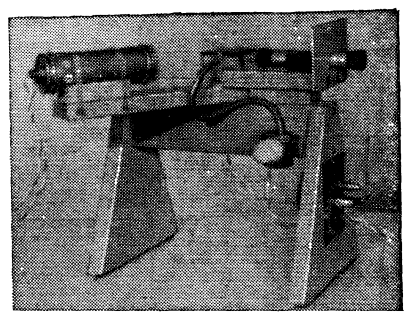


Рис. IV.8.

переключателем. При его среднем положении они не заряжены; при его верхнем положении одна из пластин положительна, другая отрицательна, а при нижнем положении полярность меняется на обратную.

При включенном осветителе и среднем положении переключателя выжмем грушей облако шариков. Что с ними будет затем происходить? (Не следует забывать, что в микроскоп все наблюдается в перевернутом виде.) Все ли шарики движутся в одном направлении? Выберем один шарик и измерим его скорость в двух областях поля зрения. Какие силы на него действуют?

Как влияет заряжение пластин на движение шариков? Что происходит при переключении поля на обратное? Вновь измерим скорость какого-нибудь шарика в двух участках поля зрения, чтобы выяснить, ускоряется ли он под действием электрической силы. Объяснением наблюдаемого равномерного движения служит то, что по мере ускорения шарика быстро растет сопротивление воздуха и шарик вскоре приобретает постоянную конечную скорость, когда сопротивление воздуха становится равнопротивоположным движущей силе (которую может составлять только вес или вес плюс электрическая сила). В данном опыте мы стремимся установить зависимость между конечной скоростью и силой, движущей шарик.

Нужно произвести по три измерения с каждым из примерно дюжины шариков. Серия измерений для одного шарика состоит из измерений: скорости при движении под действием только веса, без заряда на пластинах; скорости v^+ при одинаковом направлении силы тяжести и электрической силы, когда абсолютные значения сил скла-

дываются (F_g+F_e); скорости v^- при противоположных направлениях гравитационной и электрической сил ($F_g—F_e$). Направление сил иллюстрируется рис. IV.9.

Таким образом, для каждого шарика будем иметь три скорости: когда движущая сила образуется только весом; когда электрическая сила прибавляется (v^+); когда она вычитается (v^-).

Скорости определяются путем отсчетов времени при движении, скажем, в десяти участках поля. Не следует измерять скорость

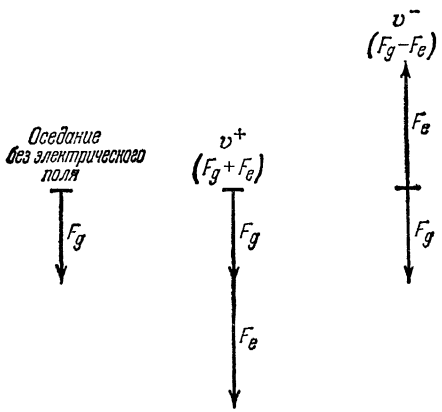


Рис. IV.9.

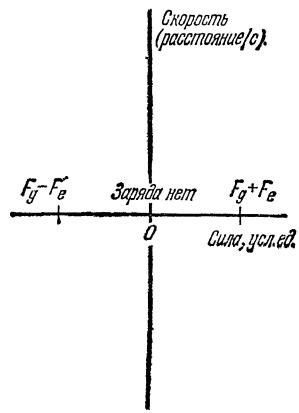


Рис. IV.10.

обломков или сгустков шариков; надо выбирать шарики, медленно движущиеся без электрического поля.

Для какого-нибудь одного шарика построим график в координатах, показанных на рис. IV.10. Какова скорость v^+ (при F_g+F_e) по сравнению со скоростью в отсутствие электрического поля? Какова форма кривой зависимости от движущей силы для одного шарика? Какова форма этих кривых для остальных обследованных шариков? Каково заключение о зависимости от движущей силы?

IV.6. Опыт Милликена

В предыдущем опыте было установлено, что конечная скорость маленьких пластмассовых шариков прямо пропорциональна движущей их силе. Используем теперь этот результат, чтобы выяснить, не будут ли различные заряды разных шариков кратны некоему элементарному заряду. При тщательном обследовании шариков можно подобрать шарики одинаковой массы, т. е. обеспечить одинаковость действующей на них силы тяжести. Кроме того, поскольку мы поддерживаем постоянный заряд пластин, электрическая сила будет пропорциональна заряду шариков и разность наблюденных скоростей будет пропорциональна разности их зарядов.

Установим аппаратуру, как в предыдущем опыте. (Нельзя забывать, что напряжение на пластинах представляет опасность!) Сожмем грушу, чтобы ввести порцию шариков; затем включим переклю-

чатель, чтобы зарядить пластины и выгнать из поля зрения быстрые шарики, имеющие большие заряды.

С помощью переключателя можно получить две комбинации сил: либо F_g+F_e (электрическая сила действует в сторону силы тяжести), либо F_g-F_e (электрическая сила направлена против силы тяжести). Измерим скорость v^+ (для F_g+F_e) и v^- (для F_g-F_e) по меньшей мере для каждого из 12 или 15 шариков.

Если бы была уверенность, что все объекты наблюдения одинаковы, можно было бы проанализировать результаты с помощью гистограммы (столбчатой диаграммы) скоростей при определенном положении переключателя и поисков указаний на то, что некоторые значения скорости преобладают. Но мы уже видели, что многие наблюдаемые объекты опускаются или слишком медленно, или слишком быстро, причем на рис. IV.7 можно видеть пару слипшихся частиц. Итак, осколки или, наоборот, конгломераты шариков несомненно нередки, так что нет никакой уверенности в равенстве размеров выбранных объектов. Однако, исключив влияние силы тяжести, можно свести до минимума ошибки, обусловленные различием масс. Нам уже известно, что конечная скорость пропорциональна силе. Для каждого шарика имеем скорость v^+, пропорциональную F_g+F_e, и вторую скорость v^-, пропорциональную F_g-F_e. Если вычесть v^- из v^+, то какой силе будет пропорциональна эта разность скоростей? Нельзя ли использовать найденные таким путем разности скоростей в качестве неплохой меры заряда?

Нам известно, что конечная скорость плоского листа бумаги не такая, как у того же листа, скомканного наподобие шарика. Если наблюдать осколок или конгломерат шариков, то как его скорость будет зависеть от его размеров и формы? Как это скажется на правильности величины v^+-v^- как меры электрического заряда?

Эту трудность можно устранить, используя только правильные шарики, имеющие одинаковую массу. Если теперь *складывать* скорости v^+ и v^-, то какой силе будут пропорциональны эти суммы? Как можно использовать этот результат при подборе партии одинаковых шариков?

Существуют разные варианты анализа полученных данных для подтверждения дискретности электрического заряда. Один из простых вариантов заключается в том, чтобы откладывать значения v^+-v^- в виде столбиков возрастающей высоты, расположенных на равных расстояниях по горизонтальной оси столбчатой диаграммы. Что свидетельствует о существовании естественной единицы заряда? Какое наименьшее число этих единиц содержится в измеренных зарядах?

IV.7. Заряд, переносимый ионами в растворе

Если два медных электрода поместить в разбавленный раствор серной кислоты и соединить с источником тока, то на отрицательном электроде (катоде) будут образовываться пузырьки водорода, поднимающиеся на поверхность раствора. При взвешивании положитель-

ного электрода (анода) до и после прохождения по нему тока можно обнаружить, что его масса уменьшилась. Следовательно, часть меди перешла в раствор. Очевидно, для переноса электрических зарядов через раствор должны образовываться ионы водорода и меди. В этом опыте мы определим величину заряда, переносимого каждым ионом водорода или меди.

Установка для проведения опыта представлена на рис. IV.11. Нальем в ванночку 1 л воды. Слегка помешивая воду, будем добавлять в нее концентрированную серную кислоту до концентрации раствора 5 см³ кислоты на 100 см³ воды. (Будьте осторожны! Концентрированная и разбавленная серная кислота — очень едкое вещество!)

Теперь заполним раствором колбу по возможности полнее, используя подсасывающую трубку. Очистив медный анод, взвесим его и поместим в раствор, как указано на рис. IV.11. Введем в колбу медный катод, соединенный с изолированным проводом. Вставим в колбу трубку для отсасывания воздуха так, чтобы трубка доходила до

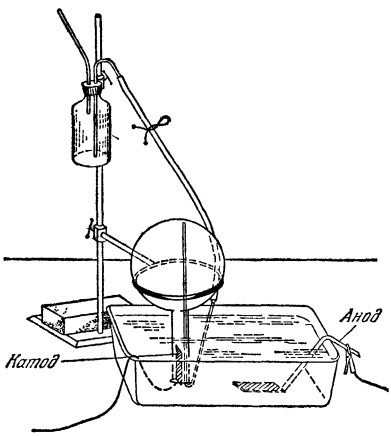


Рис. IV.11.

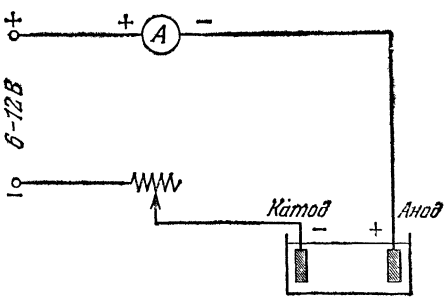


Рис. IV.12.

дна колбы. Опрокинем колбу и установим ее так, чтобы горло находилось около дна ванны. Соединим электроды, амперметр и реостат с источником питания (рис. IV.12). Будем пропускать через раствор ток в 5 А до тех пор, пока уровень раствора в колбе не сравняется с уровнем в ванне; при этом необходимо тщательно следить за током и заметить время, в течение которого он протекал. Необходимо силу тока поддерживать постоянной во время опыта. Сколько элементарных зарядов прошло через раствор?

Вынув из раствора медный анод, прополощем его, высушим и определим уменьшение его массы. Сколько образовалось молей медных ионов? Какое количество элементарных зарядов переносится каждым ионом? Какое важное предположение необходимо сделать, чтобы ответить на этот вопрос?

Отметим на колбе уровень раствора, затем вынем ее, прополощем и по объему образовавшегося газа определим число молей водорода. Какой заряд переносился каждым ионом водорода? Как можно было

бы использовать установку для того, чтобы показать, что масса m вещества, накапливаемая или расходуемая при протекании потока зарядов q, определяется уравнением $m=\alpha q$, где α — постоянная? Каково соотношение величин α для меди и водорода? Как можно показать, что для каждого вещества α — это масса иона, деленная на небольшое целое число? Каково значение этого целого числа?

Откладывается ли медь, прошедшая в раствор с анода, на катоде? Как это может повлиять на результаты расчетов?

IV.8. Заряд конденсатора

Конденсатор можно изготовить, расположив параллельно две металлические пластины (обкладки) с изолирующей прокладкой между ними. Если присоединить конденсатор к батарее, то к обкладкам притекут заряды. В рассматриваемом опыте измеряется величина заряда, сообщенного батареей обкладкам, а также устанавливается зависимость между накопленным на обкладках зарядом и разностью потенциалов, приложенной к конденсатору.

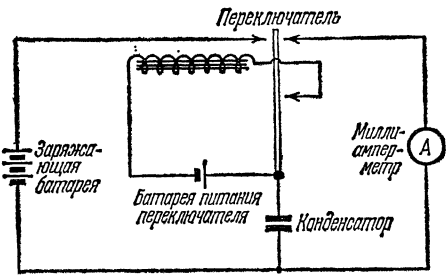


Рис. IV.13.

Используемый в данном опыте конденсатор состоит из двух листов металлической фольги, разделенных бумажной изоляцией и свернутых в цилиндр. Попробуем зарядить конденсатор батареей, затем отключить батарею и далее разрядить конденсатор через миллиамперметр. Как объяснить то, что происходит? Произведем теперь все соединения, кроме включения миллиамперметра, по схеме, изображенной на рис. IV.13. Милиамперметр не должен включаться до тех пор, пока контактные металлические пластинки не будут отрегулированы таким образом, чтобы молоточек переключателя не касался ни одной из пластинок в состоянии покоя и касался их поочередно во время работы.

При отключенной заряжающей батарее включим батарею, приводящую в действие переключатель. Не создает ли эта батарея тока в миллиамперметре? Затем сделаем отсчет тока, протекающего через миллиамперметр при устойчивых колебаниях переключателя и при одном включенном элементе заряжающей батареи. Почему прибор показывает теперь постоянный ток? Сколько раз в секунду заряжается и разряжается конденсатор? Сколько кулонов сообщается конденсатору за одну зарядку? Сколько элементарных зарядов?

Повторим опыт с двумя, тремя и четырьмя элементами заряжающей батареи. Каково отношение заряда конденсатора к разности потенциалов? (Отношение q/V называется емкостью, а один кулон на вольт называется фарадой.)

Попробуем включить сопротивления в 100, 200, 10^3, 10^4 и 10^5 Ом в цепь зарядки. Как это отразится на зарядном токе?

Соединим два конденсатора параллельно и измерим емкость. Какова она по сравнению с емкостью каждого конденсатора? Затем испытаем последовательное соединение конденсаторов.

IV.9. Энергия, преобразуемая электродвигателем

Электродвигатель есть машина, преобразующая электрическую энергию в механическую. Если ЭДС батареи, питающей электродвигатель, равна $\mathcal{E}$, а протекший через батарею заряд равен q, то энергия, сообщенная батареей, равна $q\mathcal{E}$. Если электродвигатель использован для поднятия массы m на высоту h, то приращение потенциальной энергии, или полезная работа, совершенная двигателем, равна mgh. Равна ли эта работа энергии, сообщенной батареей?

Прибор для соответствующего опыта изображен на рис. IV.14. Необходимо установить двигатель на достаточной высоте, чтобы груз

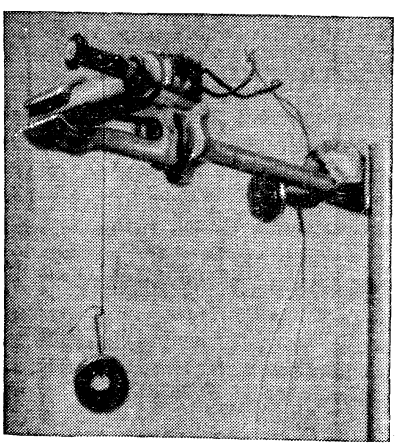


Рис. IV.14.

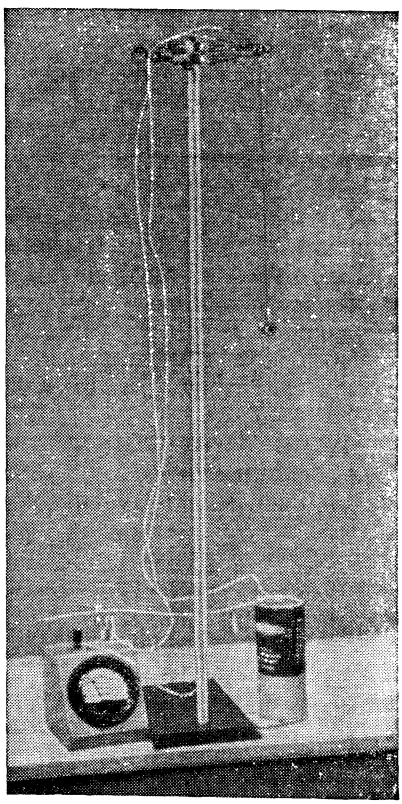


Рис. IV.15.

(ко́льца) можно было поднять примерно на 2 метра. Если конец штыря, наматывающего привязанную к нему нить, расположен чуть ниже другого конца, то нить будет наматываться аккуратно. Составные части электрической схемы показаны на рис. IV.15.

Подвесив на конце нити 6 колец, подберем сопротивление так, чтобы груз поднимался со скоростью около 0,5 м/с. (При меньших скоростях работа электродвигателя может оказаться неустойчивой.)

Какова ЭДС батареи? Каков ток в цепи во время движения груза вверх? Сколько времени требуется для поднятия груза на 1,5 м? Какова энергия, сообщенная батареей для этого поднятия груза? Насколько изменяется при этом потенциальная энергия груза? Какова энергия, сообщенная батареей по сравнению с приращением энергии груза?

Опыт следует повторить при нескольких, более высоких, значениях скорости. Как изменяется при этом ток?

Построим график тока как функции скорости, а также график отношения энергии, затраченной двигателем, к энергии, затраченной батареей (т. е. коэффициента полезного действия системы) также в зависимости от скорости.

Вновь повторим опыт, сначала при том же грузе из шести колец, начиная со скорости около 0,4 м/с, но теперь будем поддерживать постоянное сопротивление и снимать по одному кольцу, пока не останется два кольца.

Построим график коэффициента полезного действия системы в функции числа колец. Какое вытекает заключение об условии наивысшего коэффициента полезного действия?

Рассмотрим систему, состоящую из батареи, проволочного сопротивления и электродвигателя. Куда уходит та энергия, которая не превращается в потенциальную энергию? (При этом будем пренебрегать сопротивлением внутренних частей двигателя.)

IV.10. Магнитное поле тока

Поместим компас над длинным проводником и на мгновение коснемся концами проводника клемм сухой батареи. Стрелка компаса отклонится. Очевидно, ток, протекающий в проводнике, создает магнитное поле, которое отклоняет стрелку компаса. Как можно определить зависимость направления и напряженности магнитного поля от тока, который создает это поле? Компас укажет направление, так как его стрелка всегда устанавливается по направлению поля, а напряженность магнитного поля можно измерить, сравнивая его с постоянным магнитным полем Земли.

Определим сначала направление магнитного поля в центре катушки, образованной несколькими витками проволоки, намотанной на раму, как показано на рис. IV.16. Поместим компас в центре катушки и отметим направление его стрелки при отсутствии тока в цепи катушки. Соединим катушку через лампочку карманного фонаря с сухой батареей, как показано на рис. IV.17, и отметим новое направление стрелки компаса. Лампочка обеспечивает низкую величину тока.

Присоединим теперь катушку непосредственно к клеммам сухой батареи и определим направление стрелки компаса. (Катушку нельзя оставлять долго присоединеной к батарее ввиду того, что при боль-

шой силе тока, протекающего через катушку, батарея быстро разряжается.) Повернем катушку в горизонтальной плоскости на угол 30° и снова отметим направление магнитного поля при максимальном токе, протекающем через катушку. Что можно сказать о направлении магнитного поля в центре катушки при протекании в ней тока?

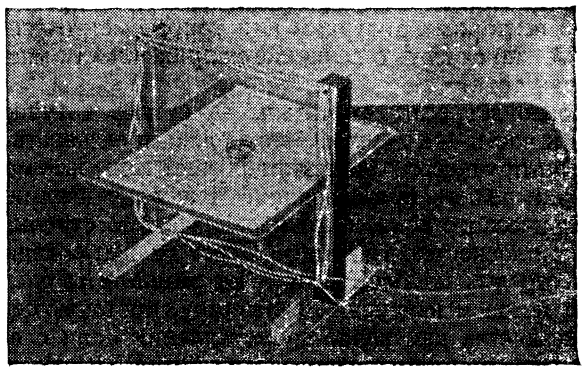


Рис. IV.16.

Изменим направление тока и повторим опыт. Как влияет изменение направления тока на направление магнитного поля?

Оставив только один виток катушки, повернем рамку относительно земного магнитного поля таким образом, чтобы стрелка компаса,

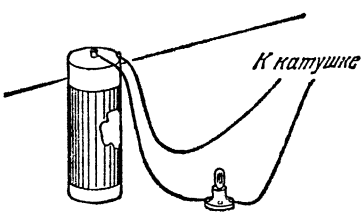


Рис. IV.17.

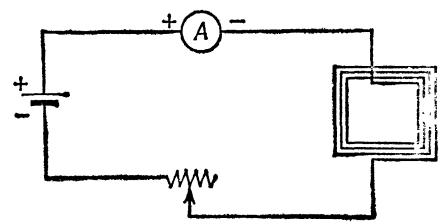


Рис. IV.18.

помещенного в центре катушки, совпадала с плоскостью витка. Снова соединим концы проволоки с сухой батареей через лампочку карманного фонаря. Напряженность магнитного поля, создаваемого током, протекающим в катушке, будет примерно такого же порядка, как и величина горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли в центре катушки. Необходимо, чтобы магнитное поле проволоки, соединяющей катушку с батареей, не влияло заметным образом на поле в центре катушки. Для этого проволока должна быть по возможности удалена от катушки. Измерим угловое отклонение стрелки компаса. Переменим направление тока на обратное и снова отметим отклонение стрелки компаса.

Начертим векторную диаграмму для определения напряженности магнитного поля в единицах, равных горизонтальной составляющей напряженности земного магнитного поля.

Добавим второй виток проволоки к катушке и измерим отклонение стрелки компаса для обоих направлений тока. Будем продолжать увеличивать число витков катушки и повторять опыт. После окончания опытов определим напряженность поля для каждого случая с помощью векторных диаграмм или тригонометрических зависимостей. Что можно сказать о величине напряженности магнитного поля как функции тока?

Что произойдет, если намотать часть витков катушки в одном направлении и часть — в другом? Что можно предсказать о напряженности результирующего поля в этом случае? Измерьте магнитное поле для проверки вашего предсказания. Можно ли измерить магнитное поле электрического тока, если первоначально стрелка компаса не совпадала с плоскостью катушки? Будет ли напряженность магнитного поля стрелки компаса влиять на результаты опыта?

Другим методом изменения силы тока, протекающего по виткам катушки, является изменение сопротивления цепи с помощью реостата. Схема такой цепи представлена на рис. IV.18. При наличии времени можно использовать и этот способ. Согласуются ли в этом случае результаты измерения напряженности поля для различных показаний амперметра с заключениями, сделанными в первой части опыта, о зависимости напряженности магнитного поля от тока?

IV.11. Измерение индукции магнитного поля

В предыдущих опытах измерялась индукция магнитного поля в единицах горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли. В этом опыте будем измерять индукцию магнитного поля, используя силу, с которой магнитное поле действует на проводник с током. Если силу F измерять в ньютонах, ток I в амперах и длину проводника l в метрах, то единица индукции магнитного поля B есть ньютон/(ампер·метр) в соответствии с формулой $B=F/Il$, при условии, что проводник расположен перпендикулярно к направлению поля.

На рис. IV.19 изображены чувствительные весы, которые можно использовать для измерения силы, действующей на короткий проводник с током, помещенный в магнитное поле. Если весы установлены таким образом, что основание металлической петли (A на рис. IV.19) перпендикулярно к магнитному полю, а стороны параллельны, то силы будут действовать только на это основание. Измерять силу можно с помощью груза, подвешенного к противоположному концу весов и уравновешивающего эту силу.

Определим в этом опыте индукцию магнитного поля в центре соленоида, по обмотке которого протекает ток. Соединим петлю весов, обмотку соленоида, реостаты и амперметры с источником тока в соответствии со схемой, изображенной на рис. IV.20. Убедимся, что

концы петли и поддерживающих опор зачищены и обеспечивают электрический контакт.

Не подключая питание к электрической схеме, введем теперь основание петли в центр соленоида (рис. IV.21). Приведем коромысло весов с помощью регулировочной гайки в горизонтальное положение.

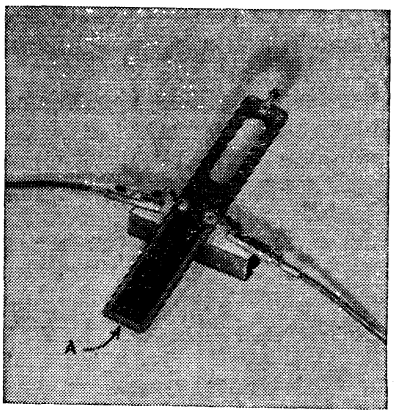


Рис. IV.19.

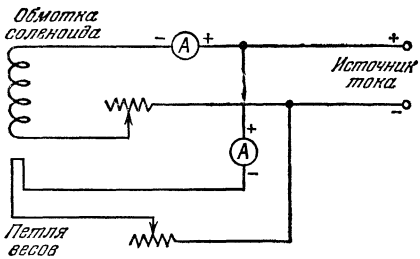


Рис. IV.20.

Создадим магнитное поле, пропустив через обмотку соленоида ток 4 А. Измерим индукцию поля соленоида, пропустив через петлю весов ток около 1 А и найдя силу, уравновешивающую весы. Для этого

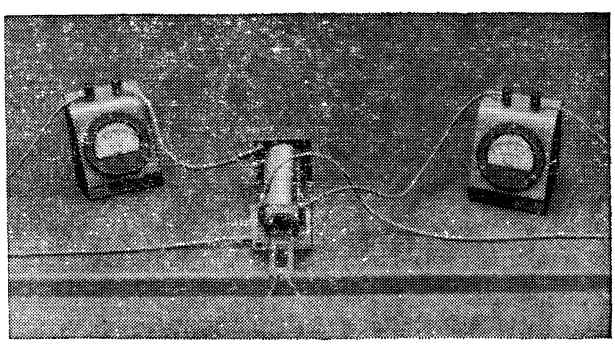


Рис. IV.21.

сначала сбалансируем весы грубо куском бечевки и затем точно, изменяя ток, протекающий через петлю, с помощью реостата. (Если изменять ток, протекающий через петлю, в широких пределах, то контакты весов быстро коррозируют и делаются шероховатыми.)

Найдем веса бечевок, необходимые для того, чтобы уравновешивать силы, действующие на петлю при протекании в ней тока различной силы. (Ток в петле не должен превышать 5А для предотвращения коррозии контактов.) Какова индукция магнитного поля в центре соленоида в Н/(А·м)? Какова индукция в Н/[(элем. зар./с) м]?(1А= $=6{,}25\cdot10^{18}$ элем. зар./с).

Измерим индукцию поля в соленоиде, меняя силу протекающего в его обмотке тока (5 А — максимальный ток, при котором соленоид еще не перегревается).

Показывают ли эти измерения, что индукция поля внутри соленоида пропорциональна протекающему в его обмотке току?

Можно ли использовать данную установку для измерения индукции поля небольшого постоянного магнита или для измерения индукции магнитного поля Земли?

Почему нельзя использовать железо в качестве материала для петли весов?

IV.12. Масса электрона

Электрон из состояния покоя разгоняется электрическим полем и приобретает кинетическую энергию, равную произведению его заряда на разность потенциалов поля, через которое он пролетает: $mv^2/2=qV$. При попадании электрона, движущегося со скоростью

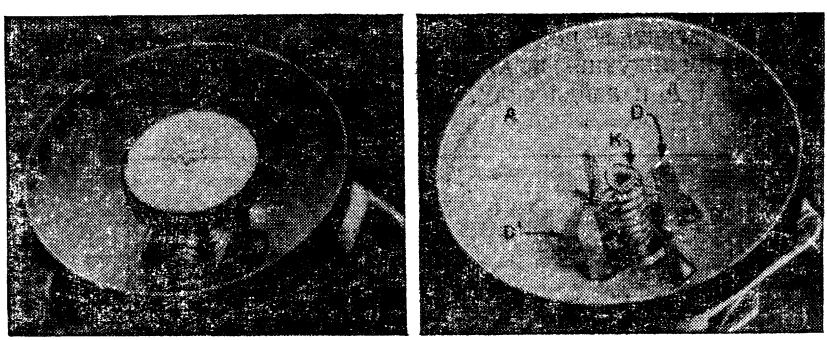


Рис. IV. 22.

v, в однородное магнитное поле, направленное перпендикулярно к движению электрона, он испытывает действие центростремительной силы. Эта сила, направленная перпендикулярно к движению электрона и к магнитному полю, зависит от индукции поля B, величины заряда электрона и его скорости: $F=Bqv$. Под действием этой силы электрон будет двигаться по круговой траектории, радиус R которой определяется из соотношения $F=mv^2/R$.

Приравнивая два выражения для магнитной силы, $F=Bqv$ и $F=mv^2/R$, получаем $v=BqR/m$, или $v^2=B^2q^2R^2/m^2$. Находя значе-

ние v^2 из уравнения $mv^2/2=qV$ и подставляя его в последнее соотношение, получаем

$$m=B^2qR^2/2V.$$

Будем использовать для ускорения и отклонения электронов промышленную электронную лампу, которая используется для настройки радиоприемников. На рис. IV.22 изображена конструкция лампы: *а* — электронная лампа настройки (так называемый «глазок») без стеклянного колпака; *б* — металлический колпачок в центре лампы снят с поддерживающих проволок и удален, благодаря чему

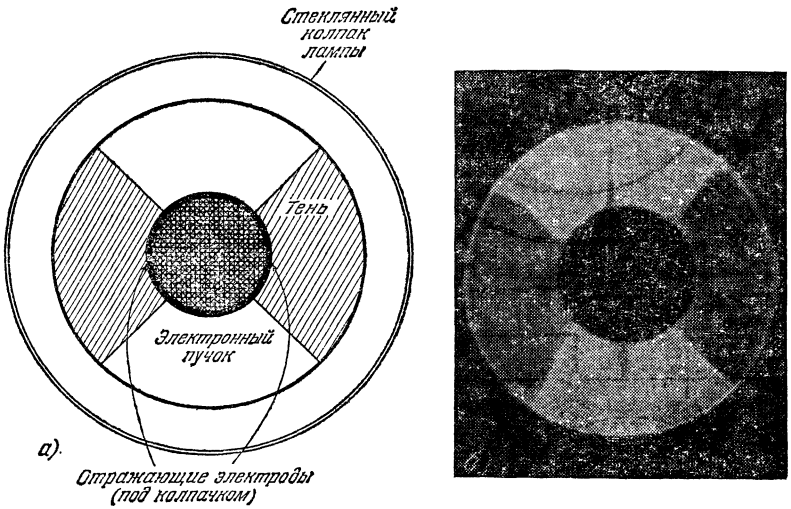


Рис. IV.23.

можно видеть основные части конструкции лампы (K — катод, испускающий электроны; D и D' — отражающие электроды, которые образуют тень; A — анод, покрытый флуоресцирующим веществом). Электроны испускаются катодом и ускоряются разностью потенциалов между катодом и анодом. Они движутся в радиальном направлении веерообразным пучком, достигая максимальный скорости к моменту их выхода за пределы металлического колпачка, закрывающего середину лампы. На оставшемся участке пути электронов по направлению к аноду их скорость практически остается постоянной.

Анод покрыт флуоресцирующим веществом, которое светится при попадании на него электронов. Коническая форма анода позволяет проследить траектории движения электронов от катода к аноду; при наблюдении сверху конический анод как бы дает диагональный разрез пучка электронов, показывая положение электронов на различных расстояниях от катода. Два отражающих электрода D

и D' соединены с катодом и при отсутствии магнитного поля отталкивают электроны, движущиеся по направлению к ним от катода, образуя клинообразные тени на аноде, как показано на рис. IV. 23, *а*. На рис. IV.23, *б* приведен снимок реальной лампы в этих же

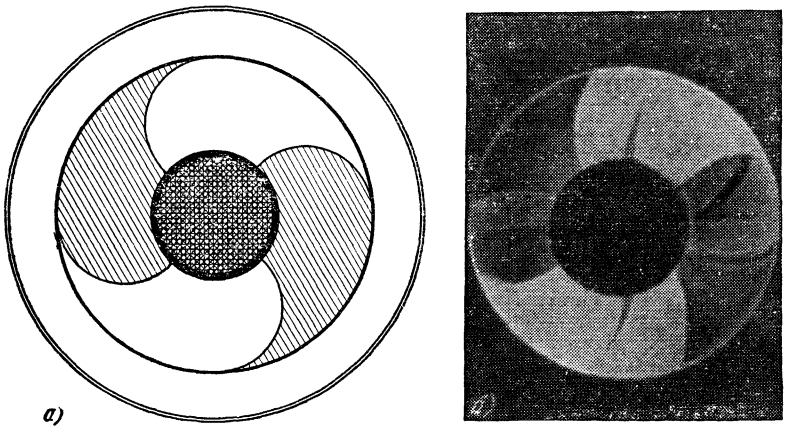


Рис. IV.24.

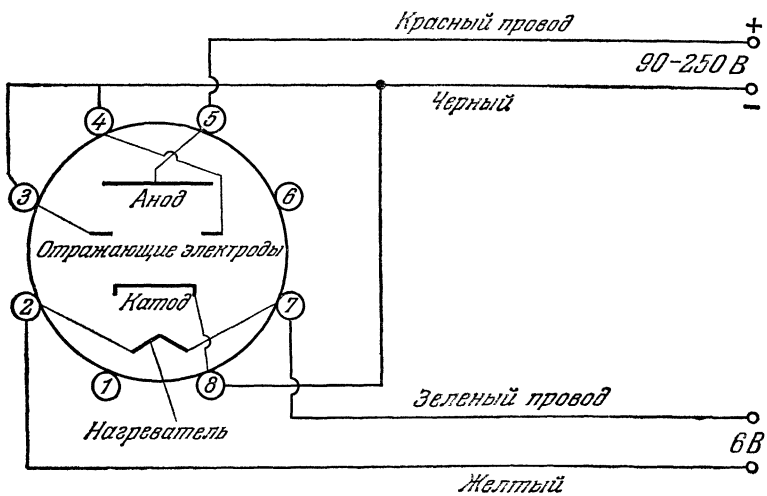


Рис. IV.25.

условиях. Две узкие тени образуются металлическими проволоками, которые поддерживают центральный колпачок.

Когда лампа находится в однородном магнитном поле, параллельном оси катода, электроны отклоняются и движутся почти по круговой траектории, на что указывает изгиб краев теней на рис. IV.24, *а* (см. также снимок реальной лампы в этих же условиях на рис. IV.24, *б*).

Создать действие на лампу однородного магнитного потока можно путем введения ее внутрь соленоида. Соберите цепь лампы и соленоида, как показано на рис. IV.25 и IV.26. Подключите любое анодное напряжение в пределах от 90 до 250 В и затем, изменяя протекающий по обмотке соленоида ток, увеличивайте кривизну краев теней на аноде до тех пор, пока они не приблизятся по форме к дуге окружности, радиус которой можно легко измерить с помощью круглого предмета: монеты, круглого стержня, карандаша и т. п.

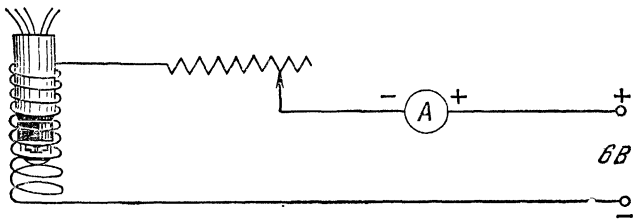


Рис. IV.26.

Проделайте измерения для нескольких значений анодного напряжения (1 В$=1{,}6\cdot10^{-19}$ Дж на элементарный заряд), а также при различных магнитных полях. (Как вы определите величину индукции поля?) Рассчитайте массу электрона.

Возможно ли использовать магнитное поле Земли для отклонения пучка электронов? Какой величины потребовалась бы для этого лампа? Допустим, Земля не имеет магнитного поля. Можно ли в этом случае практически определить массу электрона, ускоряя его в горизонтальном направлении данной разностью потенциалов и затем наблюдая его отклонение в поле тяготения Земли?

IV.13. Магнитное поле вблизи длинного прямого провода

В опыте IV.10 компас использовался для определения магнитного поля в центре витка проволоки. Используем теперь этот метод для измерения магнитного поля длинного прямого провода и для установления зависимости напряженности этого поля от расстояния до провода.

Натяните длинный прямой провод (AB) рядом с листком миллиметровой бумаги, линии которой совпадают с направлением горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли (рис. IV.27). Провод крепится к кромке стола с помощью куска изоляционной ленты. Так же крепится и бумага к столу. Убедитесь, что в зоне 50 см от листка бумаги, на котором будет перемещаться компас, нет железных предметов. За исключением прямолинейного вертикального участка, остальная часть провода также должна быть удалена от бумаги не менее чем на 50 см.

Пропустим теперь через провод постоянный ток 5 А и определим направление магнитного поля вокруг провода. Для определения величины поля измерим отклонение стрелки компаса. Повторим измерения для нескольких расстояний компаса от провода (но не

более 20 см), передвигая компас вдоль линий, параллельных горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли. Измерения поля на расстояниях от провода, соизмеримых с длиной стрелки компаса, сопровождаются большими погрешностями, так как различные части стрелки находятся в этом случае под действием сил, значительно отличающихся по величине. Поэтому лучше начать измерения, когда центр компаса находится на расстоянии не менее 5 см от провода.

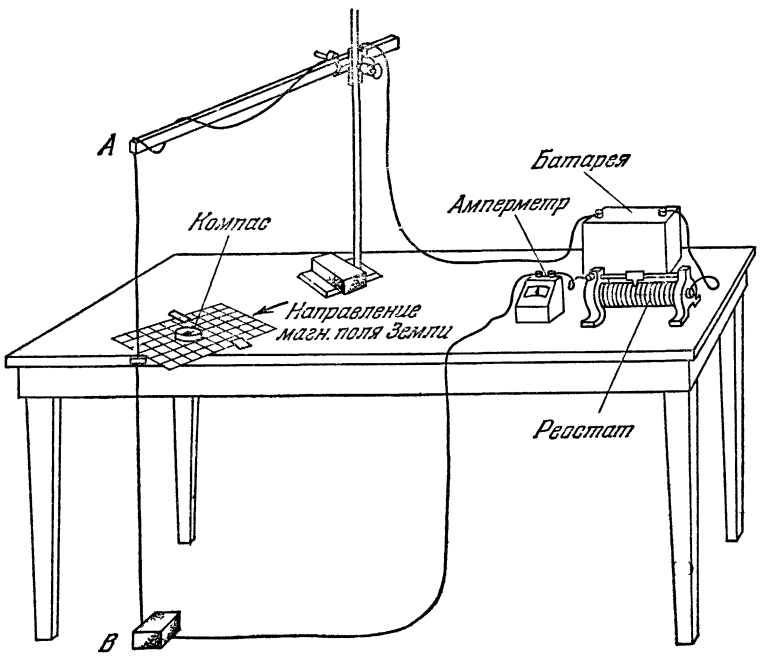


Рис. IV.27.

Как изменяется напряженность магнитного поля, создаваемого проводником с электрическим током, в зависимости от расстояния до проводника? Как вы пришли к этому заключению?

Почему необходимо удалять от компаса части провода и железные предметы?

Как изменились бы результаты опыта, если длина вертикального провода была бы всего 20 см?

Как повлияет на точность измерений увеличение и уменьшение силы тока в 100 раз?

Натянем вертикально два параллельных провода на расстоянии 20 см друг от друга в плоскости, совпадающей с направлением магнитного поля Земли. Определим, как меняется магнитное поле вдоль линии между проводами, когда токи в проводах имеют: 1) противоположное направление; 2) одинаковое направление. Объясните полученные результаты.

IV.14. Неупорядоченность радиоактивного распада

Радиоактивные элементы испускают частицы, которые можно сосчитать с помощью счетчика Гейгера. Каждый щелчок счетчика соответствует одному акту радиоактивного распада одного атомного ядра. Какие сведения о скорости распада радиоактивного препарата мы смогли бы получить в условиях школьного эксперимента?

Поместим зонд счетчика Гейгера на таком расстоянии от радиоактивного образца, чтобы щелчки счетчика не были слишком частыми и их можно было сосчитать. Поместив зонд и счетчик в определенное положение, не следует их больше перемещать После нескольких тренировочных 10-секундных отсчетов будем записывать числа щелчков счетчика за каждые 10 с в течение 20 мин Количество щелчков за каждый промежуток будет различным.

Изобразим результаты отсчетов графически, в виде зависимости числа интервалов времени N, по истечении которых зафиксировано k щелчков, от этого числа k. Какова средняя скорость счета, получаемая из этого графика?

Сложим теперь результат счета за второй 10-секундный интервал с первым, разделим сумму пополам и получим среднюю скорость счета за 20-секундный интервал. Добавим к сумме двух первых отсчетов отсчет третьего интервала, разделим результат на три и получим среднюю скорость счета за 30-секундный интервал. Будем продолжать эти подсчеты, пока не получим среднюю скорость счета за все время отсчетов (15—20 мин). В каком соотношении находится определенная таким образом средняя скорость счета счетчика за весь промежуток времени с аналогичной величиной, получаемой с помощью графика? Построим график зависимости средней скорости счета, полученной указанным способом, от общего числа щелчков, использованного при каждом последовательном подсчете.

Как зависит точность измерения скорости счета от общего числа отсчетов? Какой скорости счета можно ожидать, если производить отсчеты в течение двух часов? Увеличит ли это точность?

Так как в счетчик попадает только небольшая часть частиц, испускаемых радиоактивным образцом, скорость счета, полученная в этом опыте, намного меньше скорости распада образца. Как можно подсчитать среднее число атомов, подвергающихся распаду каждую секунду (скорость распада образца)?

Можно ли определить период полураспада образца, используя результаты данного опыта?

Можно также провести этот опыт с помощью камеры Вильсона и слабого радиоактивного образца на конце иглы, помещенной внутри камеры. В каком соотношении в этом случае находилась бы скорость счета со скоростью распада образца?

IV.15. Спектр водорода и постоянная Планка

Линии спектра водорода доставляют хорошую возможность сравнить теорию с опытом. В рассматриваемом опыте измеряются длины волн трех спектральных линий водорода. Из количественных соот-

ношений между этими длинами волн и значениями уровней энергии атома по квантовой теории можно вычислить постоянную Планка.

На фотоснимках (рис. IV.28 и IV.29) и схеме IV.30 изображен используемый спектрометр. (Необходимо удостовериться, что лист бумаги под основанием зрительной трубы плотно прижат.) Для

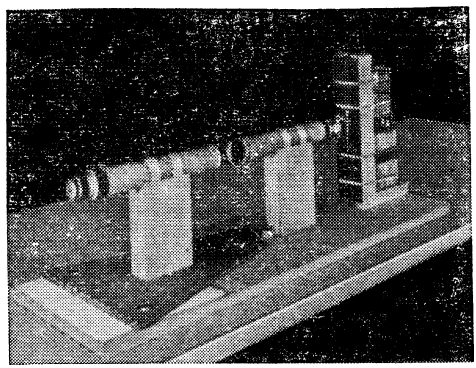


Рис. IV.28.

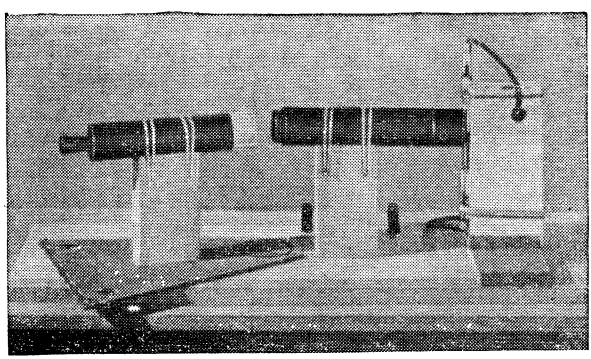


Рис. IV.29.

приведения его в рабочее состояние требуется несколько юстировочных операций. По окончании всех юстировочных операций, коллиматор и зрительная труба укрепляются на своих держателях. (Почему важно, чтобы дифракционная решетка находилась точно на вертикальной оси вращения зрительной трубы?) Прежде всего нужно сфокусировать зрительную трубу на бесконечность. Для этого лучше всего снять ее с установки и направить на удаленный предмет. Поставив трубу на место, направляем ее на источник света и удостоверяемся, что нить окуляра и щель располагаются вертикально. Затем, сняв крышку со щели, передвигаем щель взад и впе-

ред, пока не получим наиболее резкое ее изображение. Где оно находится? Чтобы удостовериться, что дифракционная решетка параллельна плоскости щели, будем наблюдать одну из линий (только не центральный максимум), вращая при этом решетку. Можно ли выяснить, когда именно решетка параллельна плоскости щели? Что на это указывает? Желательно получить как можно более узкую щель, в той мере, в какой это совместимо с требованием достаточной яркости ее изображения.

Как известно из нашего исследования волн, длина волны λ связана с расстоянием между штрихами решетки d и углом дифракции θ соотношением

$$\lambda = d \sin \theta.$$

Спектрометр можно проградуировать по спектральным линиям известных длин волн, отмечая остро отточенным карандашом положения риски, имеющейся в середине основания зрительной трубы.

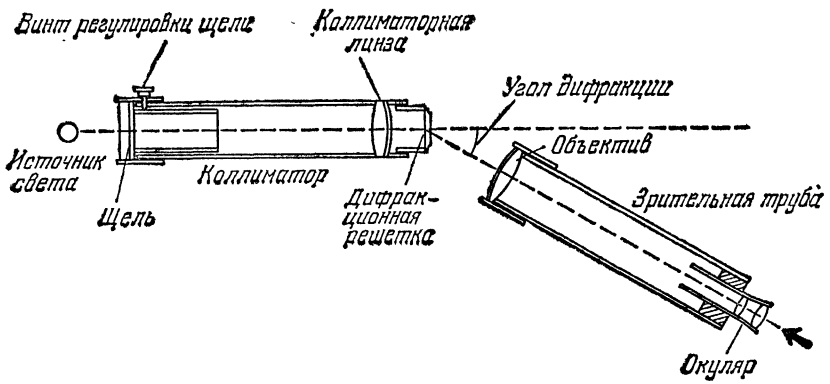


Рис. IV.30.

Расстояние между двумя такими отметками пропорционально длине волны. Чему равен коэффициент пропорциональности? Одной из подходящих линий является зеленая линия спектра ртути (5641 Å). Можно наблюдать как эту линию, так и ряд других, используя в качестве источника света ртутную трубку от люминесцентной лампы, но без люминесцентного покрытия.

Затем ртутная трубка заменяется водородной. Яркость этой трубки намного ниже, чем ртутной, и может оказаться необходимым работать в затемненной комнате. Нужно пройтись по всему диапазону углов, соответствующему видимому спектру. Сколько спектральных линий можно видеть в этом диапазоне? Каковы их длины волн?

Из исследования неупругих столкновений между электронами и атомами (см. раздел 34.2) известно, что частота линий спектра испускания ν определяется равенством

$$\nu = (E_i - E_f)/h, \qquad (1)$$

где E_i и E_f — энергии атома до и после испускания фотона, а h — постоянная Планка. Как это следует из квантовой теории энергетических уровней (см. раздел 34.6), уровни энергии для атомарного водорода имеют следующие значения:

$$E_n = -\frac{2\pi^2 k^2 m}{h^2} \cdot \frac{1}{h^2}. \tag{2}$$

Обозначим значения n для E_i и E_f соответственно через n_i и n_f. Тогда, подставляя значения E_n из равенства (2) в равенство (1), получим

$$\nu = \frac{2\pi^2 k^2 m}{h^3}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right), \tag{3}$$

или, поскольку $\nu = c/\lambda$,

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{2\pi^2 k^2 m}{h^3 c}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right). \tag{4}$$

Нельзя ли, на основании отношения обратных величин длин волн, сказать, какие уровни энергии участвуют в излучении наблюдаемых длин волн? (Можно принять, что нижний уровень одинаков для всех этих линий.)

Удостоверившись в правильности оценки значений n_i и n_f для трех спектральных линий, мы будем знать все величины в равенстве (4), кроме постоянной Планка. Вычислим ее. На основании всего, что нам известно, какое можно сделать заключение о точности нашего определения величины h?

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО

Введение

Часть IV возвращает нас к рассмотрению атомной природы вещества, т. е к той теме, знакомство с которой состоялось в заключительных главах части I и продолжалось в части III при изучении кинетической теории газов. Однако теперь на фундаменте пройденного материала и знакомства с электрическими силами открывается возможность количественного подхода к вопросам атомного строения. Кинематика волн и механика точки, рассмотренные соответственно в частях II и III, используются для описания современной волновой механики, без которой нельзя обстоятельно уяснить мир атома, т. е. тот мир, в котором «частицы», подобные электронам, часто ведут себя как волны, а волны, подобные световым, часто проявляют себя как частицы. Великие идеи механики, такие, как законы сохранения количества движения и энергии, все еще остаются в силе, но чтобы исследовать микромир, нам предстоит расширить свои представления. В конце настоящей части мы попадаем в царство «современной» физики, имея под собой тот фундамент, на котором возводятся все современные исследования по ядерной физике и физике твердого тела.

Курс заканчивается подробным знакомством с атомом водорода. Кое-кого может удивить, почему мы не используем наши знания для ознакомления с более сложными атомами и молекулами, почему мы не возвращаемся к более обстоятельному описанию кристаллической структуры, не исследуем атомные ядра, мезоны, непонятные частицы... Такой перечень можно было бы сделать весьма длинным. Здесь вполне уместно напомнить об одном назначении настоящего курса. Курс не преследует цель дать учащемуся общее представление о бесчисленном множестве разнообразных физических явлений, курс предназначается для глубокого изучения немногих, самых фундаментальных положений физики. Из части IV учащиеся не смогут узнать «все об атомах». Они, однако, получат хорошее представление о фундаментальных доводах в пользу существования атомов с пониманием того, почему само существование атомов заставляет пересмотреть законы физики с тем, чтобы охватить в них волновые свойства частиц и корпускулярные свойства волн. Если они действительно хорошо усвоят это, то большего от них не следует требовать. Обстоятельное ознакомление с последними достижениями физики невозможно без сложных математических выкладок. По многим вопросам у физиков в действительности нет достаточной уверенности в том, что они сумеют изложить свои представления на простом языке.

Прежде чем приступить к изучению атомов, нам надлежит исследовать количественную сторону электричества, потому что именно электрические силы связывают воедино составные части атомов и образуют из отдельных атомов крупные группы, которые нами воспринимаются обычно как вещество. Поэтому первые

главы части IV посвящены электричеству и магнетизму, но носят при этом весьма своеобразный характер. С самого начала нас интересует атомистическая природа электрических сил. Начальные главы части IV преследуют двоякую цель: изучить электрические составные части вещества (отсюда формирование представлений о строении атомов) и изложить в количественном выражении законы действия электрических сил.

Подход к изучению электричества отличается своей фундаментальностью. Но создавая прочный фундамент для изучения действия электрических приборов, он не преследует цели ознакомления с электротехникой как самостоятельным предметом. С учетом сосредоточения нашего внимания на изучении свойств атомов анализ сложных электрических цепей, подобных цепям в радиотехнике и телевидении, представлял бы собой отклонение от главной цели. Даже такой древний устой, как закон Ома, рассматривается просто как полезная зависимость, которая при особых обстоятельствах применительно к некоторым специальным цепям уже не представляет собой *закона* электричества.

Часть IV естественным образом делится на две половины. В первой из них (гл. 26—31) излагаются электростатика и магнетизм. Главы 26—29, трактующие вопросы электрического взаимодействия элементарных заряженных частиц, заканчиваются изложением представления об электрической цепи. Главы 30 и 31, посвященные описанию магнитных полей токов и электромагнитной индукции, завершаются ознакомлением с электромагнитными волнами. Главы 32—34 знакомят с миром атома, с вопросами строения атомов и квантовой природы света. Ниже кратко излагается содержание отдельных глав.

Глава 26 закладывает фундамент под представление об электричестве с позиции заряженных частиц, без чего нельзя понять атом. Глава начинается с электростатики, но скоро выходит за ее рамки с рассмотрением движения зарядов при электризации соприкосновением и электростатической индукции и возникновения слабых токов. Электроскоп и электрометр рассматриваются как измерительные приборы. Представление об электричестве как о движении внутриатомных частиц составляется на основе изучения явлений переноса в различных средах — газах, растворах, металлах.

В главе 27 электростатические силы получают количественную трактовку через опыты, которые приводят к закону Кулона $F=kQq/r^2$. Эта зависимость позволяет нарисовать общую картину электростатического поля вокруг зарядов при простейшем их размещении. Атомистическая природа электрического заряда раскрывается через количественное рассмотрение одной разновидности знаменитого опыта Милликена с масляной каплей. Постоянная в законе Кулона k устанавливается посредством опыта, подобного эксперименту Милликена, рассматриваемому в надлежащем масштабе. Наконец, здесь делается вывод о сохранении заряда и о том, что все обнаруженные «элементарные» частицы несут один положительный, один отрицательный или нулевой элементарный заряд.

Глава 28 начинается с перенесения результатов опыта Милликена, рассмотренного в предшествующей главе, на определение энергии электрической частицы, получившей ускорение между заряженными параллельными пластинами. Описан опыт по определению времени пролета, чтобы измерить массы протона и электрона. Знакомству с батареями как источниками энергии предшествует рассмотрение токов и ионных зарядов. Определяется электродвижущая сила (ЭДС) батареи. Излагается общее представление о разности потенциалов и потенциале

в поле точечного заряда. Наконец, говорится о вольтах и амперах как единицах измерения.

Глава 29 посвящена главным образом рассмотрению простых цепей. При этом широко используются представления об электрической энергии. Дается представление о законе Ома как особом, но важном случае, характеризующем взаимосвязь между напряжением на участке цепи и током в этом участке.

В главе 30 магнетизм характеризуется качественно, начиная с известной стрелки компаса. Магнитные поля магнитов и токов и их векторная природа изучаются по Учебнику и в лаборатории. Исследуются силы, действующие на токи в магнитных полях, а результаты исследования используются для ознакомления с измерительными приборами и электродвигателями и движением заряженного тела в магнитном поле. Отсюда перекидывается мост к описанию масс-спектрометрического способа определения массы атомных частиц. Затем исследуется поле длинного прямого проводника и определяется «циркуляция» вектора B вдоль проводника с приложением этого понятия к полю внутри длинного соленоида. В последующем лабораторный опыт позволяет дать новое определение единиц для выражения магнитного поля через фундаментальные величины.

Глава 31 завершает изложение классической картины электричества и магнетизма. Отметив, что на концах движущегося в магнитном поле проводника возникает разность потенциалов, мы выводим количественную зависимость между рассматриваемыми величинами, обращая внимание на сохранение энергии в процессе индуцирования. Закон индукции излагается в общей формулировке через скорость изменения магнитного потока. При этом делается упор на то, что индуцируемые электрические поля имеют всегда такое направление, какое вытекает из закона сохранения энергии, как того требует закон Ленца. Наконец, отметив симметричность изменения электрических полей изменению магнитных полей, мы показываем, что электромагнитные волны способны передавать энергию, и рассматриваем электромагнитный спектр. С этого места мы связываем воедино оптику, динамику, электричество и волны, чтобы создать целостную картину.

Глава 32 начинается с изучения строения атома. На основе опытов по рассеянию альфа-частиц высоких энергий исследуется строение атомов золота и в итоге описывается резерфордовская модель атома. Проводятся расчеты траекторий заряженных частиц, рассеиваемых кулоновским полем, а результаты таких расчетов сравниваются с данными наблюдающегося углового рассеяния альфа-частиц. Устанавливается, что закон Кулона сохраняет силу на расстоянии вплоть до 10^{-14} м. Опыты на других элементах помогают составить представление о числе элементарных зарядов в различных ядрах и приблизительной величине ядра. Наконец, учащимся рассказывается о серьезных трудностях, с которыми сталкивается резерфордовская модель атома, поскольку наблюдения по атомным спектрам и устойчивости атомов приходят в противоречие с этой моделью, если оставаться в рамках классической электромагнитной теории.

В главе 33 показывается, что свет и материя обнаруживают как волновые, так и корпускулярные свойства. Сначала «зернистая» природа света обосновывается из опыта Милликена, затем опыт Тэйлора дает основания предположить, что картины интерференции могут быть следствием кумулятивного действия множества крохотных импульсов света. Подробно исследуется фотоэлектрический эффект с изложением объяснения, данного Эйнштейном. Отсюда делается вывод, что фотон света с частотой ν обладает энергией $h\nu$ и несет количество движения

$h\nu/c$. Закон сохранения количества движения проверяется на эффекте Комптона. Затем на основе опытов с дифракцией электронов раскрывается «волновая» природа движущегося вещества и делается вывод, что частица с количеством движения p должна иметь связанную с ней длину волны h/p согласно соотношению де Бройля. После этого выясняется вопрос, когда становится существенной волновая природа вещества, и показывается, например, что волновое поведение электронов в атомах играет важную роль.

В главе 34 сведения о волнах вещества находят конкретное приложение к изучению строения атома. Рассмотрение опытов Франка и Герца доказывает существование дискретных уровней энергии в атомах. Существование внутренних энергетических состояний дополнительно подтверждается рассмотрением спектров испускания и поглощения. Довольно подробно анализируются уровни энергии атома водорода. Установление того факта, что уровни энергии можно представлять себе как картины стоячих волн, подводит учащихся к пониманию того, что для описания строения простого атома важны как волновые, так и корпускулярные характеристики.

При составлении планов по части IV многие преподаватели, по-видимому, столкнутся с большей трудностью, чем при планировании работы над другими частями курса. Это вызывается обычно тем, что часть IV есть заключительная часть курса, прорабатываемая на последнем семестре. Здесь дадут о себе знать все прежние накопившиеся отставания. И теперь, столкнувшись с захватывающей и емкой темой, многие преподаватели ощутят острый недостаток времени. В табл. 1 приведены два возможных варианта плана проработки части IV. Ниже излагаются рекомендации в отношении возможного варьирования этих планов.

ТАБЛИЦА 1

Главы	10-недельный план изучения части IV			15-недельный план изучения части IV		
	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты
26	2	1	IV.2	5	1	IV.1, IV.2
27	4	3	IV.3, IV.5 IV.6	6	4	IV.3, IV.4, IV.5, IV.6
28	4	0	—	5	1	IV.7
29	3	1	IV.9	5	2	IV.8, IV.9
30	4	3	IV.10, IV.11, IV.12	8	4	IV.10, IV.11, IV.12, IV.13
31	5	0	—	8	0	—
32	5	0	—	8	0	—
33	5	1	IV.14	8	1	IV.14
34	6	1	IV.15	8	1	IV.15

Часть IV написана с таким расчетом, чтобы предоставить некоторую свободу действия при составлении планов ее проработки. Исторически и практически атомные массы частиц измерялись при одновременном наличии электрического и магнитного полей (раздел 30.7). Однако раздел 28.1 знакомит учащихся с измерениями массы по времени пролета частиц, что позволяет исследовать эти фунда-

ментальные атомные характеристики без изучения магнитного поля. Это открывает возможность полностью опустить гл. 30 и 31, но в этом случае с разделом 31.9 надо ознакомиться путем домашнего чтения.

В случае необходимости можно пожертвовать и гл. 29. В ней рассматриваются электрические цепи, так что ее изъятие не может серьезно помешать пониманию атомов. Если же будет принято решение опустить гл. 29 и изучить гл. 30 и 31, то задачи в этих двух главах нужно выбирать осторожно, поскольку во многих из них речь идет об электрических цепях.

По всей части IV встречаются определенные разделы, которые можно либо опустить, либо изучать в сокращенном виде, чтобы сэкономить время без серьезного ущерба для целостности курса. Такие разделы в планах по отдельным главам заключены в квадратные скобки.

Итак, значительной экономии времени можно добиться, если исключить материал от конца гл. 28 до раздела 31.9. Опустив к тому же разделы, взятые в планах в скобки, можно довести время изучения части IV приблизительно до 6 недель.

Если же со временем дела обстоят совсем плохо, то можно ограничиться: 1) чтением гл. 26; 2) изучением разделов 27.1 и 27.2, 27.7, 28.1, 28.6, 31.9; 3) переходом к гл. 32—34. Остается только выразить надежду, что к столь крайней мере никому обращаться не придется.

ГЛАВА

26 КАЧЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Настоящая глава естественным образом делится на две половины: 1) введение в электрические явления, в котором показывается, что существуют заряды двух видов и что эти заряды можно обнаружить; 2) качественное исследование носителей зарядов в газах, растворах и металлах, которое подводит к выводу о том, что в природе заряд переносится внутриатомными электрическими частицами.

Глава 26 — это *вводная* глава. Охваченные в ней темы можно было бы в большинстве случаев значительно расширить, как это и делается в очередных главах. И хотя весьма важно, чтобы учащиеся поняли главу, выходить за рамки изложенного в ней материала путем углубления и внесения количественных характеристик не рекомендуется. Если останется время, то его лучше использовать так, как об этом говорится ниже.

Эта глава закладывает фундамент под корпускулярное представление об электричестве, что принципиально важно для понимания строения атома. Глава начинается с электростатики, но скоро выходит за рамки классической теории и знакомит с движением зарядов. Таким образом, учащиеся рано получают представление об электрических токах. Ток изображается как движение электрических частиц, а не «жидкости» времен Вениамина Франклина или даже не в свете более поздних идей Фарадея и Максвелла.

Учащийся должен начать рассматривать электричество как субатомное явление, ион как своеобразный осколок атома, а электрон как один из кирпичиков, из которых состоит материя. Ему предстоит понять то, что электроны имеются во всех веществах, что они все одинаковы и что при их переходе из одного вещества в другое химический состав последних не меняется (как, например, при термоэлектронной эмиссии).

Краткое содержание главы 26

Разделы 26.1—26.7. В этих разделах говорится о разделении зарядов, силах, действующих между зарядами, и способах обнаружения зарядов.

Предметы можно наэлектризовать, если их потереть друг о друга. Между одноименными зарядами действуют силы отталкивания, а разноименные заряды притягиваются друг к другу. Электрически нейтральное вещество изображается как содержащее одинаковое количество положительных и отрицательных зарядов, а заряженные предметы как содержащие избыточный заряд того или иного знака.

В некоторых телах (проводниках) заряды движутся свободно, тогда как в других (изоляторах) свободно передвигаться заряды не могут. Описывается простой электроскоп — прибор для обнаружения присутствия зарядов. Заряды

можно разделить посредством электростатической индукции. Благодаря индукции между заряженным и незаряженным предметами (будь последние проводником или изолятором) возникают силы притяжения. Электроскопы можно экранировать, сделать более чувствительными и проградуировать. Учащихся знакомят с батареей — устройством химического действия, разделяющим заряды.

Разделы 26.8—26.13. В остальной части главы расширяется представление об электричестве как о частицах, из которых образуется атом, посредством ознакомления с переносом заряда в разных средах — газах, растворах, металлах.

Газы, которые обычно представляют собой хорошие изоляторы, можно сделать проводниками, подвергнув их воздействию ионизующего излучения. Отсюда делается вывод о том, что составные части молекулы могут нести на себе заряд, хотя сама молекула нейтральна. Описывается кратко конденсационная камера — устройство, которое позволяет «видеть» траектории заряженных частиц. Некоторые растворы не требуют воздействия постороннего ионизующего средства, чтобы стать проводниками, потому что ионы образуются путем самопроизвольного распада молекул растворенного вещества.

Проводимость в металлах — это еще один пример переноса заряда. В проводящих металлах носители заряда обладают способностью к свободному передвижению внутри металла, но, поскольку они обычно не улетают из проводящего материала, складывается впечатление о том, что носители заряда в металлах представляют собой своеобразный сохраняющийся в металлах электронный газ. Термоэлектронная эмиссия позволяет нарисовать картину движения частиц, которые можно испарить.

Знакомство с термоэлектронной эмиссией и силами действия между одноименными и разноименными зарядами позволяет рассказать об основных частях электронной лампы и катодного осциллографа (электроннолучевой трубки). Принципы действия этих приборов используются в последующих главах.

Одна из причин, почему учащиеся знакомятся в данной главе с движением как положительных, так и отрицательных носителей, заключается в стремлении способствовать формированию такого взгляда на электрический ток, который не ограничивается только движением электронов. Этот общий подход к электрическому току — перенос заряда в веществе, а не только в металлах — способствует конкретизации и пониманию определений, которые даются дальше (в разделе 28.6, где электрическое поле определяется как сила, а разность электрических потенциалов как совершенная работа, приходящаяся на единичный положительный заряд). Именно так обстоят дела в мире газов, жидкостей и полупроводников, а также и проводящих металлов. В газах и растворах перемещаются как положительные, так и отрицательные заряды; в проводящих металлах — отрицательные заряды, а в некоторых полупроводниках — положительные дырки.

План изучения главы 26

Разделы 26.1—26.6 разумно выделить как одно задание для домашнего чтения. Перед этим хорошо было бы поставить опыты IV.1 и IV.2. Провести оба этих опыта можно за одно лабораторное занятие. Обсуждение в классе следует развернуть вокруг этих опытов, дополненных отдельными демонстрациями, как это рекомендуется дальше. В процессе проработки этих разделов нужно решить ряд задач из раздела ДКЛ. Полезно ряд задач, например 12, 15 или 22, решить в классе.

В зависимости от объема выполненной лабораторной работы и числа вспомогательных демонстраций для проработки этих разделов потребуется от двух до трех занятий.

Второе задание по данной главе могло бы состоять из разделов 26.7—26.10 с несколькими задачами на повторение. Классная проработка данного задания могла бы включать такие демонстрации, как разряд электроскопа через большое сопротивление, перенос заряда ионизованным газом и траектории в конденсационной камере.

Еще одно задание для домашнего чтения — разделы 26.11—26.13. Проработка этих разделов могла бы охватить тему о проводимости жидкостей.

В табл. 2 приведены возможные варианты плана изучения настоящей главы, согласованные с общим планом проработки всей части IV, приведенным в табл. 1 на стр. 284. Разделы, которые не нуждаются в особенно тщательной проработке или которые можно опустить, заключены в квадратные скобки.

ТАБЛИЦА 2

Глава 26	10-недельный план изучения части IV			15-недельный план изучения части IV		
Разделы	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты	В классе	В лаборатории, часы	Опыты
26.1—26.6	1	1	IV.2	3	1	IV.1, IV.2
26.7—26.9, [26.10]	0,5	0	—	1	0	—
26.11—26.13	0,5	0	—	1	0	—

Дополнительные материалы к главе 26

Лаборатория. В опыте IV.1 (*Наэлектризованные тела*) для качественной характеристики статических зарядов используются пластмассовые полоски, натираемые шерстью и хлопчатобумажной тканью. Опыт можно провести дома. Если же учащиеся знакомы с поведением заряженных предметов, то опыт можно провести как демонстрацию. Включить этот опыт в домашнее задание — видимо, будет означать его проведение с минимальной затратой времени до того, как приступить к проработке гл. 26.

Опыт IV.2 *(Электростатическая индукция)* знакомит учащихся с разделением зарядов и проводимостью как следствием индукции. По возможности проведение этого опыта должно совпадать с проработкой раздела 26.5.

Рекомендации по этим опытам приводятся на стр. 488—492 Руководства. При обсуждении опытов нужно дать советы о том, как следует проводить эксперименты по статическому электричеству в условиях влажности.

Домашние, классные и лабораторные задания. На стр. 300 даны ответы и решения, а также таблица классификации задач по степени трудности.

Демонстрации. Если в вашем плане найдется время, то при проработке данной главы целесообразно предусмотреть хорошие демонстрации электростати-

ческих явлений. При изложении материала главы и обсуждении демонстраций нужно сосредоточить внимание на описательной стороне наблюдаемых эффектов — существовании и движении зарядов и сил, действующих между зарядами. Их количественное описание — дело последующей проработки. Советы по демонстрациям даются ниже. Особенно полезны демонстрации с электроскопом и конденсационной камерой.

26.1. Притяжение и отталкивание между наэлектризованными предметами

26.2. Электрические силы, действующие между составными частями вещества

Цель. 1) Показать, что существуют электрические заряды двух видов; 2) охарактеризовать с качественной стороны силы, действующие между заряженными предметами; 3) показать, что силы, действующие между заряженными предметами, можно объяснить, если предположить, что в атомах существуют заряженные частицы.

Методические указания. Излагаемые в первых двух разделах представления относятся к описательным. Их основой является построение простой

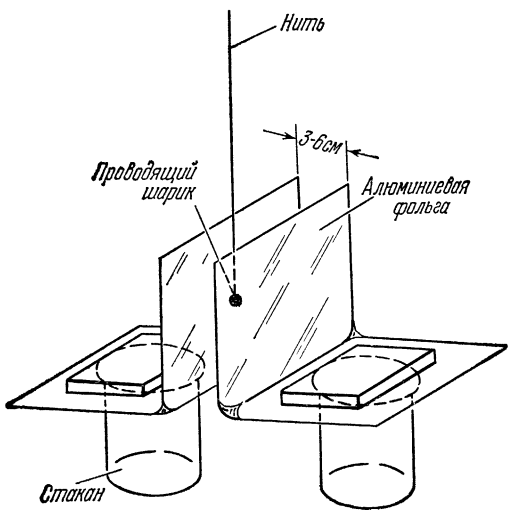


Рис. 1.

модели из непосредственных наблюдений. По опыту многих преподавателей, сочетание лабораторной работы с классным обсуждением представляет собой надежный способ проработки подобного материала. Если найдется время, то, прежде чем приступить к данному материалу, проведите опыт IV.1.

Чтобы проиллюстрировать перенос заряда проводником, поставьте следующий демонстрационный опыт. Подвесьте проводящий шарик из сердцевины бузины или квадратик алюминиевой фольги посередине между двумя пластинами из алюминиевой фольги размером 15×30 см, как это показано на рис. 1. Зарядите пластины зарядами противоположного знака, воспользовавшись заряженными пластмассовым и стеклянным стержнями. Приведите шарик в соприкосновение с одной из пластин. Он зарядится, оттолкнется и перелетит к другой пластине. Здесь он

утратит свой заряд, приобретет заряд противоположного знака и опять оттолкнется от пластины. Шарик станет перелетать от пластины к пластине, пока они не разрядятся почти полностью. (Если проведению демонстрации мешает утечка зарядов, то проложите между фольгой и стаканом полиэтиленовую дощечку, а нить, на которой висит шарик, прикрепите клейкой лентой к куску полиэтилена.)

В условиях большой влажности пластины можно зарядить от конденсатора емкостью 500 пФ на 20—30 кВ, который в свою очередь заряжают от индукционной катушки Румкорфа. Для этого быстро прикоснитесь клеммами заряженного конденсатора одновременно к обеим пластинам (конденсатор держите при этом за изолирующий корпус).

Во вводной части гл. 26 на стр. 7 говорится: «Некоторые другие силы оказываются во много раз больше» (чем гравитационные силы). В нашей повседневной (макроскопической) практике мы лишь случайно сталкиваемся с тем фактом, что электрические силы превосходят гравитационные. Это объясняется просто тем, что гравитационная масса представляет собой «заряд», связанный с гравитационной силой, и что здесь, на Земле, мы находимся очень близко к гигантскому «гравитационному заряду», каким является сама Земля. Таким образом, действующие между нами и Землей силы имеют большую величину. Между тем гравитационное притяжение между самими предметами обыкновенных размеров ничтожно по сравнению с электрическими силами, которые могут возникнуть между ними.

Далее рассмотрите (в микроскопическом масштабе) силы, действующие между существующими в атоме частицами. Если бы удалось все положительные и отрицательные частицы, заключающиеся в булавочной головке, развести на противоположные стороны этой головки, то возникшая между ними сила притяжения составила бы около 10^{21} Н — поистине чудовищная величина. Почти точное равенство положительных и отрицательных частиц в веществе делает эти потенциально гигантские силы кажущимися довольно малыми. Количественные характеристики можно отнести на более позднее время, но нельзя считать, что электрические силы слабы и сравнительно маловажны.

В тексте Учебника рекомендуется использовать обычный стеклянный стержень, натираемый шелком, для получения положительного заряда и пластмассовый стержень, натираемый мехом, для получения отрицательного заряда.

Учащиеся могут поинтересоваться, почему заряды одинакового знака не могут притягиваться друг к другу, а заряды противоположного знака отталкиваться. Единственный ответ на такой вопрос гласит, что так не бывает. Между тем, если обратиться к гравитационным силам, то одна масса только притягивает другую. Никому и никогда не доводилось видеть такую массу, которая отталкивала бы другую. Тем не менее иногда полезно порассуждать о возможности существования такой массы. Умозрительно подобная масса «иного знака» должна была бы отталкиваться известной нам массой. Еще одна возможность заключается в такой, например, своеобразной непоследовательности: *А* отталкивает *Б*, *А* отталкивает *В*, но *Б* притягивает *В*. С природой такое случается. Важно подчеркнуть, что все заряды подразделяются на две категории — положительные и отрицательные. Таков экспериментальный факт. Логически рассуждая, нельзя доказать, что вещи должны быть такими-то и такими-то. Вещи надо принимать такими, какими их создала сама природа.

26.3. Изоляторы и проводники

Цель. Привить мысль о том, что в одних материалах электрический заряд перетекает легко, а в других встречает сопротивление.

Содержание. а) Металл отличается от пластмассы по способности электрического заряда перетекать внутри материала.

б) В металле заряды перемещаются свободно, а в пластмассе такой свободы перемещения у них нет.

в) Металл и подобные ему материалы называют проводниками, а пластмассу и подобные ей материалы — изоляторами.

Методические указания. В процессе лабораторной работы или демонстрации можно поставить и разобрать опыт, показанный на рис. 26.2. Из других материалов можно испытать свернутую из бумаги трубку или деревянный брусок.

В результате проработки данного раздела учащиеся должны уяснить только то, что в одних материалах заряженные частицы перемещаются свободно, а в других — нет.

(Необязательно излагать обстоятельно то, о чем говорится ниже, но упомянуть об этом мимоходом все же целесообразно.) Подобно многим другим категоричным определениям утверждать, что все материалы подразделяются на проводники и изоляторы,— значит чрезмерно упростить дело. Металлы проводят электричество на много порядков лучше, чем все неметаллы. Отдельные материалы, вроде полистирола, представляют собой столь хорошие изоляторы, что месяцами сохраняют на себе сообщенные им заряды. Некоторые же материалы, подобные германию и кремнию (из них изготовляют транзисторы) или окиси меди, проводят электричество лучше, чем пластмассы, но гораздо хуже, чем металлы. Их называют полупроводниками. Солевые растворы — плохие проводники, но они проводят электричество на много порядков лучше, чем пластмассы. Газы иногда бывают почти идеальными изоляторами, а иногда проводят электричество не хуже металлов. Зависит это от степени ионизации. Приведем для примера данные об электропроводности некоторых материалов (в А/(В·м)):

Серебро	$61{,}4 \cdot 10^6$	металлы
Сталь	$5 \cdot 10^6$	
Уголь	$2{,}8 \cdot 10^4$	полупроводники
CuO	10^{-3}	
Бакелит	10^{-10}	изоляторы
Стекло	10^{-12}	
Каучук	10^{-16}	
Полистирол	10^{-18}	

Механизмы проводимости довольно сложны. Мы просто полагаем, что электроны движутся в металлах, однако количественный подход к тому, как легко они движутся, труден. Еще более сложный случай представляют собой полупроводники, ионизованные растворы и газы. Как правило, рассматривать эти механизмы в классе на данной стадии не следует. (Основные механизмы проводимости кратко описываются в разделах 26.9—26.12.)

26.4. Несколько опытов с электроскопом

26.5. Электростатическая индукция

26.6. Усовершенствованные электроскопы и электрометры

Цель. 1) Ознакомить с электроскопом — прибором для обнаружения электрического заряда и определения его знака; 2) дать представление о том, что электрический заряд можно перенести посредством индукции, а также прямым касанием; 3) показать, что явления индукции можно понять с помощью простой модели заряженных частиц внутри атомов; 4) показать, как можно усовершенствовать электроскоп, чтобы он годился для точных количественных измерений.

Методические указания. Электростатическая индукция — вот важное новое явление, которое учащиеся должны понять из данных разделов. Устройство электроскопов довольно простое и подразумевает такие принципы действия, которые уже были изложены раньше.

Наряду с лабораторным опытом IV.2 одной из лучших возможностей изучения этого материала является показ различных примеров заряжения предметов посредством проводимости и индукции и анализ учащимися эффектов изменения

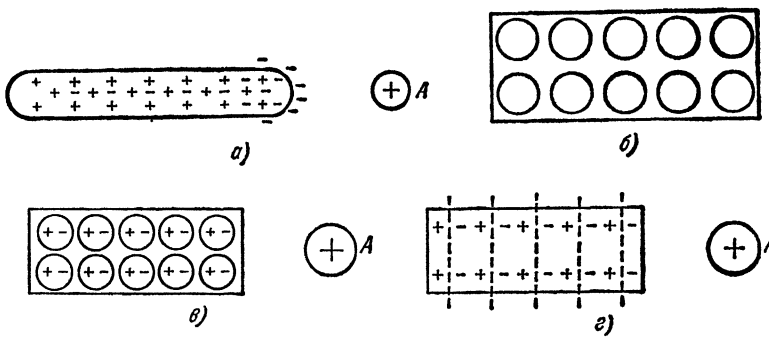


Рис. 2.

распределения зарядов и результирующих сил. В дополнение к этому полезно решить в классе задачи 12—16.

Как отмечалось в тексте Учебника, сила притяжения между заряженным предметом и нейтральным проводником несколько больше силы притяжения между заряженным предметом и нейтральным изолятором. Эта деталь не столь важна, чтобы ее рассматривать на классном занятии, но если она заинтересует учащихся и возбудит вопросы, то отвечать на них нужно следующим образом.

Подобная разница невелика и для некоторых изоляторов даже не обнаружима. Но все-таки почему заряды совершенно свободно перемещаются в проводнике и лишены всякой возможности переместиться на сколь-либо значительное расстояние в изоляторе?

Без трудоемких математических выкладок разрешить этот парадокс можно только в общих чертах. Рассмотрим продолговатый проводник около положительно заряженного предмета A. Положительный заряд притягивает к концу проводника отрицательный заряд (рис. 2, *а*). И хотя заряды совершенно свободно перемещаются по проводнику, отрицательный заряд, накопившийся у ближайшего к положительному заряду конца проводника, имеет ограниченную величину, так как отрицательные заряды отталкивают друг друга и не могут собраться полностью на одном конце. На самом деле отрицательный заряд на конце проводника

никогда не может превзойти по величине притягивающий положительный заряд A. Следовательно, величина индуцированного на проводнике заряда лимитируется не легкостью его перемещения в проводнике, а другими причинами.

Рассмотрим теперь изолятор, состоящий из нейтральных атомов (рис. 2, *б*). Если поднести к нему положительный заряд A, то отрицательные заряды во всех атомах сместятся совсем незначительно к положительному заряду (рис. 2, *в*). В итоге в средней части изолятора возникнет нейтральная область, на конце, ближайшем к внешнему положительному заряду, окажется результирующий отрицательный заряд, а на противоположном конце — результирующий положительный заряд. Легко усмотреть то, что заряжение двух концов изолятора сводится к перегруппировке соседних парных зарядов «+» и «—», при этом самые наружные заряды на концах не затрагиваются (рис. 2, *г*). Теперь мы убеждаемся в том, что одна концевая поверхность изолятора является преимущественно положительной, а другая преимущественно отрицательной. В промежутке между ними все заряды сгруппированы нейтральными парами. Таким образом, «диэлектрическая поляризация» изолятора эквивалентна перемещению зарядов в проводниках.

Металлический кожух электроскопа выполняет две функции, которые до некоторой степени связаны друг с другом. Первое его назначение — экранирование. Заряд, находящийся внутри (проводящего) кожуха, не может испытывать воздействия зарядов, размещающихся вне кожуха. Подобное экранирование совершенно, если кожух полностью прикрывает заряд, но оно остается весьма хорошим и тогда, когда в кожухе имеются довольно большие отверстия. Даже если на кожухе разместить заряды, сила, действующая на заряд, находящийся внутри кожуха, остается равной нулю.

Как указывалось в Учебнике, полное уничтожение действия зарядов вне экрана достигается только в случае сил, убывающих обратно пропорционально квадрату расстояния. Доказать этот закон нетрудно, но если решено это сделать, то выводить его лучше не в данный момент, а после прохождения гл. 27. Вывод закона приведен в Приложении 1 на стр. 520.

Второе назначение металлического кожуха — повышение воспроизводимости измерений с помощью электроскопа. Пока стоит задача по обнаружению зарядов при натирании стержней, металлический кожух дает мало выигрыша. Но если заряды сообщаются электроскопу батареей, то у электроскопа должно быть что-то такое, с чем можно соединять оба полюса батареи. В принципе один полюс батареи можно было бы соединять со стержнем электроскопа, а другой с землей, но тогда показания станут изменяться в зависимости от расстояния, отделяющего листочки электроскопа от земли. Металлический кожух дает постоянную точку отсчета, с которой можно соединить другой полюс батареи, благодаря чему достигается воспроизводимость показаний.

1. Действие защиты электроскопа можно проиллюстрировать на двух электроскопах, сделанных из кофейных банок. Один из них оставьте в обычном виде, а из другого выньте соломинку вместе с подвеской и закрепите ее с помощью опорного бюреточного зажима в стеклянной банке так, как это показано на рис. 3.

Поводите заряженным пластмассовым стержнем вокруг электроскопа в стеклянной банке, позволив классу убедиться в том, что соломинка перемещается всякий раз, когда стержень подводят к любому месту стеклянной банки. После этого поводите стержнем вокруг электроскопа в кофейной банке и покажите классу,

что соломинка приходит в движение только тогда, когда стержень касается изолированного вывода электроскопа.

2. Для того чтобы проиллюстрировать разделение заряда, нужно иметь два электроскопа с горизонтальной металлической пластиной, присоединенной к изолированному выводу электроскопа.

На пластину одного электроскопа наклейте электротехническую виниловую ленту шириной 2—5 см. Держа электроскоп одной рукой, отдерите ленту, не касаясь пластины. Электроскоп зарядится. Не касаясь нижней стороны ленты и пластины второго электроскопа, наклейте на последнюю ленту. Второй электроскоп покажет, что лента тоже заряжена. Если теперь привести в соприкосновение друг с другом две пластины, на одной из которых все еще наклеена лента, то электроскопы разрядятся.

Этот демонстрационный опыт показывает, что разделение заряда происходит вследствие соприкосновения. Он доказывает также, что всякий раз, когда определенное количество заряда одного знака отводится из предмета, такое же количество заряда противоположного знака остается на предмете.

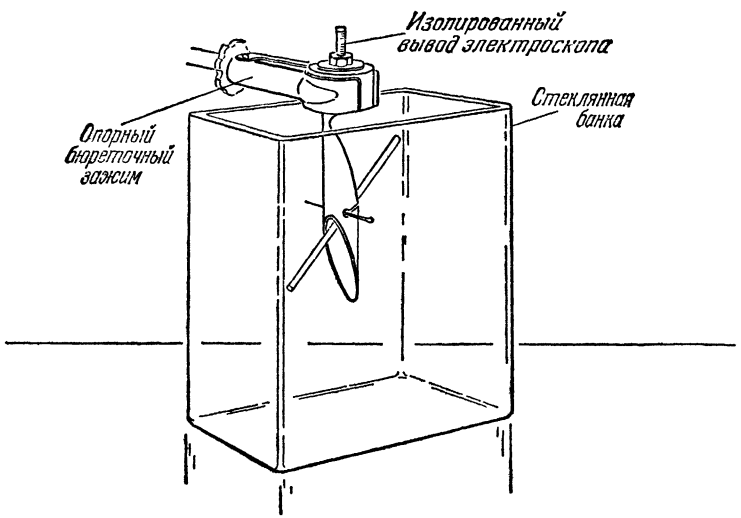


Рис. 3.

3. Учащиеся часто полагают, что электростатические явления мало связаны с электрическим током. Данный демонстрационный опыт покажет, что заряд с заряженного пластмассового стержня способен перетекать подобно току от батареи.

Сначала покажите, что скорость разряжения электроскопа ничтожно мала. Затем с помощью зажимов соедините изолированный вывод электроскопа с его кожухом куском магнитофонной ленты длиной 8—25 см. Если электроскоп заряжен, то по ленте потечет ток, разряжающий электроскоп за 5—100 секунд в зависимости от величины начального заряда, длины ленты и влажности.

4. Для иллюстрации переноса заряда ионизованным газом поднесите горящую свечу или спичку к выводу заряженного электроскопа. Положительные и

отрицательные ионы, являющиеся продуктом химических реакций под действием высокой температуры в пламени, быстро разряжают электроскоп.

Мощный источник радиоактивного излучения тоже ионизует газ и заряжает электроскоп. Однако с достаточно сильными источниками, способными быстро разрядить электроскоп, иметь дело опасно. Если к открытой камере электроскопа поднести светящийся циферблат часов, то электроскоп разрядится приблизительно за 10 минут. (Защитное стекло часов нужно снять, поскольку оно задерживает поток альфа-частиц, на долю которых приходится значительная часть всей ионизации.)

5. Несложно провести демонстрационный опыт, иллюстрирующий действие индуцированных зарядов, подведя заряженную палочку к тонкой струйке воды. Глазную пипетку вводят в резиновую пробку с центральным отверстием и укрепляют на штативе с кольцом там, чтобы вода вытекала из сосуда тонкой струйкой через пипетку. Если теперь к такой струйке поднести заряженную палочку, то струйка отклонится, а оторвавшиеся от нее капельки станут совершать круговые движения вокруг струйки.

26.7. Батареи (гальванические элементы)

26.8. Электрические токи

Цель. Ознакомить с батареей — устройством, которое разделяет заряды химическим путем. Показать, что присоединение полюсов батареи к внешней цепи приводит к возникновению электрического тока, т. е. перетеканию заряда по цепи.

Методические указания. Посмотрите рекомендации по составлению учебного плана, изложенные на стр. 288. На обсуждение в классе требуется очень мало времени и выделять его для этой цели нужно экономно, потому что затянувшееся классное обсуждение может привести к отступлению от намеченных планов.

Поскольку батарея представляет собой весьма сложное устройство, вдаваться в пространные рассуждения о механизме ее действия нецелесообразно. Нужно просто рассказать о том, что батарея представляет собой устройство, в котором отрицательный заряд перетекает от ее положительного полюса к отрицательному. (На самом деле в батарее могут перетекать и положительные заряды.) Батарея переносит заряд до тех пор, пока отталкивание между накопившимся на ее полюсах зарядом и всяким другим дополнительным зарядом того же знака не уравновесит действие химических сил. Тогда процесс переноса заряда приостанавливается. Если какой-то посторонний процесс снимает отрицательный заряд с одного полюса батареи и переводит его обратно на другой, то батарея возобновит перенос заряда, пока не истощится полностью.

Учащимся надо дать понять, что *батарея не создает заряд, она просто перемещает его*. Батарея никогда не накапливает заряд в чистом виде. Употребление терминов «заряжать» и «разряжать» в приложении к батареям надо признать весьма неудачным, потому что они как бы предполагают накапливание заряда в батарее. На самом деле накапливается химическая энергия, которую можно направить на совершение работы, т. е. заставить заряд перемещаться против электрических сил, порождающих рекомбинирование положительных и отрицательных зарядов. После того как учащиеся изучат следующую главу, полезно обратить их внимание на такое, например, обстоятельство. В течение одного срока службы без зарядки

типичный автомобильный аккумулятор переносит $100 \cdot 60 \cdot 60 = 360\ 000$ кулонов (Кл) электричества. Сила, действующая между зарядами в 360 000 Кл, помещенными на расстоянии около 30 см друг от друга, должна быть примерно равна 10^{22}Н (10^{18} тонн). Ясно, что такой чистый «заряд» не мог существовать в аккумуляторе. Около такого заряда нельзя было бы причесаться пластмассовой расческой. Нельзя было бы также поставить два таких аккумулятора рядом друг с другом!

Нередко учащиеся интересуются, с какой скоростью перетекают заряды. Дать им на этот вопрос исчерпывающий ответ довольно сложно, но некоторые количественные заключения по этому поводу все же можно сделать. Отдельные заряды обычно движутся с весьма малой скоростью, перемещаясь в типичной электрической цепи на несколько сантиметров или даже меньше за 1 с (раздел 29.4). В то же время в проводниках заряды перераспределяются весьма быстро: по надежным оценкам со скоростью порядка скорости света. Если, скажем, перенести с кусочка меха заряд на один из концов металлического стержня, то заряд подобной величины распределится более или менее равномерно по стержню за такое время, которое потребуется для распространения света на длину стержня, иногда на несколько большую (быть может, стократную) длину, но никогда не меньше. Между тем отдельные заряды с меха в действительности движутся по металлу не с такой скоростью. Один из зарядов толкает такой же заряд в металле, последний толкает своего соседа и т. д., так что *электрическое действие* передается со скоростью, которая близка к скорости света.

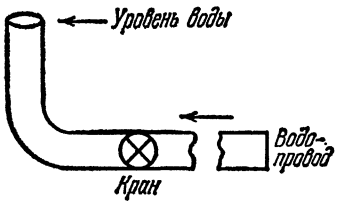


Рис. 4.

Один из способов разъяснения этого момента заключается в рассмотрении следующего примера. Возьмем водопровод с открытым концом, наполненный водой и перекрытый краном (рис. 4).

Через открытый край трубы, если кран открыть, потечет вода. По расходу воды и размеру трубы можно вычислить скорость истечения воды из трубы по формуле

$$\frac{\text{объем}}{\text{секунда}} = \text{площадь сечения} \cdot \text{скорость потока}.$$

Теперь можно задать следующий вопрос: Сколько времени пройдет с момента открытия крана до начала переливания воды через край трубы? Если труба была сначала пустой, то ответ прост:

$$\text{промежуток времени} = \frac{\text{длина трубы}}{\text{скорость потока}}.$$

Иной ответ получится, если труба уже была заполнена водой. Между моментом открытия крана и началом переливания воды через край проходит какое-то время. Оно равно тому промежутку времени, который требуется для распространения волны давления от крана до открытого конца трубопровода. Это время зависит по сути дела от длины трубопровода и скорости распространения звука в воде.

В случае течения электрических зарядов по проводнику проводник уже «заполнен зарядами» (свободными электронами). Таким образом, поступление зарядов в проводник с одного конца почти немедленно сопровождается их вытеканием из другого. Запаздывание по времени определяется скоростью распространения электрического импульса по металлу. А эта скорость есть величина порядка скорости распространения света. Отдельный заряд никогда не перемещается со скоростью, близкой к скорости света; в типичном случае «скорость дрейфа» составляет около 0,02 см/с.

26.9. Проводимость газов. Ионизация

26.10. Конденсационная камера

26.11. Проводимость растворов

26.12. Электроны в металлах

26.13. Диоды. Электронные пушки. Осциллографы

Цель. Кратко обсудить механизмы переноса заряда (электрического тока) в газах, жидкостях и твердых телах и в общих чертах изложить доводы в пользу таких механизмов. Показать, что наряду с проводимостью в металлах существует много способов переноса электрического заряда, что есть разные носители заряда и разные механизмы проводимости. Все это излагается с целью дальнейшего ознакомления учащихся с атомистическим представлением об электричестве.

Методические указания. Посмотрите рекомендации по составлению учебного плана на стр.288. При проработке этих разделов у учащихся может возникнуть столько вопросов, сколько пожелает преподаватель, но при этом нельзя забывать о том плане, который он сам составил. Если ограничиться материалом, содержащимся в Учебнике, то тем самым будет обеспечена такая глубина проработки, которая достаточна учащимся для усвоения дальнейшего материала по курсу. По всей вероятности, наиболее важным материалом, к которому учащимся придется возвращаться в дальнейшем, надо считать изложенные в разделе 26.12 данные, свидетельствующие о переносе заряда в металлах сравнительно свободными электронами.

Главное назначение разделов 26.9, 26.11 и 26.12 заключается в том, чтобы дополнительно обосновать сделанный раньше вывод о том, что заряд можно представлять себе как кирпичик, входящий в состав атомов. В разделах 26.10 и 26.13 дается представление о приборах, которые нам понадобятся в дальнейшем.

В разделе 26.9 рассматривается перенос заряда в газах. Такой перенос осуществляется только тогда, когда газ *ионизован*. Это означает, что существуют атомы или части молекул (ионы), один из которых несут положительный, а другие отрицательный заряды. Само собой разумеется, что строение атома будет подробнее изучаться в последующих главах.

В разделе 26.10 показывается, как можно «увидеть» траектории заряженных частиц в газах. Само устройство конденсационной камеры особой важности не имеет. Этот раздел, вероятно, лучше всего прорабатывать как своеобразное дополнение к тому или иному демонстрационному опыту. В вашей лаборатории нужно

иметь простую конденсационную камеру. Используйте ее для показа при проработке данного раздела.

Раздел 26.11 предназначен для ознакомления с носителями тока в жидкостях, которые тоже представляют собой ионы. Тот факт, что на металлы можно электрохимически нанести покрытие из раствора, служит подтверждением подобного представления. При проработке данного раздела в классе преподавателю потребуются некоторые знания по химии. Учащиеся могут поинтересоваться, например, почему натрий не осаждается в виде покрытия из раствора поваренной соли подобно тому, как медь осаждается из раствора медного купороса? (На такой вопрос можно было ответить так: металлический натрий вступает во взаимодействие с водой по мере его образования. При этом образуются газообразный водород и гидроокись натрия, тогда как металлическая медь с водой не взаимодействует.)

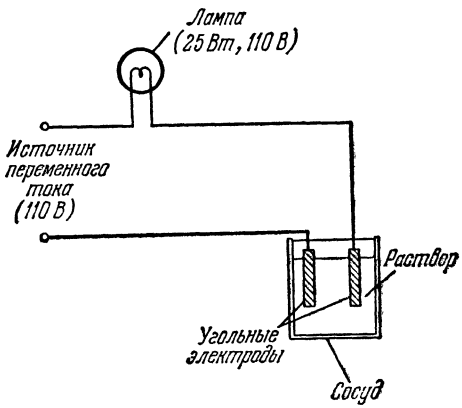


Рис. 5.

В разделе 26.12 дается представление о проводимости в металлах как следствии свободного передвижения заряженных частиц внутри металлов. Термоэлектронная эмиссия показывает, что такими свободно движущимися частицами, несущими отрицательный заряд, в металлах являются электроны. Подчеркивается, что отрицательные частицы (электроны) одинаковы во всех материалах, поскольку перенос электронов из одного металла в другой не изменяет химического состава двух таких металлов.

Описанные в разделе 26.13 приборы не требуют обширных объяснений, но принцип их действия должен быть ясен, так как они являются основой многих экспериментов, рассматриваемых в последующих главах.

Цель демонстрационных опытов, относящихся к разделу 26.11, показать, что одни жидкости содержат ионы и являются проводниками, тогда как другие представляют собой изоляторы.

В большей части этих демонстрационных опытов используется показанная на рис. 5 установка, включаемая в сеть переменного тока напряжением 110 В. Чтобы устранить опасность электрического удара, угольные электроды можно закрепить в паре отверстий, просверленных в деревянной доске, которая опирается на сосуд. Стержни можно закрепить, обмотав их сверху клейкой лентой. Если для опыта берутся небольшие дуговые электроды, то их закрепление можно осуществить посредством батарейных зажимов. Удобнее всего воспользоваться угольными элек-

тродами из сухих элементов, так как сверху они снабжены винтовыми клеммами, но такие электроды требуют перед использованием тщательной очистки.

Для каждого демонстрационного опыта требуются чистый сосуд, чистая вода и чистые электроды. Если вода из водопровода содержит много растворенных солей, нужно взять дистиллированную воду.

Заполните сосуд водой. Лампа не засветится. Докажите исправность цепи, закоротив ее *изолированной* отверткой. (Разъясните учащимся, что в воде обычно содержатся растворенные соли и полагаться на ее изоляционную способность не следует.)

Подсыпьте в воду немного сахарного песка и перемешайте ее стеклянной палочкой. Лампа не засветится, потому что сахар при растворении не образует ионов.

Ополосните электроды чистой водой и добавляйте в воду каплями серную кислоту из пипетки или стеклянного капилляра, пока лампа не засветится.

Добавки поваренной соли к воде тоже приводят к образованию ионов, делающих воду проводящим раствором. Годится и уксусная кислота, но она покажет только незначительную проводимость, едва достаточную для того, чтобы лампа засветилась слабо. Объясняется это слабой ионизацией.

Если угольные электроды погрузить в насыщенный раствор медного купороса и подключить к источнику постоянного тока небольшого напряжения, то на катоде отложится слой меди. Переключение полюсов приведет к растворению меди на одном электроде и ее осаждению на другом. Это позволяет сделать вывод о том, что ионы меди заряжены положительно.

Не исключено, что отдельным учащимся захочется нанести металлическое покрытие из раствора на тот или иной предмет. Как правило, такая затея кончается безуспешно, если не соблюсти особых мер предосторожности.

Для классов с достаточной подготовкой по химии можно продемонстрировать более сложный опыт. Приготовьте в присутствии учащихся растворы гидроокиси бария и серной кислоты: для этого растворите 6,4 г $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$ в 200 см³ воды, чтобы получить раствор с концентрацией 0,2. Смешайте 5,6 см³ концентрированной серной кислоты с 1000 см³ воды, что даст раствор с концентрацией около 0,2.

Используя ту же самую установку, что и прежде, заполните сосуд наполовину водой и подайте на него напряжение 110 В. Долейте в него 10 см³ раствора гидроокиси бария и перемешайте. Лампа засветится.

Затем подлейте с перемешиванием около 10 см³ раствора серной кислоты. Начнется выпадение сернокислого бария, оставляющее все меньше и меньше ионов для переноса заряда. В конце концов лампа потухнет.

Если теперь подлить еще серной кислоты, то лампа вновь засветится. Потушить ее сейчас можно осторожным приливанием раствора гидроокиси бария. Процесс можно повторять сколько угодно раз, пока у вас хватит терпения и запасов серной кислоты и гидроокиси бария.

Не проводите демонстрационных опытов, если у вас нет избыточного времени. Во всяком случае не пытайтесь объяснять все подробности того, как соли, основания и кислоты ионизуют и проводят ток. На данной стадии, разумеется, единственная цель проведения демонстрационных опытов состоит в том, чтобы показать, что в некоторых растворах содержатся подвижные заряженные частицы, делающие такие растворы проводящими.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам

В табл. 3 задачи распределены по степени их трудности и по разделам, к которым они относятся. Отдельно выделены задачи, предназначенные для разбора в классе. Задачи, рекомендуемые в первую очередь, отмечены значком # *).

ТАБЛИЦА 3

Разделы	Со звездочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
26.1—26.3	1, 2, 4				
26.4	5, 8, 9	3	6	7	3, 7
26.5—26.7	10, 11	13, 16	12#, 14, 15		12#
26.8—26.11	17—19		20		20
26.12, 26.13	21, 24		22#, 23		

Краткие ответы

1*. Знаки зарядов таких стержней одинаковы, но неизвестно, какие они — положительные или отрицательные.

2*. Отрицательный.

4*. Необязательно. Снятие любого числа отрицательных зарядов с незаряженного предмета равноценно сообщению ему результирующего положительного заряда.

5*. а) Заряд утекает по металлическому стержню и телу человека. б) Изолировать стержень от тела.

8*. На листочках электроскопа заряд того же знака, что и на его шарике.

9*. а) Ничего; б) ничего; в) оба электроскопа полностью разрядятся.

10*. Положительный.

11*. Отрицательный.

17*. Листочки электроскопа сблизятся.

18*. В хорошем вакууме нет почти никаких заряженных ионов, способных снять заряд с листочков электроскопа.

19*. Положительный.

21*. Листочки электроскопа сблизятся.

24*. Положительный.

Ответы с указаниями и решениями

3. Если эта задача задается и разбирается до знакомства с электроскопом (в разделе 26.4), то уместно поставить первый вопрос. Если же она решается после изучения электроскопа, то можно задать и второй вопрос.

а) Если пластмассовый стержень подвесить на легкой шелковой нити, то он притянется к шерсти, обнаружив наличие заряда на ней.

б) Если тот или иной предмет заряжают натиранием, то заряды одного знака переходят при этом с натираемого предмета на натирающий материал. Таким образом, натиравшийся предмет остается с недостатком зарядов этого знака, тогда как у натиравшего материала такие заряды окажутся в избытке. Если пластмассовый стержень наэлектризовали, натирая его шерстью, то шерсть наэлектризовалась благодаря ее трению о пластмассовый стержень. Заряд на шерсти имеет заряд, противоположный по знаку заряду на пластмассовом стержне.

---

*) Напомним, что звездочкой отмечены задачи, которые предназначены для проверки усвоения текста Учебника соответствующего раздела (указанного в условии задачи). *(Прим. ред.)*

Если электроскоп был заряжен пластмассовым стержнем, то подведение шерсти к шарику электроскопа сопровождается спаданием листочков электроскопа, потому что шерсть несет на себе заряд противоположного знака.

6. Поскольку обычно как самолет, так и бензозаправочная машина снабжены резиновыми шинами, оба они изолированы от земли. К тому же площадки обслуживания, как правило, имеют бетонное или асфальтовое покрытие, которое не всегда хорошо проводит заряды к земле. Поэтому самолет и бензозаправочная машина могут оставаться заряженными, несмотря на меры по их заземлению. Проволочное подсоединение гарантирует устранение любого неравновесия зарядов до открытия баков.

Когда течет бензин, поток жидкости может зарядиться от трения о стенки наконечника. Заливаемый в самолет заряженный бензин зарядит его зарядом, противоположным по знаку заряду наконечника. Если не обеспечить надежной электрической цепи между самолетом и наконечником, по которой смогут нейтрализоваться образовавшиеся на них заряды противоположных знаков, может проскочить искра, способная поджечь взрывоопасную смесь бензина с воздухом с катастрофическими последствиями.

7. а) Если вы уже несете заряд, ваше прикосновение к незаряженному электроскопу зарядит его. После этого электроскоп несет заряд того же знака, что и вы. Затем вы разряжаете себя прикосновением к земле или к заземленному предмету. Электроскоп используется как приспособление для хранения заряда, который вы несли. Характер заряда на электроскопе можно определить следующим путем.

Натрите пластмассовый стержень шерстью. По определению, изложенному в разделе 26.1, стержень приобрел отрицательный заряд. Если при подведении

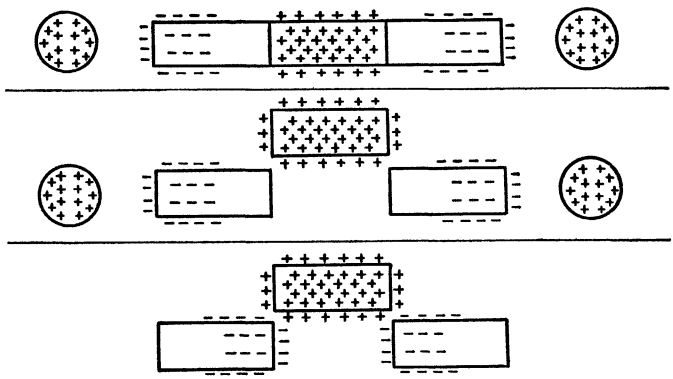


Рис. 6.

такого пластмассового стержня к шарику электроскопа его листочки разойдутся еще больше, то заряд на электроскопе имеет тот же знак, что и заряд стержня, т. е. отрицательный. Значит, вы были заряжены отрицательно. Если же листочки электроскопа сблизятся, то заряд электроскопа имеет заряд, противоположный по знаку заряду пластмассового стержня. В этом случае вы несли положительный заряд.

Когда же вы берете не пластмассовый стержень и шерсть, а стеклянную палочку и шелк, то стекло приобретает положительный заряд, так что анализ в данном случае проводят с учетом этой особенности.

Накопление заряда на том или ином предмете возможно только в том случае, когда он хорошо изолирован от окружающих предметов. Во влажную погоду изолятор может стать проводником из-за гигроскопичности имеющихся на его поверхности загрязнений и поглощения влаги из воздуха, который позволяет заряду утекать с него по мере накопления. Этим объясняются иногда отказы автомобильного зажигания в сырую погоду. Изолирующий фарфор свеч зажигания

покрыт с поверхности пленкой грязи, которая в сырую погоду лучше проводит электричество, чем в погожий день. Искра «утекает» по увлажненной поверхностной пленке загрязнений свечи, вместо того, чтобы проскочить в ее зазоре.

б) Если вы несете на себе значительный заряд и коснетесь металлического предмета, то заряд переносится в виде искры. Так как металл является проводником, заряд быстро распределяется по всему проводнику.

Если же вы коснетесь изолятора, заряд лишен возможности перетекать по изолятору. Поэтому возможная незначительная утечка заряда не приводит к возникновению искры.

в) Встречаются несовершенные изоляторы, представляющие собой в действительности просто очень плохие проводники. В момент прикосновения к дереву оно, будучи изолятором, воспринимает от вас заряд не столь быстро, чтобы возникла искра. Если к тому же ваш контакт с деревом длится достаточно долго,то заряд, который вы несли, медленно утечет с вас. Теперь при вашем соприкосновении с дверной ручкой не может возникнуть искры, так как на вас уже не осталось заряда.

12. а) Как показано на рис. 6, если три бруска раздвинуть, то на двух наружных из них окажутся отрицательные заряды, тогда как средний брусок будет заряжен положительно.

б) Предполагается, что с самого начала совокупность трех соприкасающихся друг с другом металлических брусков электрически нейтральна. Два положительно заряженных предмета перераспределяют заряд. В металлах свободно перемещается отрицательный заряд. Поэтому средний брусок теряет отрицательный заряд, переходящий к двум наружным брускам. Следовательно, когда бруски раздвигают, средний из них остается с избыточным положительным зарядом. Восстановлению нейтрального распределения мешают изоляционные способности воздуха и крышки стола. Если воздух ионизован или если крышка стола обладает слабой проводимостью, то начнется медленный переход к нейтральному состоянию.

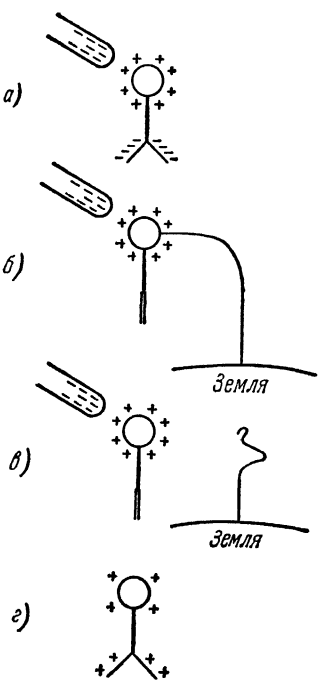


Рис. 7.

(В исходном состоянии силы, создаваемые двумя положительными зарядами, уравновешиваются не во всех точках, потому что сила от каждого заряда убывает с удалением от них. Точная зависимость между силой и расстоянием, известная под названием закона Кулона, рассматривается в следующей главе.)

13. а) Зарядите пластмассовый стержень, потерев его куском хлопчатобумажной ткани. Затем зарядите один из двух шаров либо прикосновением к нему заряженного пластмассового стержня, либо еще лучше через индукцию. Уберите пластмассовый стержень и приведите два шара в соприкосновение друг с другом. Поскольку они имеют одинаковую величину, заряд поделится между ними поровну.

б) Это нужно сделать через индукцию. Приведите в соприкосновение друг с другом два металлических шара. Зарядите пластмассовый стержень и подведите его, избегая соприкосновения, к одному из шаров. После этого разведите шары и уберите стержень. Дальний от стержня шар окажется несущим заряд того же знака, что и сам пластмассовый стержень. Заряд на ближнем шаре будет иметь противоположный знак. Поскольку первоначально два шара не были заряжены, разведенные заряды одинаковы по величине.

14. Первый шаг состоит в том, чтобы достать отрицательно заряженный предмет. Натерев пластмассовый стержень мехом, вы решите эту задачу.

Если отрицательно заряженный предмет подвести к электроскопу, то он оттолкнет отрицательный заряд из шарика, оставив его заряженным положительно. Этот отрицательный заряд переместится к листочкам электроскопа, заставив их раздвинуться (рис. 7, *а*). Если теперь отрицательно заряженный предмет отвести от электроскопа, то заряды на электроскопе перераспределятся ровным образом, что приведет к сближению листочков.

Чтобы предотвратить подобную рекомбинацию зарядов, сделаем электроскоп проводником гораздо бóльших размеров (обычно подсоединением заземляющей проволоки к шарику электроскопа). Отрицательные заряды удалятся от отрицательно заряженного предмета так далеко, как это позволит действие прочих сил. Иными словами, они потекут через проволоку в землю (рис. 7,*б*). Учащиеся могут задать вопрос, почему теперь отрицательные заряды не поступают к листочкам электроскопа, как прежде. И в данном случае сохраняется тенденция к приближению отрицательных зарядов к листочкам, но проявляется она теперь гораздо слабее, потому что подавляющая доля отрицательных зарядов отводится в землю, которая несравненно больше листочков.

Уберите проволоку с шарика электроскопа, пока отрицательно заряженный предмет остается на своем месте (рис. 7, *в*). Положительные заряды тем самым окажутся в ловушке, так что достаточно теперь убрать отрицательно заряженный предмет, чтобы электроскоп остался заряженным положительно (рис. 7, *г*).

15. Трудности, сопряженные с проверкой данного предположения, проистекают из малой величины заряда. Если из опытов со статическим электричеством вспомнить о том, что заряженные проводники ощетиниваются налипшими ворсинками или что на заряженном мехе каждый волосок распрямляется и встает, а весь кусок меха вздыбливается, то надо ожидать аналогичного проявления действия заряда Земли, когда он обладает достаточной величиной. Высохшая трава и солома на полях должны не лежать горизонтально, а приподняться и занять вертикальное положение. То же самое надо сказать и об оброненных шпильках, иголках или кусочках проволоки.

Но поскольку заряд Земли мал, его действие проявляется слабо. В действительности никакого такого проявления не обнаруживается. Можно ли тогда отсюда сделать вывод, что Земля не несет никакого заряда. Нет нельзя. Единственное заключение, которое можно сделать, сводится к тому, что подобные наблюдения

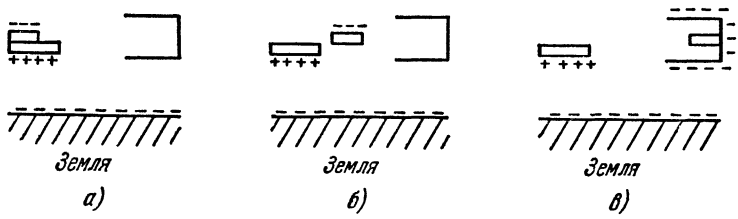


Рис. 8.

слишком малочувствительны для обнаружения какого бы то ни было проявления действия заряда Земли. Но в наших возможностях создать более чувствительные детекторы.

Одна такая возможность заключается в том, чтобы установить иголку на тончайшем опорном подшипнике, позволяющем ей свободно поворачиваться в вертикальной плоскости. Если такую иголку тщательно уравновесить, заключив ее в металлический корпус, то она не будет испытывать никакого действия крутящего момента, когда ее извлекут из такого корпуса, если Земля не несет электрического заряда. Если же у Земли есть какой-то заряд, то иголка станет проявлять тенденцию к тому, чтобы занять вертикальное положение. Однако трудность состоит в том, что если не соблюсти мер крайней предосторожности, то легко спутать проявление действия заряда Земли с каким-нибудь другим эффектом или создать ложный эффект более сильного проявления.

Есть и еще одна возможность. Нужно изобрести такое устройство, которое позволило бы многократно усиливать проявление того или иного действия. Один способ добиться этого состоит в том, чтобы поместить два проводника, соприкасающихся друг с другом, один над другим (рис. 8, *а*). Если Земля обладает электрическим зарядом, то такие проводники зарядятся благодаря индукции. Затем можно разобщить их, поместив один из них в открытую консервную банку (рис. 8, *б*). Когда заряженный проводник, помещенный внутри консервной банки, приводят в соприкосновение с этой банкой (рис. 8, *в*), то весь заряд, который нес проводник, перейдет наружу на банку, вместо того, чтобы поделиться между ними. Многократным повторением опыта можно заставить полый проводник служить аккумулятором заряда или своеобразным усилителем. Наша открытая консервная банка не может считаться идеальной замкнутой оболочкой, но она отвечает своему назначению, позволяя поставить в классе убедительный демонстрационный опыт.

16. Зарядите электроскоп от предмета, который несет на себе положительный заряд. Подведите заряженный таким образом электроскоп к одному из зажимов батареи. Если листочки электроскопа разойдутся еще больше, то этот зажим положительный (см. рис. 26.8). Если же листочки будут сближаться, то он соединен с отрицательным полюсом батареи, так что другой ее зажим будет положительным.

20. Решить данную задачу можно, предположив, что ион меди в растворе всегда несет одинаковый заряд. Однако даже без обстоятельных знаний об образовании ионов можно утверждать, что в среднем с соответствующим зарядом иона всегда связана определенная масса меди. Поскольку число участвующих в процессе отдельных ионов очень велико, отклонения от среднего значения будут пренебрежимо малыми. Такую взаимосвязь можно выразить следующим образом:

перенесенный заряд равен константе, умноженной на массу осажденной меди; отсюда

ежесекундно переносимый заряд равен константе, умноженной на массу ежесекундно осаждаемой меди.

Следовательно, электрический ток, текущий в процессе электролиза, пропорционален скорости осаждения меди на отрицательном электроде. Поэтому это дает нам возможность использовать электролитическую ячейку в качестве токоизмеряющего устройства, если ее включить в электрическую цепь и затем измерить массу меди M, осажденной за промежуток времени t. Протекающий в электрической цепи ток будет пропорционален отношению M/t.

22. Предположим, что размеры частиц пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием 10 см. Это позволит нам считать, что n частиц собраны в одной точке, отстоящей от рассматриваемой частицы на расстоянии 10 см.

а) Испытываемая этой частицей сила отталкивания равна произведению единичной силы на n, т. е.

$$F = n \cdot 3 \cdot 10^{-10} \text{ Н}.$$

б) Если $F = 6 \cdot 10^{-6}$ Н, то число частиц

$$n = F/(3 \cdot 10^{-10}) = (6 \cdot 10^{-6})/(3 \cdot 10^{-10}) = 2 \cdot 10^{4}.$$

Не исключено, что учащиеся обратят внимание на возможность распределения совокупности n частиц по окружности радиусом 10 см; тогда все частицы будут отстоять от находящейся в центре рассматриваемой частицы на расстоянии 10 см. Но и в таком случае все излагавшиеся при рассмотрении данной задачи рассуждения останутся в силе, но только теперь ответ для п. а) может иметь любое значение от нуля (в случае равномерного распределения частиц по окружности) до $3 \cdot 10^{-10}$ Н (все частицы собраны с одной стороны окружности).

23. а) Предположим опять, что размеры частиц пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием 10 см. Тогда совокупность частиц можно считать сосредоточенной в одной точке, отстоящей от рассматриваемой положительной частицы на расстоянии 10 см. В данном случае все силы совпадают по направлению с ли-

нией, соединяющей данную совокупность частиц с рассматриваемой частицей. Векторное сложение сил сводится к простому алгебраическому суммированию:

сила отталкивания равна $3P \cdot 10^{-10}$ Н;
сила притяжения равна $3M \cdot 10^{-10}$ Н;
результирующая сила отталкивания равна $(3P—3M) \cdot 10^{-10}$ Н.

б) Если P меньше M, то налицо сила притяжения. Если измеренная результирующая сила равна $6 \cdot 10^{-6}$ Н, то

$$3\,(P—M) \cdot 10^{-10} = 6 \cdot 10^{-6}, \text{ т. е. } P—M = 2 \cdot 10^{4}.$$

Такое единственное измерение позволяет определить только разность между P и M. Мы не в состоянии сказать что-нибудь определенное о раздельных значениях P и M.

Примечание к задачам 22 и 23. При решении этих задач предполагалось, что заряд есть линейно аддитивная величина. Это предположение неявно подразумевается в разделе 26.2. Обстоятельно обсудить справедливость подобного предположения можно лишь после того, как будет проработана следующая глава. Но если кто-нибудь из учащихся выразит сомнение по этому вопросу, то его следует скорее поощрить, нежели оговорить в неуместности подобного скептицизма.

Когда в гл. 27 речь пойдет о данном моменте, уместно вернуться к этому предположению, отметив,что оно было принято без экспериментального подтверждения. Если, по мнению учащихся, после этого никакого дополнительного обоснования не потребуется, то можно будет отметить, что в случае сил, действующих между постоянными магнитами, результирующая сила зависит не только от числа магнитов, но и от их взаимного расположения.

ГЛАВА

27 ЗАКОН КУЛОНА И ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД

В главе 27 под электростатику подводится фундамент количественных соотношений. Рассмотрение опыта Кулона, приводящего к закону Кулона, и распределения зарядов и сил между зарядами придает представлению о заряде количественный характер. Существование естественной элементарной единицы заряда устанавливается посредством анализа опыта Милликена с масляными каплями. Затем вариант этого опыта, проведенного в более крупном масштабе, дает нам возможность определить электрическую силу, действующую между двумя элементарными электрическими зарядами. Это равнозначно нахождению постоянной k в законе Кулона. Отсюда появляется возможность измерения зарядов обычной величины числом элементарных электрических зарядов. Наконец, в этой главе обсуждаются опыты, позволяющие определить число элементарных электрических зарядов на таких частицах, как электрон, альфа-частица и протон.

Краткое содержание главы 27

Разделы 27.1—27.3. Рассматривается закон Кулона, согласно которому сила взаимодействия между двумя точечными зарядами изменяется прямо пропорционально произведению зарядов и обратно пропорционально квадрату расстояния между ними: $F=kQq/r^2$. В разделе 27.3 дается представление о векторной сумме сил и излагается предварительное понятие электрического поля вокруг совокупности зарядов как картины сил, действующих на движущийся заряд в различных точках пространства.

Разделы 27.4, 27.5. Подробно описывается опыт Милликена с масляными каплями, иллюстрирующий влияние электрической силы, земного притяжения и трения воздуха на движение небольших электрических зарядов. Устанавливается, что небольшие заряженные тела движутся в пространстве электрических микромикровесов только с некоторыми определенными скоростями, отношения которых друг к другу всегда представляют собой целые числа и никогда дробные. Отсюда следует вывод, что электрические заряды существуют только как совокупности природных элементарных зарядов.

Разделы 27.6, 27.7. Показывается, как можно измерить силу взаимодействия между двумя элементарными зарядами при сочетании опыта Кулона с крупномасштабным опытом Милликена. Этим путем определяется постоянная k в законе Кулона. Она равна силе взаимодействия двух элементарных зарядов, отстоящих друг от друга на расстоянии 1 м. Показывается, что электрическая сила между двумя элементарными зарядами в 10^{36} раз больше гравитационного притяжения между двумя атомами водорода. Вместе с тем в разделе 27.6 показывается, что при подсоединении батареи к пластинам сила действия на электрический заряд между пластинами обратно пропорциональна расстоянию между пластинами и прямо пропорциональна числу последовательно соединенных батарей.

Разделы 27.8, 27.9. Отмечается, что в природе соблюдается закон сохранения заряда: тот заряд, который теряет одно тело, приобретает другое тело. Описываются опыты, показывающие, что электрон несет один элементарный заряд, а альфа-частица — два таких заряда.

План изучения главы 27

В табл. 4 приведены возможные варианты плана изучения настоящей главы, согласующиеся с вариантами общего плана проработки части IV, которые рекомендованы в табл. 1 на стр. 284. Разделы, которые можно сократить или опустить, заключены в квадратные скобки. Опыты, которые должны предшествовать классной проработке соответствующего материала, отмечены звездочкой.

ТАБЛИЦА 4

Глава 27	10-недельный план изучения части IV			15-недельный план изучения части IV		
Разделы	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты
27.1—27.3	1,5	1	IV.3 *	2,5	2	IV.3 *, IV.4
27.4, 27.5	1,5	2	IV.5, IV.6	1,5	2	IV.5, IV.6
27.6, 27.7	1	0	—	2	0	—
[27.8, 27.9]	0	0	—	0	0	—

Дополнительные материалы к главе 27

Лаборатория. Опыт IV.3 (*Сила взаимодействия между двумя заряженными шариками*) относится к первоочередным и может служить введением к гл. 27. Опыт проводится на двух шариках из сердцевины бузины; исследование взаимосвязи между электрической силой и расстоянием между шариками приводит к выводу, что такая сила обратно пропорциональна квадрату этого расстояния. Кстати сказать, при проведении этого опыта используется изящный экспериментальный прием — измерение перемещений по теням,— ибо непосредственное прикосновение измерительного прибора к заряженным телам привело бы к потере заряда.

Опыт IV.4 (*Сложение электрических сил*) раскрывает векторную природу электрических сил. Проводить его нужно, если это будет решено, после опыта IV.3.

Опыт IV.5 (*Движущая сила и конечная скорость*) рекомендуется ставить в связи с разделом 27.4 как предварительный и предшествующий главному опыту IV.6. Тем самым учащиеся уяснят пропорциональность между установившейся скоростью и движущей силой, на которой основаны измерения в опыте Милликена.

Опыт IV.6 (*Опыт Милликена*) представляет учащимся возможность самим открыть существование элементарного заряда. Этому опыту должен предшествовать опыт IV.5. Его постановка увязывается с проработкой раздела 27.5. Открытие существования природного единичного заряда явилось одним из фундаментальных и важнейших открытий физики в XX веке. Данный опыт позволяет учащимся самим заново открыть этот важный факт.

Домашние, классные и лабораторные задания. Ответы, решения, а также таблицу, в которой задачи классифицируются по их трудности, см. на стр. 322.

27.1. Зависимость силы от расстояния

Цель. Показать, что электрические силы отталкивания или притяжения убывают с увеличением расстояния между зарядами. Сила обратно пропорциональна квадрату этого расстояния.

Методические указания. Материал данного раздела важен для понимания макроскопических и атомных электрических сил. Учащиеся, которые забавлялись заряженной палочкой и подвешенным на нити шариком из сердцевины бузины, должны хорошо осознавать, что электрическая сила обратно пропорциональна квадрату удаления. Они уже видели, как быстро нарастает сила с уменьшением расстояния между шариком и палочкой.

Можно считать, что учащиеся овладели основными положениями данного раздела, если они в состоянии решить, например, такую задачу: Кусочек меха и небольшой пластмассовый предмет притягиваются друг к другу с силой 10^{-2} Н, когда они отстоят друг от друга на расстоянии 10 см. С какой силой они притягиваются друг к другу, когда расстояние между ними равно 200 см? 50 см? 1 см? 0,1 см?

Подобная задача может привести двоякую пользу.

Во-первых, ответ 100 Н, находимый из закона обратной пропорциональности квадрату расстояния, дает общее представление о том, что такие силы становятся огромными на малых расстояниях и что функция $1/r^2$ весьма быстро убывает.

Во-вторых, большинство учащихся быстро смекнут, что невозможно весь мех подвести на такое малое расстояние к заряженному предмету. Это возражение можно использовать как вступительную часть к формированию представления о «точечных» зарядах (см. сноску на стр. 33 и Приложение 2 на стр. 522).

Не забудьте упомянуть о том, что учащиеся уже не первый раз встречаются с убыванием силы по закону обратной пропорциональности квадрату расстояния. В этом отношении электрические силы можно уподобить земному притяжению. Вы не сможете обосновать эту параллель, но упомянуть о ней нужно. Учащиеся сталкивались с зависимостью обратной пропорциональности квадрату расстояния также при рассмотрении силы света в части II.

И хотя сами методы измерения имеют на данной стадии второстепенное значение, в Учебнике отмечается, что показатель степени в законе изменения электрической силы известен с точностью $r^{-2{,}000\,000\,000}$, т.е. его отклонение от числа 2 не превышает $1/10^9$. На самом деле это весьма высокая точность! Более проницательные учащиеся сразу же поймут, что такой точности прямым измерением сил добиться нельзя. (Метод определения показателя степени рассматривается в Приложении 1 на стр. 520.)

Материал, излагаемый в разделе 27.1, по-видимому, не потребует особых разъяснений. В опыте Кулона мы изучаем непосредственно не силу между *отдельными* электрическими частицами, а силу между *телами*, состоящими из частиц. То, что мы наблюдаем, умозрительно приписывается действию сил между частицами.

Мы исходим при этом из предположения, что целое не может быть больше (или меньше) суммы его частей. Последний абзац данного раздела на стр. 33 относится к материалам того рода, о которых учащиеся обычно говорят «Понятно», не отдавая при этом отчета в его логическом значении. Такую тонкость способен уяснить далеко не каждый учащийся.

27.2. Электрический заряд и электрическая сила

Цель. Установить количественную связь между силой и зарядом. Зависимость от величины заряда и обратная пропорциональность квадрату расстояния дают силу Кулона $F=kQq/r^2$.

Методические указания. Разъяснение того, что конкретный «заряд» можно разделить пополам, предопределяет представление о законе сохранения заряда, о чем явно упоминается только в разделе 27.8. Если незаряженный металлический шар привести в соприкосновение с таким же заряженным шаром, то по соображениям симметрии мы утверждаем лишь только то, что результирующие заряды на двух шарах одинаковы, но не то, что сумма этих двух зарядов равна исходному заряду. В Учебнике довольно обстоятельно говорилось об *электрических* частицах, так что с этой точки зрения сохранение заряда сводится почти полностью к сохранению электрических частиц, с чем учащиеся легко согласятся. Однако особо не следует на это обращать внимание класса, если кто-нибудь из учащихся не задаст соответствующего вопроса.

Понятие о разделении заряда важно для уяснения проводимого в Учебнике вывода закона Кулона. Понимание учащимися разделения заряда можно проверить, задав вопрос о том, как можно разделить заряд на три части. Расположение, подобное  , должно считаться удовлетворительным ответом, тогда как расположение вида  должно рассматриваться как неудовлетворительный ответ. В физике и особенно в электричестве важно не забывать о симметрии. Во втором из расположений не все три шара равноценны. В действительности учащиеся должны уже знать, что два наружных шара получат больший заряд. Деление заряда на четвертушки можно осуществить двукратным делением пополам. Расположение  , или в вершинах четырехгранника приемлемо, а подобное  .нет.

Классную проработку закона Кулона, по-видимому, лучше всего проводить путем решения задач, подобных следующей.

Два заряженных металлических шара *А* и *Б* отталкивают друг друга с силой *F* ньютонов.

а) Предположим, что заряд на *одном* из шаров уменьшен наполовину. Имеет ли значение, какой из шаров выбрать для этого? (Нет.) Какой будет сила отталкивания между шарами, если заряд на одном из шаров уменьшить наполовину? ($^1/_2F$.)

б) Какой станет сила между шарами, если заряд на обоих шарах сделать вдвое меньше прежнего? ($^1/_4F$.)

в) Если заряд на обоих шарах сделать вдвое меньше прежнего, то насколько надо сблизить шары, чтобы восстановить прежнюю силу? (На половину.)

На данном этапе для решения в классе хорошо выбрать задачу 5 из раздела ДКЛ. Можно также решить задачи 2 и 6.

27.3. Поля электрических сил

Цель. Ознакомить с понятием *поле*, служащим для описания картины электрических сил вокруг зарядов при различном их размещении. Количественно электрические поля изучаются в гл. 28. Данный раздел преследует простую цель дать понимание о распределении в пространстве силовых линий вокруг заряженных предметов.

Содержание. а) Термин *поле* употребляется для описания картины электрических сил, действующих на заряд, который движется в заданной области пространства.

б) Электрические силы складываются векторно.

в) Электрическое поле над заряженной плоскостью однородно по величине и направлению.

г) Картины электрических полей можно наблюдать, взяв для этого небольшие видимые частицы, например семена травы.

д) Линии электрического поля всегда перпендикулярны к поверхности проводника.

е) Электрическое поле между заряженными параллельными металлическими пластинами однородно.

Методические указания. В данном разделе преждевременно определять поле как силу, действующую на единичный заряд. Это делается в гл. 28. Здесь же ставится задача дать первое представление о поле как картине электрических сил вокруг зарядов различного размещения, картине в трехмерном пространстве, картине сил разной величины и разного направления.

Если у вас ощущается недостаток времени, то данный раздел вместе с двумя предшествующими можно пройти за два-три занятия. В таком случае вам следует остановиться на следующих моментах: 1) общая природа и картина полей; 2) достоверность представления о том, что электрическая сила, которая действует на заряженную частицу, помещенную между параллельными заряженными металлическими пластинами, повсюду одинакова.

Если же у вас достаточно времени для более обстоятельного изучения электричества, рассмотрите векторное сложение электрических сил (эта тема может оказаться трудной для усвоения учащимися) и некоторые особенности картин линий поля: их перпендикулярность к поверхностям проводников и т. п.

Различные типы электрических полей можно проиллюстрировать с помощью демонстрационного опыта, описанного на стр. 38. Источником электрического поля служит неоновый трансформатор на 4—15 кВ с надежной защитой. Выходное напряжение можно регулировать с помощью автотрансформатора, подключенного, как показано на рис. 9. Для демонстрации картин в большинстве случаев достаточно напряжения 4 кВ.

К выводам высокого напряжения присоединяют по реостату на 20 МОм, а сами выводы обвертывают несколькими слоями виниловой изоляционной ленты. Реостаты должны быть мощностью не ниже 1 Вт (это позволит избежать опасности короткого замыкания). Целесообразно трансформатор и защитные реостаты заключить в ящик, а изолированные провода высокого напряжения вывести наружу через отверстия в ящике.

Семена травы должны быть достаточно мелкими, чтобы поле без труда выстраивало их (длина семян не должна превосходить приблизительно 3 мм).

Налейте в стеклянную ванночку или в пластмассовую кювету слой четыреххлористого углерода толщиной около 5—15 мм. Высыпьте неполную чайную ложку семян травы на поверхность жидкости (из расчета около одной полной чайной ложки на каждые 500 см² площади).

Поскольку четыреххлористый углерод быстро испаряется, а его пары ядовиты, поверх него надо налить небольшой слой другой жидкости. Для этого годится минеральное масло, удельный вес которого меньше, чем у четыреххлористого углерода и семян травы. Масло надо наливать медленно по мешалке, погруженной в жидкость, с тем чтобы оно ровно растекалось по четыреххлористому углероду и образовало слой толщиной 5—15 мм. Масло оттеснит семена к краям сосуда. Легким перемешиванием их надо равномерно распределить по поверхности жидкости в сосуде.

Погрузите два электрода в жидкость так, чтобы их концы были ниже поверхности раздела между двумя жидкостями. Электроды могут держаться в сосуде самостоятельно, но их лучше укрепить на деревянной раме или с помощью жесткой проволоки, которая соединяет их с трансформатором.

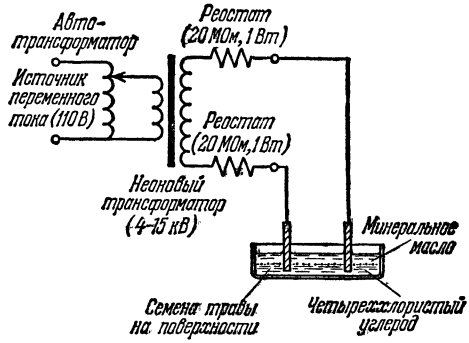


Рис. 9.

Если в качестве пары электродов выбраны параллельные пластины или концентрические цилиндры, то вам надлежит разместить непосредственно под сосудом такие же электроды и подсоединить их к источнику питания. Это устранит искажающее влияние краевого поля у концов электродов в ванне на ожидаемую картину поля. Один из двух электродов нужно заземлить (наружный, если используются цилиндрические электроды).

Освещение мощным источником света может привести к вскипанию жидкости. Поэтому лучше пользоваться боковым освещением от флуоресцентных ламп с непосредственным наблюдением на темном фоне.

Картины поля можно спроецировать в виде теней на потолок, но тогда плохо видны электроды, особенно если под сосудом установлены вспомогательные электроды.

В данном разделе понятия *электрическое поле* или *электрическое силовое поле* употребляются для описания картины сил, действующих на подвижный заряд в области вокруг каких-то других зарядов, которые считаются неподвижными. *Поле* предполагается существующим в пространстве вокруг неподвижных зарядов даже при отсутствии подвижного, или пробного (зондирующего) заряда. Отдельные учащиеся возражали против употребления слова *поле* в такой связи. Они задают такой вопрос: «Разве недостаточно слов электрическая сила?» Причина обращения к слову *поле* в данном случае имеет преимущественно лексическое происхождение. На более высоком уровне знаний легче описывать поля, чем силы, а при определенных обстоятельствах поля «стряхивают с себя» заряды и представляются как бы самостоятельно существующими. Эти представления столь важны в современной физике, что знакомство с такой лексикой целесообразно на самой ранней ступени, хотя сам курс можно излагать без обращения к этому понятию.

В данном разделе преждевременно давать точное определение поля. В некотором смысле оно постепенно встраивается в здание приобретаемых учащимися знаний по мере прохождения курса. Такое встраивание уже начинается с прохождения закона Кулона (умышленно без всякого упоминания об этом). Работа в данном направлении проводится дальше в опыте Милликена. В гл. 28 поля рассматриваются формально. В ней мы стремимся просто к составлению общей качественной характеристики поля, рисуя картину пространственной анизотропии электрических сил, показывающую, по каким траекториям станут двигаться заряженные предметы в пространстве других заряженных тел.

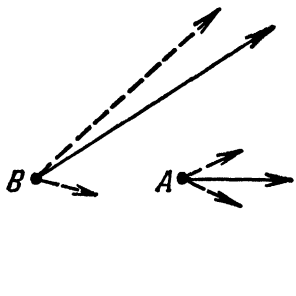


Рис. 10.

Понятие *поле* довольно трудно для усвоения учащимися. В данный момент оно употребляется, чтобы охарактеризовать «электрическое состояние» в некоторой области пространства. Пожалуй, начинать знакомство с полем лучше всего на таком конкретном примере.

Пусть у нас имеются два заряда, равных по величине, но противоположных по знаку, которые размещены, как показано на рис. 10. Спрашивается, какую силу испытает на себе небольшой положительный заряд, находящийся в точке A. Даже без помощи подробного векторного сложения видно, что положительный заряд отталкивает его кверху и вправо, а отрицательный притягивает книзу и тоже вправо. Сила отталкивания кверху уравновешивается силой притяжения книзу, так что остается только сила, толкающая заряд вправо, как это показано на рисунке. Если положительный заряд находится в точке B, то сила отталкивания положительным зарядом кверху и вправо гораздо больше. Поэтому результирующую силу можно изобразить в показанном на рисунке виде. Нужно нарисовать «векторы» еще в нескольких точках, пока не выявится картина сил, действующих на небольшой положительный заряд *повсюду* (рис. 11). Полученная *картина* сил называется электрическим силовым полем или даже просто электрическим полем вокруг положительного и отрицательного зарядов.

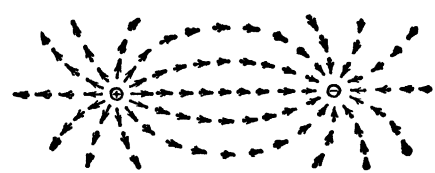


Рис. 11.

При прохождении остальной части курса многократно рассматриваются электрические поля только двух конфигураций: 1) поле, создаваемое точечным зарядом (с ним учащиеся хорошо ознакомились в разделах 27.1 и 27.2); 2) поле между двумя параллельными проводящими пластинами с противоположными зарядами. Без овладения дифференциальным исчислением трудно добиться большего, чем это сделано на стр. 40, в доказательстве однородности поля над пластинами или между пластинами. Не забудьте отослать учащихся к рис. 27.9, *д* как к экспериментальному доказательству подобной однородности.

Если учащиеся проработали сложение векторов, то после этого им можно задать для домашнего решения задачи 3 и 4.

Дополнительные задачи. А. Три одинаковых металлических шара несут на себе одинаковые электрические заряды. Если их расположить по прямой на расстоянии 10 см друг от друга, то электрическая сила, действующая на левый шар, равна 10^{-5} Н.

а) В каком направлении действует эта сила?

б) Какова величина электрической силы, действующей на правый шар?

в) Какова результирующая электрическая сила, действующая на средний шаг?

Сблизим теперь два шара вплотную и поместим их на расстоянии 10 см от третьего.

г) Какая электрическая сила действует теперь на третий шар?

Ответ.

а) Налево.

б) 10^{-5}Н направо.

в) Нуль.

г) В первом случае, как известно, средний заряд действует на левый с силой $kQ^2/10^2$, а правый с силой $kQ^2/20^2$; следовательно, $kQ^2/10^2+kQ^2/20^2=10^{-5}$ Н; отсюда $kQ^2/10^2={}^4/_5\cdot 10^{-5}$ Н. Во втором случае (при новом расположении) сила равна $2\cdot kQ^2/10^2={}^8/_5\cdot 10^{-5}$ Н.

Б. Две параллельные металлические пластины заряжены зарядами противоположного знака. Небольшой точечный заряд помещен в средней плоскости между пластинами и испытывает, как установлено экспериментально, действие электрической силы $2\cdot 10^{-8}$ Н. Какая сила станет действовать на ту же самую частицу, если ее переместить так, что она окажется к одной пластине в два раза ближе, чем к другой?

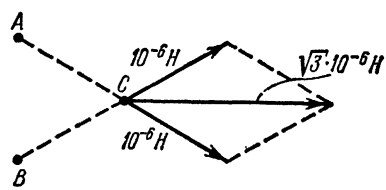


Рис. 12.

Ответ. $2\cdot 10^{-8}$ Н. Силовое поле между пластинами однородно, благодаря чему сила одинакова повсюду между пластинами, если, разумеется, частица не находится близко к краю пластин.

В. Два одинаковых точечных заряда A и B находятся на расстоянии 1 см друг от друга. Они отталкивают друг друга с силой 10^{-6} Н. Третий такой же заряд C движется по перпендикуляру к линии, соединяющей A и B, от средней ее точки. Найти силу, действующую на третий заряд C:

а) когда заряд C находится непосредственно между A и B;

б) когда C удален от A и B на 1 см;

в) когда C удален от A и B на 10 см?

Ответ. а) Когда C находится непосредственно между A и B, силы уравновешиваются и результирующая сила равна нулю.

б) Когда C отстоит от A и B на расстоянии 1 см, сила действия A и B на C равна 10^{-6} Н. Однако в данном случае эффективна только составляющая по перпендикуляру к линии AB, благодаря чему результирующая сила на C равна $2\cdot 10^{-6}$ Н$\cdot\cos 30^\circ=\sqrt{3}\cdot 10^{-6}$ Н (рис. 12).

в) Когда заряд C отстоит на расстоянии 10 см от A и B, сила действия меньше, чем в случае б), в 100 раз, т. е. каждая равна 10^{-8} Н (обратная пропорциональность квадрату расстояния). Углы настолько малы, что косинусы углов почти равны единице. Таким образом, результирующая сила равна $2\cdot 10^{-8}$ Н. Если учесть действительную величину углов, то результирующая сила оказывается равной $1{,}998\cdot 10^{-8}$ Н (рис. 13).

Г. Эта задача, вероятно, относится к числу самых трудных, которые учащиеся в состоянии решить на данном уровне. Два одинаковых металлических шара несут равные заряды, отталкивающие шары с силой 10^{-5} Н, когда они удалены друг

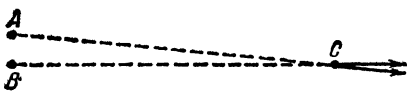


Рис. 13.

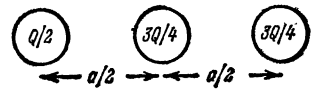


Рис. 14.

от друга на некоторое определенное расстояние. Третий такой же, но незаряженный шар приводится в соприкосновение сначала с левым шаром, а затем с правым и помещается посередине между ними. Какая электрическая сила действует теперь на третий шар?

Ответ. Пусть заряд на каждом из двух шаров равен Q, а расстояние между ними равно a. Тогда можно записать, что $10^{-5}\text{Н}=kQ^2/a^2$. Когда незаряженный третий шар соприкасается с левым шаром, он приобретает заряд $Q/2$, оставляя на левом заряд $Q/2$. Когда же третий шар соприкасается с правым шаром, их общий заряд равен $Q+Q/2=3Q/2$, что даст при делении поровну $3Q/4$. Тогда окончательная картина их размещения представится в виде, показанном на рис. 14. Уместно заметить, что полный заряд все еще равен $2Q$, как это и должно быть. Сила, действующая направо, равна

$$F_{\text{прав}}=k\,(Q/2)\,(3Q/4)/(a/2)^2=4\cdot{}^1/_2\cdot{}^3/_4\cdot kQ^2/a^2={}^3/_2\cdot 10^{-5}\text{ Н};$$

сила же, действующая налево, равна

$$F_{\text{лев}}=k\,(3Q/4)\,(3Q/4)/(a/2)^2=4\cdot{}^3/_4\cdot{}^3/_4\cdot kQ^2/a^2={}^9/_4\cdot 10^{-5}\text{ Н}.$$

Таким образом, результирующая сила равна $({}^9/_4-{}^3/_2)\cdot 10^{-5}$Н, т. е. ${}^3/_8\cdot 10^{-5}$ Н. Действует она справа налево. Этот ответ не совсем точен, так как наличие третьего заряда оказывает какое-то влияние на то, как заряд поделится между двумя. Но если шары малы, то такой эффект будет пренебрежимо слабым.

Успевающие учащиеся могут решить данную задачу короче, сократив формальные операции и выражая силы как доли первоначальной силы, действовавшей между двумя исходными шарами. При таком подходе возможны следующие рассуждения.

Найдем силу, действующую на третий шар слева направо: если учесть действие зарядов,то искомая сила уменьшится в $({}^3/_4\cdot{}^1/_2)$ раз,т.е. составит ${}^3/_8$ исходной силы; если учесть влияние расстояния, ставшего в два раза меньше, то искомая сила должна стать в 4 раза больше, т. е. составить ${}^3/_8\cdot 4={}^{12}/_8$ исходной силы.

Сила, действующая на третий шар справа налево, запишется при подобных рассуждениях следующим образом: если учесть действие только зарядов, то искомая сила должна стать в $({}^3/_4\cdot{}^3/_4)$ раз меньше, т. е. ${}^9/_{16}$ исходной силы; если учесть теперь влияние расстояния, ставшего в два раза меньше, то искомая сила должна

стать в 4 раза больше, т. е. составить $^{9}/_{16} \cdot 4 = {}^{36}/_{16}$ исходной силы, действовавшей справа налево.

Результирующая же сила равна $({}^{36}/_{16} - {}^{12}/_{8}) = {}^{3}/_{4}$ исходной силы. Таким образом, искомая сила равна $^{3}/_{4} \cdot 10^{-5}$ Н и имеет направление справа налево.

27.4. Измерение малых электрических сил

Цель. В разделах 27.4 и 27.5 описывается опыт Милликена, показывающий, что элементарный заряд принадлежит к числу фундаментальных природных единиц электричества. В разделе 27.4 рассматриваются микро-микровесы. В этом разделе подводится фундамент под опыт Милликена. Однако экспериментальная установка и методика эксперимента столь остроумны, что представляют самостоятельный интерес.

Содержание. Небольшой шарик, переносимый воздухом с постоянной силой, имеет постоянную скорость, которая прямо пропорциональна движущей силе. Поскольку электрическая часть движущей силы пропорциональна электрическому заряду, у нас открывается возможность сопоставить электрические заряды между собой путем измерения скоростей, с которыми шарик передвигается в пространстве. Зная вес шарика и наблюдая скорость, установившуюся под действием силы тяжести, можно установку проградуировать в известных единицах измерения силы.

Процесс калибровки экспериментально подтверждает вместе с тем, что электрическая сила, действующая на заряженный предмет между двумя заряженными пластинами, одинакова во всех точках и прямо пропорциональна числу батарей (позднее вводится понятие о напряжении), подключенных к пластинам.

Методические указания. Так как материал данного раздела подводит к опыту Милликена, излагать его нужно как введение к следующему разделу. Однако изящество опыта с элементарным зарядом, излагаемого в очередном разделе, ускользнет от уяснения, если не довести простой материал этого раздела до полного понимания. Не следует делать упор на конфигурации электрических зарядов между параллельными пластинами, поскольку этот момент не есть главное в доказательстве. Об этом будет упомянуто в разделах 27.6 и 27.7, а также в последующих главах. Для обсуждения материала данного раздела надо отвести не более одного классного занятия, предусмотрев еще одно лабораторное занятие.

Лабораторный опыт IV.5 (*Движущая сила и конечная скорость*) может охватить почти весь материал изучаемого раздела и заложить основу, необходимую для усвоения следующих разделов. Требования в отношении классной проработки разделов 27.4 и 27.5 можно резко сократить, проведя лабораторный эксперимент на начальной стадии изучения данного материала.

В фундаментальном плане электрическая сила не играет исключительно важной роли при проработке первой части данного раздела. Все самое важное на данном этапе сводится к доказательству того, что скорость движения небольшого шарика в воздухе пропорциональна движущей силе, действующей на этот шарик. Здесь в действительности (из разделов физики) нужна гидродинамика, а не электричество. К электрической силе приходится просто обращаться как к удобному способу удвоения или утроения силы. Вашему классу может доставить удовольствие, когда он узнает о том, что Милликену перед его опытом уже было известно, что скорость пропорциональна движущей силе. Сила вязкого действия воздуха на шарик, движущийся в воздухе, равна, как известно, $6\pi krv$, где r — радиус

шарика, v — его скорость и k — вязкость воздуха. Именно эта сила трения уравновешивает гравитационную и электрическую силу, заставляя шарик двигаться с установившейся скоростью.

Здесь уместно сделать одно предостережение в отношении динамики движения пластмассовых шариков: нужно осторожно подбирать слова при описании сил, действующих на шарик; *результирующая* сила, действующая на шарик, равна нулю, когда он движется с постоянной скоростью. Рассмотрим шарик, движущийся вверх с постоянной скоростью v_0. Гравитационная сила действует вниз и имеет величину F_g. Электрическая сила действует вверх и имеет величину F_e. Вот здесь и возникает соблазн сказать, что имеется результирующая сила, действующая на шарик, и что она равна F_e (вверх) — F_g (вниз). В действительности же дело обстоит не так. Результирующая сила, действующая на всякий предмет, который движется с постоянной скоростью, равна нулю. Чтобы вычислить истинную результирующую силу, нужно учесть наряду с гравитационной и электрической силами еще и тормозящую силу сопротивления воздуха: $[(F_e(\text{вверх}) - F_g(\text{вниз})] - F_{\text{возд}}$ (вниз)$=0$. Теперь можно обратиться к понятию «движущая сила», чтобы охарактеризовать сумму гравитационной и электрической сил. Результирующая же сила будет равна нулю.

Чтобы проверить, в какой степени учащиеся улавливают логическое развитие излагаемого в данном разделе материала, можно воспользоваться рис. 27.18.

То обстоятельство, что последовательное подсоединение двух батарей к пластинам удваивает электрическую силу одной батареи, нельзя на данной стадии объяснить как следствие накопленных до этого знаний. Этот момент прямо доказывается на опыте и становится легко доступным пониманию.

В данном разделе излагаются простые представления. Учащиеся понимают их, если они в состоянии решить, например, такую задачу.

А. Стальной шарик падает в сиропе с постоянной (почему с постоянной?) скоростью 10 см/с. С какой скоростью станет падать стеклянный шарик той же величины, но половинного веса? (Со скоростью вдвое меньше.) Правда, более проницательные учащиеся, вероятно, скажут, что здесь надо учесть еще и силу выталкивания шарика сиропом.

Б. Если стальной шарик тянуть вверх с силой, вдвое превосходящей силу его веса, с какой скоростью он станет перемещаться? (Движущая сила направлена вверх и имеет величину, равную весу шарика. Следовательно, шарик движется вверх со скоростью 10 см/с.)

27.5. Элементарный заряд

Цель. Ознакомить с экспериментом, показывающим, что заряды могут быть кратными некоторой природной единице (элементарному заряду).

Методические указания. Учащиеся, проработав настоящий раздел, должны понимать, что все существующие в природе заряды кратны некоему единичному элементарному заряду. Но это еще не все. Надо надеяться на то, что этот удивительно простой и весьма важный для понимания электричества опыт произведет на них глубокое впечатление.

Лабораторный опыт IV.6 (*Опыт Милликена*) нужно провести так, чтобы он нес на себе по возможности всю учебную нагрузку по проработке настоящего раздела. Прямой опыт знакомства с оборудованием и непосредственные измерения, доказывающие существование элементарного единичного заряда, нельзя

возместить и восполнить никакими иными средствами обучения. Опыт с пластмассовыми шариками доведен к настоящему времени до большой простоты, позволяющей провести качественные изменения за одно занятие, если перед этим поставить опыт IV.5.

Нельзя допускать, чтобы учащиеся увлекались описательным материалом настоящего раздела, забыв о перспективе того, что должен показать опыт. Не исключено, что отдельные учащиеся слышали об эксперименте Милликена с масляными каплями по измерению заряда электрона. Именно в этом свете его обычно и излагают. Здесь же к опыту Милликена изложен другой подход. В заданном электрическом поле стандартный пластмассовый шарик выявляет изменения скорости и отсюда изменения силы, действующей на него.

Подобные изменения силы кратны некоторой величине. Поскольку сила пропорциональна заряду на шарике, делается вывод, что заряд не может иметь любое значение, а изменяется дискретными приращениями, равными кратным произведениям элементарного единичного заряда. На данной стадии не выводится понятие о кулоне, и нам нет необходимости выражать наш элементарный заряд через ту или иную из существующих единиц. Вместо этого мы считаем этот элементарный заряд нашим единичным зарядом.

В распоряжении Милликена не было пластмассовых шариков, и он проводил свои опыты с небольшими масляными каплями, величина которых была неизвестна. Если капля образована маслом с плотностью d и имеет радиус a, то ее масса равна $^4/_3\,\pi a^3 d$, а Земля притягивает ее с силой $^4/_3\,\pi a^3 dg$. Если такая капля падает со скоростью v, испытываемая ею сила торможения равна, как показывается в гидродинамике, $6\pi kav$, где k — вязкость воздуха. Следовательно, если капля падает с постоянной скоростью v, то $^4/_3\,\pi a^3 dg = 6\pi kav$. Измерив скорость падения, можно вычислить радиус капли a. С этого момента опыт проводится почти так же, как он описан в Учебнике.

Дополнительные задачи. А. В одном из опытов Милликена пластмассовый шарик удерживается электрической силой неподвижно между заряженными пластинами, когда последние присоединены к трем батареям. После воздействия рентгеновского пучка на шарик он начинает падать. Установлено, что в этом случае гравитационную силу можно уравновесить, если к пластинам подсоединить пять батарей. Каково наименьшее число элементарных зарядов, которые должны находиться на шарике, чтобы привести его в состояние неподвижности?

Ответ. Поскольку электрическая сила пропорциональна числу батарей, число зарядов на шарике при электрической силе от трех батарей равно гравитационной силе, т. е.

$$3cq_1 = mg,$$

где c — постоянная пропорциональности, а q_1 — число зарядов на шарике. Когда к пластинам подсоединены 5 батарей,

$$5cq_2 = mg.$$

Таким образом, предположив, что масса шарика осталась неизменной при изменении заряда, приходим к выводу, что

$$3cq_1 = 5cq_2$$

и, следовательно,

$$q_1/q_2 = 5/3.$$

Таким образом, 5 зарядов — минимально возможное число в том случае, когда при подсоединении трех батарей к пластинам шарик находится в покое.

Б. В опыте Милликена число подключаемых к пластинам батарей подбирают так, что заряженный шарик устанавливается неподвижно. Батареи отключают, так что шарик падает, проходя 1 мм за 3 с. Шарик поднимают сильным электрическим полем; подвергают воздействию рентгеновского пучка; восстанавливают исходное поле. Шарик теперь падает, проходя 1 мм за 9 с. Такой опыт проводят неоднократно и находят следующие данные:

Время прохождения пути в 1 мм без поля — 3 с; при действии нормального поля: 1) шарик не падает и не поднимается; 2) падает на 1 мм за 9 с; 3) поднимается на 1 мм за 3 с; 4) поднимается на 1 мм за 9 с; 5) падает на 1 мм за 2,25 с.

а) Каков вероятный начальный заряд на шарике?

б) Каков вероятный конечный заряд на шарике?

Ответ. а) 3; б) —1. Разумеется, что приведенных данных недостаточно, чтобы дать ответ +3, —1 или же —3 и +1. Нам известно, что в случаях а) и б) знаки должны быть различными. Само собой разумеется также, что ответом могут быть 6 и —2, но если учесть другие установленные данные, то этот вариант представляется невероятным.

27.6. Большие электрические весы

Цель. В разделах 27.6 и 27.7 показывается, как можно измерить постоянную пропорциональности в законе Кулона, и описывается экспериментальное устройство для такого измерения.

Методические указания. Разделы 27.6 и 27.7 нужно проходить вместе. Если у вас ощущается большая нехватка времени, то эти разделы можно наметить для домашней проработки, но при этом надо удостовериться, что учащиеся узнали один-два простых факта относительно сил, действующих на заряды между параллельными пластинами, чтобы найти значение постоянной в законе Кулона.

Для разбора темы о больших микро-микровесах нужно предварительно заглянуть в следующий раздел.

В данном разделе излагаются две мысли об электрических силах, действующих между параллельными пластинами: как они изменяются (почему не изменяются?) в зависимости от площади пластин и как они изменяются при изменении расстояния между пластинами (обратно пропорционально, если к пластинам присоединена та же самая батарея). Было бы не плохо попросить учащихся обобщить все, что им известно об электрических силах, действующих на заряженные предметы между металлическими пластинами. Их обобщение могло бы гласить примерно так:

Электрическая сила, действующая на заряженный предмет, который находится между двумя параллельными металлическими пластинами: 1) не зависит от положения предмета между пластинами, т. е. одинакова повсюду, поскольку пластины можно считать большими, а силы изображения малыми; 2) не зависит от площади пластин, поскольку площадь пластин велика по сравнению с расстоянием между ними; 3) обратно пропорциональна расстоянию между пластинами, если к ним подсоединена та же самая батарея; 4) прямо пропорциональна числу последовательно присоединенных к пластинам батарей (впоследствии это будет пропорциональность приложенному к пластинам напряжению); 5) прямо пропорциональна заряду на предмете.

Нельзя допускать, чтобы у учащихся сложилось представление о том, что любое из перечисленных положений якобы можно доказать логическим рассуждением. В самом лучшем случае мы можем установить эти факты и подтвердить их наблюдениями за зарядами, помещенными между пластинами. Учащимся можно сказать только то, что все эти положения можно подтвердить, хотя на следующем уровне их знаний для этого потребуется очень много времени, и что точнее их вывод может быть сделан средствами дифференциального исчисления. На данном этапе к пропорциональности силы числу батарей надо относиться как к факту, легко подтверждаемому экспериментально, а не вдаваться преждевременно в сложение напряжений. Все утверждения, сделанные выше о действии сил на заряды, находящиеся между параллельными металлическими пластинами, относятся только к такому случаю, когда батарея подключена к пластинам. По мещенный между металлическими пластинами пробный заряд испытывает действие некоторой силы. Удвоим расстояние между пластинами, не отключая батарей. Сила, испытываемая пробным зарядом, станет вдвое меньше. Теперь заряд, который *несут пластины*, уменьшился до половины прежнего заряда. По мере того как мы раздвигали пластины, заряд в действительности утекал обратно через батарею. С другой стороны, если батарею отключить и затем раздвинуть пластины, сила, оказываемая на пробный заряд, остается прежней. В данном случае зарядам некуда было податься и они остались неизменными.

Дополнительная задача. Пластмассовый шарик помещен между двумя металлическими пластинами, отстоящими друг от друга на расстоянии 1 см. К пластинам никакой батареи не подключено. Шарик падает, проходя 1 мм за 10 с. Затем к пластинам подключают батарею, после чего шарик начинает подниматься, проходя 1 мм за 20 с.

а) Если батарея к пластинам подключена, то как следует изменить расстояние между ними, чтобы удерживать шарик неподвижно?

б) Если пластины оставлены в новом положении, то сколько батарей нужно подключить, чтобы заставить заряд подниматься вверх со скоростью 1 мм за 10 с?

в) Если полюсы этих батарей изменить на противоположные, то с какой скоростью начнет падать шарик?

Ответ. а) Пусть вес шарика равен W. Движущая сила направлена вверх и равна $W/2$, так что электрическая сила составляет $3W/2$ и направлена вверх. Чтобы уравновесить гравитационную силу, сила, действующая вверх, должна быть равна W. Таким образом, ее нужно уменьшить до $^2/_3$ исходной величины; отсюда следует, что пластины следует раздвинуть, доведя расстояние между ними до $^3/_2$ первоначального промежутка, т. е. до 1,5 см.

б) Движущая сила должна быть равна W и направлена кверху, т. е. нужно сделать электрическую силу равной $2W$ и имеющей то же направление. Для этого нужно подключить две батареи.

в) После перемены полюсов батарей движущая сила направлена книзу и равна $3\ W$. Под действием этой силы шарик станет падать со скоростью 1 мм за 3,33 с.

27.7. Постоянная в законе Кулона

Цель. Описать способ определения коэффициента пропорциональности (постоянной) k в законе Кулона.

Методические указания. Чрезвычайно важно понять замысел опыта. Детали играют второстепенную роль. Если вы испытываете недостаток времени,

то данный раздел вместе с предыдущим можно наметить только к домашней проработке. В таком случае учащиеся должны уяснить себе, что постоянную силу в законе Кулона можно измерить, хотя они могут и не понимать до конца, как же это нужно сделать.

Прежде чем приступить к обсуждению вопроса об измерении постоянной k в законе Кулона, полезно учащихся попросить вычислить силу взаимодействия между двумя элементарными зарядами, находящимися на расстоянии 0,1 мм друг от друга. Когда они обнаружат, что им не хватает знания постоянной, задайте им вопрос, как эту постоянную измерить. Задача всегда сводится к подсчету или измерению числа избыточных элементарных зарядов на предмете, который имеет достаточную величину, чтобы можно было осуществить измерение силы. Чтобы отвергнуть предложение о непосредственном измерении такого числа, классу можно сообщить, что $k=2{,}3\cdot 10^{-28}$ Н·м^2/(элем.зар.)^2. Как только класс поймет, что измерить такое число нелегко, можно приступать к эксперименту, изложенному на стр. 52.

Логический ход эксперимента можно было бы обобщить в таком, скажем, виде:

1. Нам известна сила, действующая на элементарный заряд между двумя пластинами (из опыта Милликена).

2. Изменим масштаб опыта, увеличив расстояние между пластинами и число батарей стократно, так что *сила, действующая на элементарный заряд, останется такой же*, как и прежде (т. е. известной).

3. Поместим один из двух одинаково заряженных шариков между заряженными пластинами и воспользуемся пружинными весами для измерения электрической силы, действующей на шарик. Эта сила при делении на силу, действующую на элементарный заряд, дает нам число элементарных зарядов на шаре.

4. Измерим силу отталкивания между двумя одинаково заряженными шариками, находящимися на заданном расстоянии. Тогда, разрешив формулу Кулона $F=kq_1q_2/r^2$ относительно k, учащиеся убедятся в том, что $k=2{,}3\cdot 10^{-28}$ есть мера (в ньютонах) силы взаимодействия между двумя элементарными зарядами на расстоянии 1 м. Важно найти этой силе свое место в соответствующем масштабе, показав, сколь велика она по сравнению с гравитационной силой между двумя небольшими частицами на сравнимых расстояниях.

Обратите внимание на разницу между тем, как материал излагается обычно и как это сделано здесь. В большей части книг электростатическая единица заряда определяется как такой заряд, который действует на равный ему заряд, находящийся на расстоянии 1 см, с силой отталкивания, равной 1 дине (10^{-5} Н). Таким образом, закон Кулона записывается в виде $F=q_1q_2/r^2$. (Следовательно, постоянная k устанавливается равной единице.) Заряд электрона (элементарный заряд) в этом случае выражается как некая доля электростатической единицы ($4{,}8\cdot 10^{-10}$). В других книгах единичный заряд, называемый кулоном (Кл), определяют через магнитные силы, оказываемые на токи. Поскольку же единичный заряд находят каким-то иным способом, постоянную k приходится измерять. В подобном случае не обойтись и без измерения заряда электрона ($1{,}602\cdot 10^{-19}$ Кл).

В нашей книге проводится мысль о том, что природа дает естественный единичный заряд и что нам приходится измерять множитель k, определенный таким образом из закона Кулона. При подобном плане изучения нам не приходится «из-

мерять заряд электрона». В настоящем разделе описывается способ измерения k. В целях изучения атомной физики такой подход обладает преимуществом и концептуальным, и практическим. Для использования в электротехнике единичный заряд представляет собой до неудобства малую величину.

По всей вероятности, лучше учащимся сказать, что описанная в настоящем разделе схема измерения k практического приложения не находит. Такой опыт возможен, но существуют гораздо более точные методы. Фактически используемые методы предполагают целый ряд весьма косвенных измерений, описать которые на достигнутом учащимися уровне не представляется возможным. Это находится в противоречии с опытом Милликена, который, по крайней мере в момент его первого осуществления, был самым точным способом определения заряда электрона через до этого определенные электростатические единицы заряда.

Задача 16 иллюстрирует мыслимый способ измерения силы, действующей на большой заряд между двумя металлическими пластинами. Полезны задачи 19, 21 и 24. Задача 21 уместна при рассмотрении того, как небольшая доля молекул в макроскопически заряженных телах меняет свой заряд.

К интересным задачам можно отнести нахождение силы притяжения между протоном и электроном на расстоянии $0{,}5 \cdot 10^{-10}$ м друг от друга, что меньше их взаимного удаления в атоме водорода. Она оказывается равной 10^{-7} Н. Это чрезвычайно огромная сила по сравнению с той силой, которую испытывает пластмассовый шарик в опыте Милликена (превосходит приблизительно в 10^{7} раз).

27.8. Сохранение заряда

Цель. Ознакомить с законом сохранения заряда.

Методические указания. На данной стадии сохранение заряда должно представляться довольно самоочевидным. О нем можно рассказать почти мимоходом.

Излагаемый в настоящем разделе материал способен довольно легко увести вас в рассмотрение проблемы образования пар и других родственных вопросов. Не рискуйте делать этого, если вы не уверены в том, как из этой глубины надо выбираться!

В Учебнике содержится утверждение, что иногда нейтрон превращается в протон и электрон (что часто сопровождается испусканием еще и нейтрино). Довольно часто в учебниках говорится, что нейтрон состоит из протона и электрона. Это утверждение ошибочно в свете современных представлений.

Основное содержание закона сохранения, видимо, будет легко воспринято большинством учащихся. У них уж есть интуитивное представление о сохранении предметов, которое в данном случае пригодится. Обозначения «плюс» и «минус» сделают представление об образовании пар более легко усвояемым.

27.9. Электрический заряд электронов

Цель. Показать, как можно определить заряд, который несут элементарные частицы.

Содержание. а) Электрон несет отрицательный единичный элементарный заряд.

б) Альфа-частица несет заряд, равный $+2$ элементарным зарядам.

в) Все известные на сегодняшний день «элементарные» частицы несут на себе $+1$, -1 или 0 элементарных зарядов.

Методические указания. Материал может быть рекомендован для домашнего чтения.

В настоящем разделе утверждается то, о чем учащиеся в большинстве случаев уже догадывались сами, а именно, что электрон несет на себе единственный элементарный единичный заряд. На самом деле все элементарные частицы, как это известно сейчас, вообще не несут никакого заряда, в том числе и элементарного. Физикам известны причины такого положения. Это просто основополагающий эмпирический факт. Здесь полезна задача 17. Неважно, где она будет решена — дома или в классе.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам

В табл. 5 задачи распределены по степени их трудности и по разделам, к которым они относятся. Отдельно выделены задачи, предназначенные для разбора в классе. Задачи, рекомендуемые в первую очередь, отмечены значком #.

ТАБЛИЦА 5

Разделы	Со звездочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
27.1	1	2, 3			2, 3
27.2		4, 5		6, 7#	5, 7#
27.3	8—11	3			
27.4, 27.5		13	12, 14, 15		13, 14
27.6	16	17, 18	19		
27.7	20	21, 22	23		21, 22
27.8			24		

Краткие ответы

1*. $1 \cdot 10^{-5}$ Н.

8*. Результирующая сила изменилась бы как по величине, так и по направлению.

9*. Поле на рис. 27.8, *а* аналогично картине на рис. 27.9, *а*; рис. 27.8, *б* — рис. 27.9, *б*; рис. 27.8, *в* — рис. 27.9, *в*, а поле на рис. 27.8, *г* аналога на рис. 27.9 не имеет.

10*. Не могут. Если бы они пересекались, то в точке их пересечения на движущийся заряд действовала бы результирующая сила в двух направлениях сразу!

11*. Только в том случае, когда силовая линия электрического поля представляет собой прямую, а частица движется вдоль этой линии. Если линия искривлена, то траектория частицы, как правило, не будет совпадать по направлению с силой действия на частицу.

16*. $F = 1{,}4 \cdot 10^{-15}$ Н.

20*. $F = 2{,}3 \cdot 10^{-16}$ Н.

Ответы с указаниями и решениями

2. а) Поскольку расстояние между A и B равно удвоенному расстоянию между C и B, сила, с которой C действует на B, должна быть в четыре раза больше силы действия A на B и равна $4 \cdot (3 \cdot 10^{-6}\ \text{Н}) = 12 \cdot 10^{-6}$ Н.

б) Предположив, что три заряда имеют одинаковую величину и знак, найдем, что обе силы станут отталкивать. Сила действия A на B равна $3 \cdot 10^{-6}$ Н и направлена вправо. Из п. а) нетрудно установить, что сила действия C на B составляет

$12 \cdot 10^{-6}$ Н и направлена влево:

$$F_{\text{полн}} = 12 \cdot 10^{-6}\ \text{Н} - 3 \cdot 10^{-6}\ \text{Н} = 9 \cdot 10^{-6}\ \text{Н (влево)}.$$

3. а) По закону Кулона сила взаимодействия между отдельными заряженными частицами изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния между ними; следовательно,

$$F_{AB}/F_{BC} = (1/1\ \text{см})^2/[1/(2/\sqrt{3})\ \text{см}]^2 = {}^3/_4.$$

Но $F_{BC} = 4 \cdot 10^{-6}$ Н; поэтому $F_{AB} = {}^3/_4 \cdot (4 \cdot 10^{-6}\ \text{Н}) = 3 \cdot 10^{-6}$ Н.

б) Так как две силы, действующие на B, взаимно перпендикулярны, полная сила найдется из соотношения

$$F_{\text{полн}} = \sqrt{(4 \cdot 10^{-6}\ \text{Н})^2 + (3 \cdot 10^{-6}\ \text{Н})^2} = 5 \cdot 10^{-6}\ \text{Н}.$$

Направление действия полной силы найдется из векторной суммы, показанной на рис. 15.

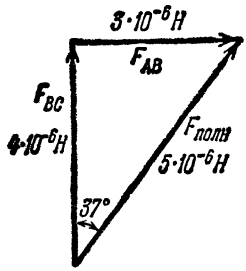


Рис. 15.

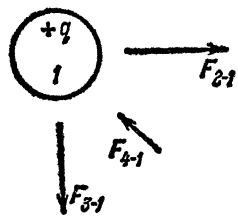


Рис. 16.

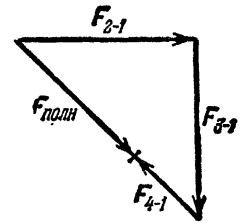


Рис. 17.

4. а) Так как шары *2* и *3* находятся каждый на расстоянии r от шара *1*, силы их действия на этот шар равны по величине:

$$F_{2\text{-}1} = F_{3\text{-}1} = kq^2/r^2.$$

Поскольку диагональ квадрата в $\sqrt{2}$ раза больше его стороны, можно написать, что

$$F_{4\text{-}1} = kq^2/(\sqrt{2}r)^2 = kq^2/2r^2.$$

Сила, с которой действует шар *4*, равна всего половине силы действия шара *2* или *3*.

Стрелками на рис. 16 показаны направление и относительная величина всех сил действия на шар *1*.

Полная сила $F_{\text{полн}}$ равна сумме $F_{2\text{-}1} + F_{3\text{-}1} + F_{4\text{-}1}$. Из рис. 17 видно, что

$$(F_{\text{полн}} + F_{4\text{-}1})^2 = F_{2\text{-}1}^2 + F_{3\text{-}1}^2 = 2F_{2\text{-}1}^2.$$

Таким образом,

$$F_{\text{полн}} = \sqrt{2}F_{2\text{-}1} - F_{4\text{-}1} = (\sqrt{2} - 1/2)\,F_{2\text{-}1} = 0{,}091\ kq^2/r^2.$$

б) Симметричность диаграммы позволяет утверждать, что полная сила действия на каждый заряд имеет одинаковую величину и направлена к центру. Если все подушки отпустить одновременно, то все заряды начнут двигаться к центру квадрата.

5. Это фундаментальная задача, которая касается по сути дела всех моментов, охваченных в настоящей главе, о макроскопических зарядах и их взаимодействии. Воспользуемся следующими фактами:

1. Сила взаимодействия между зарядами изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния между ними.

2. Эта сила пропорциональна обоим зарядам.

3. При перераспределении заряда полный заряд сохраняется.

4. Заряды свободно перемещаются по проводящим телам.

Решение задачи можно получить с помощью эскизов, отражающих положение на разных стадиях.

В исходном состоянии сила F была равна $2\cdot10^{-5}$Н.

а) Если в соприкосновение с A привести такой же проводящий шар C, то первоначально находившийся на A заряд будет поделен между ними поровну, если, разумеется, по соседству нет других заряженных тел. Переместив теперь шар C к B, мы получим картину, представленную на рис. 18. Силу, действующую на A, можно вычислить с учетом того, что она пропорциональна обоим зарядам:



$$\frac{F_A}{2\cdot10^{-5}\text{ Н}}=\frac{(q/2)\,(3q/2)}{q\cdot q}=\frac{3}{4},$$

$$F_A=1{,}5\cdot10^{-5}\text{ Н (налево)}.$$

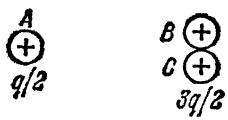


Рис. 18.

б) Если шар C коснулся только шара A и не соприкасался с шаром B, то заряд на нем будет равен $q/2$, так что у нас возникнет уже рассмотренная ситуация, когда шар C находился на середине расстояния между шарами A и B.

Поскольку расстояние между шарами A и C равно половине расстояния между шарами A и B, сила, с которой шар A действует на шар C, найдется следующим образом (рис. 19):

$$\frac{F_{AC}}{2\cdot10^{-5}\text{ Н}}=\frac{(q/2)\,(q/2)/(\overline{AB}/2)^2}{q\cdot q/\overline{AB}^2}=1,\quad F_{AC}=2\cdot10^{-5}\text{ Н (направо)}.$$

Шар B находится от шара C на том же расстоянии, что и шар A, но его заряд

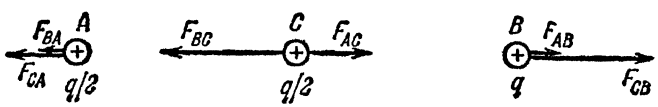


Рис. 19.

вдвое больше. Следовательно, он действует на шар C с силой, которая равна

$$F_{BC}=4\cdot10^{-5}\text{ Н (налево)}.$$

Полная сила, с которой шары A и B действуют на шар C, равна теперь

$$F_C=2\cdot10^{-5}\text{ Н (налево)}.$$

Не исключена возможность того, что некоторые учащиеся поймут задачу иначе, а именно так, что шар C сначала коснулся шара A, а затем шара B, после чего его переместили на середину между шарами A и B. В таком случае шар C дважды поделится своим зарядом, после чего на нем останется заряд $3q/4$. Теперь ответ будет уже иным.

6. Шар B закреплен в своем положении, а шар A считается маятниковым грузом, находящимся в статическом равновесии.

а) Поскольку x есть расстояние между шарами, электрическая сила взаимодействия выражается соотношением $F_e=k/x^2$, где постоянная k зависит от зарядов шаров.

б) На шар A действуют три силы: электрическая сила F_e; сила тяжести mg; сила натяжения нити $F_н$ (рис. 20). Чтобы шар A находился в равновесии, необходимо, чтобы полная сила была равна нулю, т. е.

$$F_e + mg + F_н = 0.$$

Поскольку $F_н$ есть натяжение, оно должно быть направлено вдоль нити, а его величина должна быть такой, чтобы замкнуть векторный треугольник ACD. Иными словами, векторная сумма $F_e + mg$ должна действовать по направлению нити. Теперь подобие треугольников позволяет записать

$$F_e/mg = x/l.$$

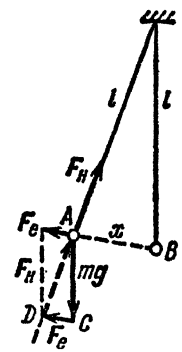


Рис. 20.

в) Если расстояние x, соответствующее равновесию, сократить вдвое, то сила F_e увеличится в четыре раза. Условие равновесия в новом положении запишется так:

$$4F_e/m'g = x/2l, \quad \text{т. е.} \quad F_e/m'g = x/8l.$$

Так как $F_e/mg = x/l$, находим, что $m'g = 8mg$; следовательно, вес должен возрасти в 8 раз.

7. Это очень интересная задача, раскрывающая проявления индукции в проводнике. Когда маленький шарик A сильно удален от большого шара B, заряд последнего распределен сферически-симметрично, т. е. равномерно. Сила взаимодействия между двумя шарами в этом случае будет такой же, как и сила взаимодействия между точечными зарядами. (Этот вывод есть следствие обратной пропорциональности силы квадрату расстояния.)

Если два шара сближать друг с другом, то заряд на большом шаре станет перераспределяться. На самом деле при достаточно значительном сближении



Рис. 21.

ближайшая к шарику часть большого шара зарядится посредством индукции электричеством, противоположным знаку заряда шаров в исходном положении, благодаря чему между ними возникнет сила притяжения. Шарик A считается столь малым, что незначительное перемещение его заряда не приведет к изменению действующих сил, поскольку его заряд просто не может существенно удалиться от его центра. При нашем анализе его можно считать точечным зарядом. Ниже рассматриваются три особых случая.

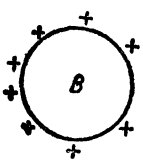


Рис. 22.

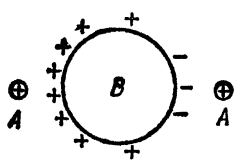


Рис. 23.

1. Большое удаление: шары отталкиваются как точечные заряды (рис. 21).

2. Среднее удаление: шары отталкиваются друг от друга с силой меньше, чем сила взаимодействия между точечными зарядами, потому что заряд на большом шаре значительно отодвинут от шарика A (рис. 22).

3. Близкое расположение шаров: на одной стороне большого шара наведен отрицательный заряд, который располагается к шарику A гораздо ближе, чем положительный заряд большого шара. Поэтому в данном случае шары притягиваются друг к другу (рис. 23).

а) По графику 27.30 находим, что при расстояниях между шарами 5 и 3 см ординаты равны соответственно 0,25 и 0,67. Таким образом,

$$F\ (3\ \text{см})/F\ (5\ \text{см}) = 0{,}67/0{,}25 = 2{,}7.$$

Если расстояние между центрами шаров уменьшается с 5 до 3 см, сила взаимодействия между шарами возрастает в 2,7 раза. Если бы сила взаимодействия между шарами изменялась обратно пропорционально квадрату расстояния между ними, то данное отношение должно было бы составлять

$$F\ (3\ \text{см})/F\ (5\ \text{см}) = 5^2/3^2 \approx 2{,}8.$$

Следовательно, в данной области сила изменяется почти так же, как и для точечных зарядов.

б) Когда шары сблизятся еще и расстояние между их центрами составит 2 см, сила отталкивания между ними все еще возрастает. Но начиная с расстояния 4,4 см сила отталкивания между шарами быстро убывает благодаря проявлениям индукции, рассмотренным во втором и третьем случаях. При сближении шаров до расстояния 1,2 см притяжение благодаря проявлениям индукции уравнивается с отталкиванием двух полных зарядов. При таком удалении шаров друг от друга полная сила взаимодействия между ними, как это показано на графике, равна нулю. Кривая силы отталкивания на рассматриваемом графике обрывается тогда, когда расстояние между центрами двух шаров составляет 1,2 см. При еще большем сближении шаров сила взаимодействия между ними меняет знак, превращаясь в бо́льшую силу притяжения. Если предположить идеальный случай, когда шарик стянулся в точечный заряд, то сила притяжения станет бесконечно большой. Действительная сила притяжения перестает возрастать в тот момент времени, когда шары придут в соприкосновение. В момент их соприкосновения заряд перераспределится между ними, в корне изменив характер их взаимодействия. От учащихся требуется лишь понимание роли двух эффектов: отталкивания полных зарядов во взаимосвязи с притяжением, обусловленным индуцированием.

12. Конечная скорость шарика в каждом случае пропорциональна движущей силе (векторной сумме электрической и гравитационной сил), действие которой испытывает шарик.

13. Эта задача относится к методу измерения электрических сил в опыте Милликена. Движущая сила, представляющая собой равнодействующую электрической и гравитационной сил, сообщает пластмассовому шарику скорость в направлении действия результирующей силы, пропорциональную величине этой силы.

а) Если шарик движется вверх со скоростью, равной $^3/_2$ его скорости, развиваемой под действием одной только силы тяжести, движущая сила направлена вверх и равна полуторному весу, т. е. $^3/_2 \cdot$ вес$= 4{,}2 \cdot 10^{-14}$ Н. Для этого требуется, чтобы электрическая сила была направлена вверх и имела величину $4{,}2 \cdot 10^{-14}$ Н$+$ $+2{,}8 \cdot 10^{-14}$ Н$= 7 \cdot 10^{-14}$ Н.

б) Если шарик движется вниз со скоростью, равной $^3/_2$ его скорости, развиваемой под действием одной только силы тяжести, добавочная электрическая сила направлена вниз и равна $(^3/_2 - 1) \cdot$ вес$= {}^1/_2 \cdot (2{,}8 \cdot 10^{-14}$ Н$) = 1{,}4 \cdot 10^{-14}$ Н.

14. Сила действия на заряженный предмет, помещенный между двумя параллельными пластинами, прямо пропорциональна заряду пластин. Вместе с тем она прямо пропорциональна числу одинаковых батарей, включенных в цепь. Следовательно, заряд, сообщенный батареями, должен быть прямо пропорционален числу батарей.

15. Предположим, что более крупный шарик сделан из той же самой пластмассы, т. е. что его масса возрастет в той же пропорции, что и объем. От учащихся требуется понимание того, что крохотные шарики в опыте Милликена падают гораздо медленнее, чем макроскопический пластмассовый шар.

К тому же группы шариков в опыте Милликена падают быстрее отдельных шариков. Поэтому конечная скорость кажется возрастающей с размером шариков.

17. а) При последовательном подключении двух батарей к пластинам, расстояние между которыми равно $2d$, сила, приложенная к находящемуся между ними элементарному заряду, останется такой же, как и в случае пластин с расстоянием между ними, равным d.

б) Когда пластины подключены к батареям, нужно иметь три батареи при расстоянии между пластинами $3d$, чтобы сохранить ту же самую силу, какую одна батарея оказывает при расстоянии d между ними.

18. При решении задачи используются два фундаментальных положения.

1. Сила, действующая на заряженный предмет, помещенный между заряженными параллельными пластинами, пропорциональна заряду предмета.

2. Заряд сохраняется. Поэтому если заряженный предмет привести в соприкосновение с таким же незаряженным предметом, то каждый из них после этого будет иметь половину первоначального заряда (если отсутствует индукция со стороны других заряженных предметов, которая может сделать распределение заряда неравномерным).

а) Если заряженный шар A привести в соприкосновение с таким же незаряженным шаром B, то каждый из них несет после этого на себе половину начального заряда шара A. Сила действия заряженных пластин на шар A, помещенный между ними, составит половину первоначальной силы, т. е. будет равна $5 \cdot 10^{-5}$ Н.

б) Если шар A коснется такого же незаряженного шара C, то его заряд опять поделится поровну между ними, так что сила действия заряженных пластин на шар A и в данном случае уменьшится вдвое и составит $^1/_4 \cdot (1 \cdot 10^{-4}\ \text{Н}) = 2{,}5 \cdot 10^{-5}$ Н.

в) Так как шар B имеет такой же заряд, как и шар A (см. п. а)), на него станет действовать та же самая сила $5 \cdot 10^{-5}$ Н. Шар C имеет такой же заряд, как и шар A (см. п. б)). Следовательно, на него теперь действует сила $2{,}5 \cdot 10^{-5}$ Н.

19. Электрическое силовое поле между параллельными пластинами изменяется прямо пропорционально числу последовательно подсоединенных батарей и обратно пропорционально расстоянию между пластинами.

а) Расстояние между пластинами возросло в 1,5 раза, так что сила уменьшилась в то же число раз; таким образом,

$$^2/_3 \cdot (3 \cdot 10^{-4}\ \text{Н}) = 2 \cdot 10^{-4}\ \text{Н}.$$

б) Утроенное число батарей втрое увеличивает силу, т. е.

$$3 \cdot (2 \cdot 10^{-4}\ \text{Н}) = 6 \cdot 10^{-4}\ \text{Н}.$$

21. Данная задача предназначается для того, чтобы подчеркнуть, что в макроскопических заряженных телах лишь крайне малая доля атомов или молекул теряет или приобретает заряд.

а) Так как шарик находится в равновесии, электрическая сила должна быть равна по величине силе тяжести ($mg = (3{,}06 \cdot 10^{-15}\ \text{кг}) \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2 = 3 \cdot 10^{-14}$ Н). Сила действия на элементарный заряд равна $1 \cdot 10^{-14}$ Н, так что избыток составляет 3 положительных электрических частицы.

б) Шарик, каким бы малым по сравнению с обыкновенными предметами он ни был, все еще заключает в себе огромное число молекул. Масса шарика равна числу молекул N, умноженному на массу одной молекулы, т. е. $3{,}06 \cdot 10^{-15}\ \text{кг} = N \cdot 3 \cdot 10^{-26}\ \text{кг}$; следовательно, $N = 1{,}02 \cdot 10^{11}$.

в) Доля молекул, которые приобрели или потеряли элементарный заряд, найдется в виде $3/(1{,}02 \cdot 10^{11}) = 2{,}94 \cdot 10^{-11}$, т. е. составляет совершенно ничтожную величину.

22. Данная задача предполагает количественную оценку сравнительно большого заряда наэлектризованного предмета посредством измерения электрической силы, действие которой со стороны совокупности закрепленных зарядов (т. е. зарядов параллельных пластин) испытывает этот предмет, когда известна сила их действия на единичный заряд. Электрическую силу, действующую на предмет, измеряют путем ее сравнения с весом этого предмета определенным взвешиванием на своеобразных весах (рис. 24):

$$AB = 0{,}2\ \text{м}; \quad AC = 2\ \text{м}; \quad BC = \sqrt{2^2 - (0{,}02)^2} \approx 2\ \text{м}.$$

а) Подобие треугольников позволяет записать, что

$$F_e/F_g = AB/BC = 0{,}02/2 = 0{,}01,$$

$$F_g = mg = (4{,}5 \cdot 10^{-3}\ \text{кг}) \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2 = 4{,}4 \cdot 10^{-2}\ \text{Н},$$

$$F_e = 0{,}01 \cdot (4{,}4 \cdot 10^{-2}\text{Н}) = 4{,}4 \cdot 10^{-4}\text{Н}.$$

Маятниковые весы представляют собой простой и изящный способ измерения силы, которая слишком мала, чтобы ее можно было определить с помощью существующих весов.

б) Считая, что электрическая сила, действующая на элементарный заряд, равна $3\cdot10^{-14}$ Н, найдем, что наблюдающаяся в данном случае сила $4{,}4\cdot10^{-4}$ Н в $1{,}5\cdot10^{10}$ раз больше силы $3\cdot10^{-14}$ Н. Следовательно, избыток заряда на шарике составляет около $1{,}5\cdot10^{10}$ элементарных зарядов.

23. Когда тот или иной шарик остается в покое, действующая на него полная сила равна нулю. Векторы, характеризующие три силы — гравитационную,

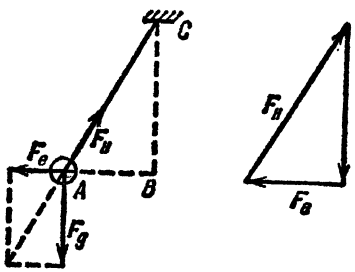


Рис. 24.

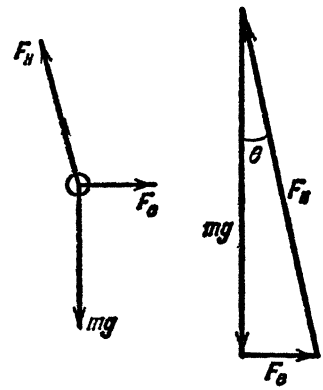


Рис. 25.

натяжение и электрического отталкивания,— должны образовывать замкнутый треугольник (рис. 25).

Число элементарных зарядов q на каждом шарике выражается соотношением

$$F_e = kq^2/r^2, \quad \text{т. е.} \quad q = r\sqrt{F_e/k}.$$

Из треугольника сил видим, что $F_e/mg = \operatorname{tg}\theta$, т. е. $F_e = mg\operatorname{tg}\theta$. Из диаграммы смещений находим, что $\sin\theta = 5/82 = 0{,}061$. Следовательно, угол должен быть мал, что позволяет записать $\sin\theta \approx \theta$ (в радианах) $= \operatorname{tg}\theta$. Таким образом,

$$q = r\sqrt{\frac{mg\operatorname{tg}\theta}{k}} = 0{,}1\text{ м}\sqrt{\frac{(1{,}2\cdot10^{-4}\text{ г})\cdot(9{,}8\text{ м/с}^2)\cdot(6{,}1\cdot10^{-2})}{2{,}3\cdot10^{-28}\text{ Н}\cdot\text{м}^2/(\text{элем. зар.})^2}} =$$

$$= 5{,}6\cdot10^{10}\text{ элем. зар.}$$

24. Так как шарик заряжен положительно, бета-частицы должны нести отрицательный заряд.

а) Число бета-частиц, испущенных за 50 суток, равно скорости испускания, помноженной на время:

$$1\cdot10^4\,\frac{\text{бета-частица}}{\text{с}}\cdot 50\text{ суток}\cdot\frac{24\text{ ч}}{\text{сутки}}\cdot\frac{3600\text{ с}}{\text{ч}} = 4{,}32\cdot10^{10}.$$

Бета-частицы унесли полный заряд, равный $4{,}32\cdot10^{10}$ отрицательных элементарных зарядов. Поэтому всякая бета-частица должна нести один отрицательный элементарный заряд, как и электрон.

б) Прежде чем сделать опрометчивый вывод о том, что бета-частицы идентичны электронам, необходимо сопоставить другие свойства (например, массу), но данный эксперимент, взятый в отдельности, дает основание выдвинуть подобную гипотезу.

ГЛАВА

28 ЭНЕРГИЯ И ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯДОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

В главе 28 рассматриваются кинетическая и потенциальная энергии отдельных заряженных частиц в электрических полях и вводятся понятия тока, ЭДС и разности потенциалов. Главным стержнем во всей главе остается движение элементарных зарядов.

Батареи в настоящей главе представляют собой по сути дела «черные ящики», поставляющие постоянное количество энергии единичному заряду. Наш атомистический подход кое-что подсказывает нам о том, что должно происходить в области зарядообменных реакций в элементе, но принцип действия элементов или устройство батарей нас пока особенно не интересует.

Краткое содержание главы 28

Раздел 28.1. Когда заряженная частица движется в постоянном электрическом силовом поле, работа, совершаемая полем, влечет за собой эквивалентное изменение кинетической энергии данной частицы. Массу частиц можно определить, измеряя скорость частиц с известным зарядом, приобретенную ими, когда они пролетели определенное расстояние в постоянном поле. Этим способом пользуются для измерения массы протона ($1{,}7 \cdot 10^{-27}$ кг) и электрона ($0{,}91 \cdot 10^{-30}$ кг). Рассматривается простая планетарная модель атома водорода (с протоном в роли Солнца и электроном в роли планеты).

Разделы 28.2, 28.3. Электрический ток в цепи рассматривается состоящим из числа положительных зарядов, проходящих за единичное время в одном направлении, и числа отрицательных зарядов, проходящих за единичное время в противоположном направлении. Полный постоянный ток в любой точке замкнутой цепи одинаков. Число элементарных зарядов, образующих ток, можно измерить по переносу массы ионов в растворе.

Разделы 28.4, 28.5. Результаты измерения количества превратившейся в теплоту энергии, когда движущиеся заряды сталкиваются с преградой, подтверждают ранее сделанный без доказательства вывод о том, что сила действия постоянного электрического поля на заряженную частицу не зависит от скорости движения частицы. Затем дается представление о батареях как устройствах, снабжающих элементарный заряд постоянным количеством энергии, обычно называемым ЭДС батареи. (Батарея на 270 В снабжает элементарный заряд энергией, равной $4{,}34 \cdot 10^{-17}$ Дж.) Если батареи соединить последовательно, то полная ЭДС батареи равна сумме ЭДС отдельных батарей. Батарея с ЭДС, равной $\mathcal{E}$, при подсоединении в цепь тока I, поставляет в цепь ежесекундно энергию со скоростью $I\mathcal{E}$ Дж/с (Вт).

Раздел 28.6. Количественно напряженность электрического поля в любой точке пространства определяется как приходящаяся на элементарный заряд сила,

действующая на отдельный положительный элементарный заряд, помещенный в данной точке. Электрическая потенциальная энергия двух зарядов, отстоящих друг от друга на расстоянии r, определяется по аналогии с гравитационным полем в виде

$$U_e = kq_1q_2/r.$$

Перепад электрического потенциала между двумя точками A и B определяется как энергия, приходящаяся на элементарный заряд, которую поле сообщает одному положительному элементарному заряду при его перемещении из A в B. Показывается, что эта разность потенциалов не зависит от пути, по которому заряд перемещался из A в B.

Раздел 28.7. Источником ЭДС батареи служит химическая энергия, освобождающаяся при химических реакциях взаимодействия компонентов элемента. Вводятся «практические» единицы ЭДС, заряда и тока: вольт, кулон, ампер: $1\ \text{В} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж/элем. зар., $1\ \text{Кл} = 6{,}25 \cdot 10^{18}$ элем. зар., $1\ \text{А} = 1$ Кл/с. Единица энергии (джоуль) определяется следующим образом:

$$1\ \text{В} \cdot \text{элем. зар.} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Дж} = 1\ \text{эВ};\quad 1\ \text{В} \cdot 1\ \text{Кл} = 1\ \text{Дж}.$$

Раздел 28.8 представляет собой краткое обобщающее описание, намечающее некоторые вопросы, которые рассматриваются в дальнейшем.

План изучения главы 28

В данной главе излагается весьма фундаментальный материал, требующий полной проработки на классных занятиях, подкрепленной решением задач.

В табл. 6 приведены возможные варианты плана по настоящей главе, согласующиеся с вариантами общего плана проработки части IV, приведенными в табл. 1 на стр. 284. Разделы, которые не нуждаются в особенно тщательной проработке или которые можно опустить без ущерба для связности изложения, заключены в квадратные скобки.

ТАБЛИЦА 6

Глава 28	10-недельный план изучения части IV			15-недельный план изучения части IV		
Разделы	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты
28.1	1	0	—	2	0	—
28.2, [28.3]	1	0	—	1	1	IV.7
28.4, [28.5], 28.6, [28.7, 28,8]	2	0	—	2	0	—

Дополнительные материалы к главе 28

Лаборатория. Опыт IV.7 *(Заряд, переносимый ионами в растворе)* предполагает количественный электролиз разбавленной серной кислоты с использованием медных электродов. Ставить этот опыт надо после проработки раздела 28.3. Указания к проведению опыта см. на стр. 498.

Домашние, классные и лабораторные задания. Ответы, решения и таблица классификации задач по степени их трудности приведены на стр. 343.

28.1. Определение масс электрона и протона

Цель. Показать, что массу заряженной частицы можно определить, измерив скорость, приобретенную частицей при прохождении известного расстояния в том или ином известном поле, поскольку мы в состоянии предсказать изменение кинетической энергии (скорости) заряженной частицы, которая движется в электрическом силовом поле.

Содержание. а) Если какая-то частица проходит путь d в направлении действия постоянной силы F, то совершенная работа Fd есть мера приращения кинетической энергии этой частицы, выражающейся в виде $mv^2/2$. Если первоначально такая частица находилась в покое, то $Fd=mv^2/2$.

б) Если нам известны сила F и путь d и мы сможем измерить скорость частицы, то массу этой частицы можно определить непосредственно.

в) Скорость элементарных заряженных частиц можно измерить с помощью осциллографа, который измеряет время, требующееся таким частицам для прохождения известного расстояния («время пролета»).

г) Как показывают другие опытные данные, всякий протон и всякий электрон несут на себе точно по одному элементарному заряду. Если результаты измерения «времени пролета» проанализировать с учетом только что отмеченного экспериментального факта, то окажется, что масса протона равна $1{,}7\cdot10^{-27}$ кг (точнее, $1{,}67\cdot10^{-27}$ кг), а масса электрона равна $0{,}9\cdot10^{-30}$ кг (точнее, $0{,}911\cdot10^{-30}$ кг).

д) Сравнив эти массы друг с другом и с известной массой атома водорода, можно прийти к планетарной модели атома водорода.

Методические указания. Как бы ни были важны представления, излагающиеся в этом разделе, особенно долго на них останавливаться не следует. Нужно подчеркнуть принцип измерения, а не его подробности. На данном этапе нет необходимости подробно рассматривать планетарную модель атома водорода, так как это делается в гл. 32 и 33.

Чтобы не затемнить главных моментов, на данной начальной стадии не дается точной формулировки ряда предпосылок, которые лежат в основе изложения материала раздела 28.1. Ради ясности пока их не следует разбирать в классе, так как некоторые из них рассматриваются несколько позже. Ниже перечислены такие предпосылки, чтобы вы заранее знали о них и были готовы ответить на возможные вопросы учащихся.

1. Мы предполагаем, что электрическая сила, действующая на заряженную частицу, которая движется между двумя плоскими металлическими пластинами, постоянна и *не зависит от скорости частицы*. Это положение не является самоочевидным, но может быть доказано экспериментально. Таким экспериментальным подтверждением может служить описанный в разделе 28.4 опыт, когда повышение тепловой энергии преграды, о которую ударяются движущиеся заряды, оказывается равным вычисленной кинетической энергии зарядов.

2. Мы предполагаем соблюдение закона сохранения энергии в микроскопическом масштабе, так что совершаемая над частицей работа идет фактически только на увеличение кинетической энергии частицы. Это подтверждается *всеми* известными экспериментальными данными.

3. Мы предполагаем, что кинетическая энергия частицы характеризуется выражением $mv^2/2$. Это выражение можно считать точным только тогда, когда частицы движутся со скоростями, которые малы по сравнению со скоростью света.

Трудность возникает при рассмотрении движения электрона в поле с большой разностью потенциалов. Пусть в этом опыте мы взяли батарею не на 90 В, а на 900 000 В. Какова должна быть конечная скорость электрона в таком опыте? Напишем, как и раньше,

$$Fd = mv^2/2.$$

Теперь F окажется в 10 000 раз больше, чем прежде, так что произведение $Fd = 1{,}44 \cdot 10^{-13}$ Дж/элем. зар. Если $m = 0{,}91 \cdot 10^{-30}$ кг, то измеренная скорость должна была бы составить

$$v = \sqrt{2Fd/m} = \sqrt{2{,}88 \cdot 10^{-13}/(0{,}91 \cdot 10^{-30})} = \sqrt{3{,}1 \cdot 10^{17}} = 5{,}6 \cdot 10^8 \text{ м/с},$$

т. е. быть вдвое больше скорости света. Поскольку такой вывод не согласуется с теорией относительности, где-то вкралась ошибка. В действительности измерения скорости показывают, что она несколько не достигает скорости света.

Ошибка скрыта в нашем выражении для кинетической энергии. По теории относительности кинетическая энергия равна не просто $mv^2/2$, а $(m — m_0)\, c^2/2$, где c есть скорость света ($3{,}00 \cdot 10^8$ м/с), m_0 — «масса покоя» частицы ($0{,}911 \cdot 10^{-30}$ кг), а m — релятивистская масса ($m_0/\sqrt{1 — v^2/c^2}$). Разрешив это выражение относительно v, найдем, что $v = 2{,}8 \cdot 10^8$ м/с, т. е. близка, но несколько меньше скорости света. (При малых скоростях, разумеется, релятивистское выражение для кинетической энергии и скорости согласуется с ньютоновской формулой.)

Опыт по определению времени пролета с целью измерения масс элементарных частиц основан на тех же принципах, на которых основаны опыты в гл. 23—25, когда мы интересовались энергиями макроскопических предметов. Если нам известны сила, действующая на тело, и отрезок пути, который это тело покрывает в направлении действия силы, то мы можем вычислить работу, совершенную над этим телом. Если верен закон сохранения энергии, то эта работа должна соответствующим образом изменить энергию тела, в данном случае его кинетическую энергию, так как ей некуда больше деваться. Здесь создается точно такая же ситуация, как и с диском из сухого льда или всяким иным предметом, ускоряемым постоянной силой. Если нам известны сила, отрезок пути и конечная скорость, мы сможем вычислить массу.

Для проведения демонстрационного опыта, аналогичного опыту, описанному в разделе 28.1 Учебника, цепь развертки осциллографа устанавливают так, чтобы горизонтальное перемещение электронного луча на экране трубки от одного конца до другого совершалось приблизительно за одну секунду. (На экране трубки диаметром 12,5 см луч движется со скоростью около 10 см/с). Затем по наклонному желобу, составленному из двух планок длиной 2 м, скатывают стальной шарик, который на своем пути вниз три раза замыкает электрическую цепь, создавая контакт между тремя парами листочков из алюминиевой фольги, как это показано на рис. 26. Когда замыкается первый зазор, включается цепь развертки осциллографа. Вскоре после этого катящийся шарик замыкает второй зазор, что приводит к моментальной подаче напряжения на пластины вертикального отклонения электронного луча при его горизонтальном перемещении, мгновенно создавая на экране пик. Этот пик отмечает момент прохождения шарика через второй зазор. Чуть позже шарик замыкает третий зазор, снова отклоняя луч.

Зная расстояние между вторым и третьим зазорами и скорость луча, можно вычислить среднюю скорость шарика по расстоянию между пиками на экране. Включение на входе цепи отклоняющих пластин осциллографа конденсатора в со-

четании с сопротивлением делает левую сторону пика крутой, а правую полого ниспадающей, как это имеет место для пиков, показанных на рис. 28.7. Когда шарик замыкает цепь в первый раз, конденсатор почти мгновенно заряжается от батареи, благодаря чему электронный луч весьма круто отклоняется вверх. Когда же движущийся шарик разомкнет цепь, заряжающее напряжение на конденсаторе снимется и конденсатор начнет разряжаться через сопротивление, заставляя электронный луч наклонно ниспадать к линии нулевого уровня. Если бы в цепи не было конденсатора, то луч осциллографа сходил бы вниз мгновенно.

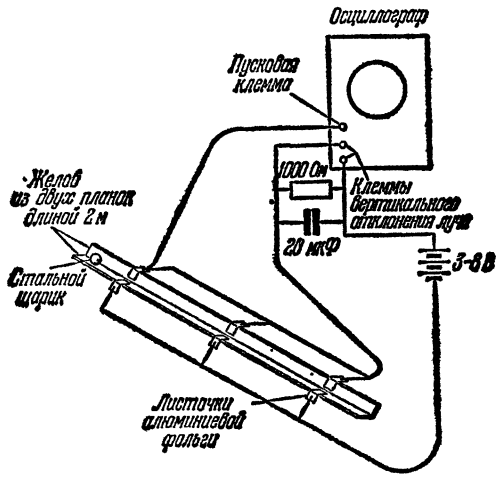


Рис. 26.

Постоянная времени для пары «конденсатор — сопротивление» составляет около 20 миллисекунд. Это дает основание пика длиной около 1 см, поскольку напряжение убывает практически до нуля за время, равное приблизительно пятикратной постоянной. Пик можно сделать острее, уменьшив постоянную времени. Этого можно достигнуть либо уменьшением емкости конденсатора, либо выбором меньшего сопротивления, либо же и тем и другим одновременно. Если пик сделать, слишком острым, то электронный луч станет отклоняться вверх и ниспадать столь быстро, что оставляемый им слабый след может оказаться невидимым для класса.

Напряжение, выбранное для разгона ионов или электронов, определяет кинетическую энергию, приобретаемую элементарной частицей. Отсюда следует, что мы измеряем массу, приходящуюся на элементарный заряд. На самом деле в любом эксперименте с заряженными частицами, движущимися в электрическом (магнитном или электромагнитном) поле, мы измеряем именно такую величину. Во всех подобных опытах мы измеряем фактически ускорение при таких обстоятельствах, когда нам известна сила, приходящаяся на элементарный заряд, а не на частицу. Чтобы определить саму массу, нам надо знать заряд из опытов совершенно иного характера. Для таких распространенных частиц, как электроны и протоны, это можно сделать прямым подсчетом частиц и измерением заряда, перенесенного потоком частиц (гл. 27). В случае менее распространенных частиц приходится прибегать к менее непосредственным способам. Так, плотность пузырьков

на треке пузырьковой камеры или плотность проявленных зерен на треке фотографической эмульсии зависит от заряда частицы, оставившей след (эта плотность зависит еще и от скорости частицы). Можно воспользоваться также и косвенными доводами. Наблюдая за расщеплением атома водорода на электрон и протон, мы приходим с учетом закона сохранения к выводу, что электрон и протон имеют одинаковые по величине, но противоположные по знаку заряды.

Результаты измерения масс электрона, протона и атома водорода дают основания полагать, что атом водорода состоит из протона и электрона. Отсюда явно напрашивается мысль об аналогии с Солнцем и гораздо более легкой планетой, тем более что существует сходство и в отношении центральной силы притяжения. Эта модель легко усваивается и не требует никакого обсуждения на данном этапе.

Определению скорости атомной или субатомной частицы по времени пролета исторически предшествовали опыты с отклонением частиц в магнитном поле. Этот вопрос рассматривается в гл. 30 и в данный момент обсуждению не подлежит, как бы вы ни собирались прорабатывать гл. 30. Полезно отметить, что времяпролетные измерения часто используются в ядерной физике. При открытии, например, отрицательных протонов эти частицы удалось отличить от других отрицательных частиц и определить их массу по результатам измерения их времени пролета на отрезке пути, составлявшем около 10 м. Их скорость была определена так же, как это делали мы. Другое измерение (на этот раз это было отклонение в магнитном поле) пришлось провести для того, чтобы определить массу, приходящуюся на единичный заряд. При этом оказалось необходимым установить, что частицы несли один и только один элементарный заряд.

Дополнительные задачи. А. Находившееся в покое тело ускоряется постоянной силой 2 Н, действовавшей на пути 2,5 м.

а) Если масса тела 3 кг, то какова будет его конечная скорость? (1,8 м/с.)

б) Сколько времени потребуется телу, чтобы покрыть расстояние 2,5 м? (2,8с.)

в) Если другое покоившееся тело разгонялось той же самой силой и на том же самом пути, развив конечную скорость 120 м/с, то какой массой обладало это тело? ($6{,}9 \cdot 10^{-4}$ кг.)

Б. В эксперименте, показанном на рис. 28.1, расстояние между пластинами увеличили с 9,3 до 18,6 мм, оставив их подключенными к 90-вольтовой батарее. Какова конечная скорость протона, пересекшего пространство между пластинами? ($1{,}31 \cdot 10^5$ м/с.) Электрона? ($5{,}6 \cdot 10^6$ м/с.) Иона кислорода, несущего двойной заряд? ($0{,}47 \cdot 10^5$ м/с.)

28.2. Электрический ток

28.3. Электролитическое измерение электрических токов

Цель. Дать количественное определение электрического тока через движущиеся элементарные заряды; показать, как можно измерять токи посредством электролиза.

Содержание. а) Электрические токи образуются движущимися элементарными зарядами. Направление тока определяют как направление движения положительных зарядов.

б) Полный ток есть сумма положительных зарядов, проходящих за одну секунду в одном направлении, с отрицательными зарядами, проходящими за одну секунду в противоположном направлении.

в) В замкнутой цепи при равновесных условиях ни в одной из ее точек накопления зарядов не происходит. Это означает, что в любой точке цепи полный ток одинаков.

г) Установлено, что масса того или иного элемента, осажденного в электролитической ванне, прямо пропорциональна количеству заряда, перенесенного через ванну. Количественные измерения показывают, что заряды, перенесенные

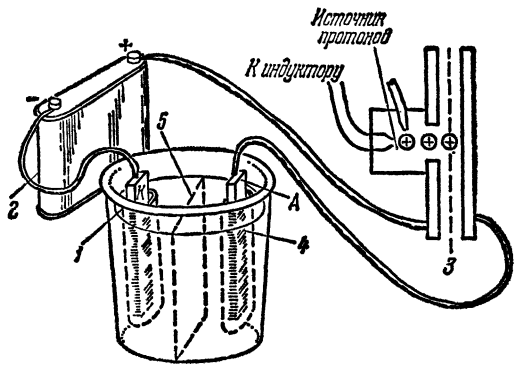


Рис. 27.

ионами в растворе, представляют собой небольшие целочисленные произведения элементарного заряда. Таким образом, измерение массы ежесекундно осаждающегося в электролитической ванне элемента определяет ток в ванне.

Методические указания. Учащиеся должны усвоить представление об электрическом токе как о движении элементарных зарядов. Если при этом данная тема не увязывается в единое целое с пройденным материалом по химии, то на подробностях электрохимических реакций нет необходимости задерживаться. При недостатке времени раздел 28.3 можно опустить или проработать заодно с опытом IV.7.

Отнюдь не исключено, что может оказаться полезным разобрать в классе связь между движением зарядов и током на различных участках цепи. Для этого целесообразно взять цепь, ток в которой на разных участках переносится неодинаковыми зарядами. Так, прибор,изображенный на рис. 28.1, можно включить в цепь, показанную на рис. 27. Как видно из рисунка, полярность батареи теперь обращена. (Обратите внимание на то, что разрядная катушка не привносит в цепь никаких зарядов.)

Предположив, что все ионы в электролитической ванне несут с собой единственный заряд и что ток силой, скажем, 10^6 элементарных зарядов в секунду течет в цепи по ходу часовой стрелки, поставим вопрос о том, с какой скоростью различные заряженные частицы пересекают поверхности *1*, *2*, *3*, *4* и *5*? Ответить на него нужно так:

1. Ежесекундно из раствора на катод переходит 10^6 положительных ионов, каждый из которых несет на себе один элементарный заряд. Ток течет справа налево.

2. Ежесекундно слева направо, т. е. в противоположном току направлении, переходит 10^6 электронов.

3. Ежесекундно слева направо, т. е. в направлении тока, переходит 10^6 протонов.

4. Ежесекундно через эту поверхность из раствора на анод, т. е. в противоположном току направлении, переходит 10^6 отрицательных ионов.

5. Отрицательные ионы пересекают поверхность слева направо, а положительные — справа налево. Единственное, что нам известно, сводится к следующему: число отрицательных ионов, пересекающих эту поверхность в сумме с числом положительных ионов, пересекающих эту же поверхность, составляет 10^6 частиц в секунду. Эта сумма может иметь слагаемыми, скажем, 400 000 отрицательных ионов и 600 000 положительных ионов в секунду или 700 000 отрицательных и 300 000 положительных ионов и т.п. Направление тока совпадает с направлением движения положительных ионов. (Раньше мы предположили, что все ионы, проходящие через ячейку, несут на себе единственный заряд.)

Обычно здесь учащиеся задают вопрос о знаках зарядов, образующих токи. Плохо ли это или хорошо, но уже давно было решено называть заряд протона положительным, а заряд электрона — отрицательным. Единственная разумная договоренность в отношении токов заключается в том, чтобы считать ток, поступающий в ту или иную область положительным, если следствием его является возрастание полного положительного заряда (или убыль полного отрицательного заряда). Это предполагает, что ток, образуемый отрицательными зарядами (электронами), течет в направлении, противоположном току.

Природа, по-видимому, предусмотрела равенство числа положительных зарядов во Вселенной числу отрицательных. При определенных обстоятельствах (ионная проводимость в твердых солях) электрические токи представляют собой движение преимущественно положительных зарядов. При иных условиях (электронная проводимость в металлах) ток образуется отрицательными зарядами. В некоторых случаях (в *p*-полупроводниках) ток фактически образуется переносимыми отрицательными зарядами, но его удобнее представлять себе как процесс переноса носителей положительного заряда («дырок»). Во всяком случае при описании всего спектра рассматриваемых электрических явлений отказ от существующей практики произвольного определения знаков «+» и «—» никаких выгод не сулит, хотя нередко приходится слышать предложения о таком пересмотре (обычно такие советы исходят от людей, которым приходится заниматься главным образом проводимостью электронов в металлах и вакуумных лампах).

Количественное изучение электрохимических реакций, подобное проведенному нами (см. рис. 28.11), позволяет нам определить заряд на ионах в растворе, показав, что все заряды представляют собой целочисленные кратные элементарного заряда (см. задачу 18). В этом главное при разборе явления электролиза. На данном этапе учащиеся могут и не знать, что серебро, например, существует в растворе в виде иона Ag^+, а медь в виде Cu^{++}. Они должны лишь знать, что сравнением с нормальным электродом можно определить заряд, который несет тот или иной ион. Если этот материал проходится одновременно с курсом химии, то вы, бесспорно, сможете значительно расширить изложение, рассмотрев подобные эксперименты с учетом химической валентности.

Дополнительная задача. Через соляную кислоту (HCl) в течение 1 минуты пропускали ток. За это время у отрицательного электрода накопилось всего 20 мг газа. Какова средняя сила тока, протекавшего через электролитическую ячейку? ($2 \cdot 10^{20}$ элементарных зарядов ежесекундно.)

28.4. Опыты Томсона. Превращения энергии. Электрическая сила. Элементарные заряды

Цель. Показать, что сделанные раньше предположения поддаются экспериментальной проверке (например, что все элементарные заряды одинаковы и что сила, испытываемая движущимся зарядом, не зависит от его скорости) непосредственным измерением кинетической энергии пучка движущихся зарядов.

Методические указания. Как бы ни было важно убедиться в экспериментальном подтверждении всех этих предположений, выделять для этого много классного времени нет необходимости.

Данный раздел можно рассмотреть в связи с решением задачи 18. Только путем количественного сравнения результатов электрохимических измерений и измерений по ускорению зарядов можно прийти к выводу о том, что все элементарные заряды в действительности одинаковы и неразличимы, если не считать их знака.

28.5. ЭДС и энергия, доставляемая батареей

Цель. Определить ЭДС батареи как энергию, доставляемую элементарному заряду.

Содержание. а) Теоретически батарея представляет собой устройство для превращения накопленной химической энергии в электрическую.

б) Батарея доставляет определенное количество энергии, приходящееся на элементарный заряд, в цепь тока. Так, батарея на 90 В доставляет в цепь $1{,}4 \cdot 10^{-17}$ Дж/элем. зар. энергии.

в) Энергия, доставляемая элементарному заряду в ионный пучок, разгоняемый от одной параллельной металлической пластины до другой, не зависит ни от расстояния между пластинами, ни от их площади, ни от силы тока, протекающего между пластинами.

г) Если батареи соединить последовательно, то полная ЭДС есть сумма ЭДС отдельных батарей.

д) Батарея с ЭДС, равной $\mathcal{E}$, через которую течет заряд q, доставляет в цепь общее количество энергии $q\mathcal{E}$; если ток (заряд в секунду) равен I, то батарея доставляет мощность (энергию в секунду) $I\mathcal{E}$. Если I измерить числом элементарных зарядов, протекающих в секунду, а $\mathcal{E}$ в Дж/элем. зар., то $I\mathcal{E}$ выразится в единицах Дж/с (Вт).

Методические указания. Как бы ни были важны эти представления, особенно глубоко прорабатывать их нет необходимости. Этот раздел можно проработать полностью как задание для домашнего чтения. Если данный материал не излагается параллельно с курсом химии, то целесообразно подробно не рассматривать химические реакции, фактически протекающие в батареях. В наших целях можно ограничиться рассмотрением батарей как «черных ящиков», доставляющих определенное количество энергии (ЭДС).

Полезно подчеркнуть сходство между фундаментальным экспериментом, описанным в разделе 28.4, и опытом, показанным на рис. 28.12 в данном разделе. В первом опыте электроны приобретают всю кинетическую энергию, доставляемую им батареей, которая подсоединена к двум пластинам, а затем ударяются о металлическую пластину, причем количество доставленной энергии измеряют по повышению температуры пластины. В опыте же, показанном на рис. 28.12, батарея также доставляет энергию электронам, но на этот раз электроны не разгоня-

ются в вакууме и не ударяются о пластину, а движутся в металлическом сопротивлении, передавая доставленную энергию атомам металла при соударениях с ними.

В данном случае измеряют тоже повышение температуры. В обоих случаях источником энергии служит батарея. Энергия доставляется электронам. Последние тормозятся материалом, который нагревается. Различие ограничивается только поведением электронов и логическим выводом, который делается по результатам опытов.

Дополнительные задачи. А. Одну батарею на 90 В и две батареи по 45 В соединяют последовательно, Каковы максимальная и минимальная ЭДС при подобном соединении? ($2{,}9 \cdot 10^{-17}$ Дж/элем. зар. и 0.)

Б. Батарея на 270 В служит источником тока силой 10^{17} элем.зар. /с, протекающего в течение 1 часа. На какую величину изменилась химическая энергия батареи? (Уменьшилась на $1{,}56 \cdot 10^{4}$ Дж. Этот ответ дан в пренебрежении поглощением теплоты и ее выделением, которые всегда сопровождают такой процесс.)

28.6. Электрическое поле и потенциал

Цель. Дать представления об электрическом поле и разности электрических потенциалов через взаимодействия элементарных заряженных частиц.

Содержание. а) Вектор электрического поля $\boldsymbol{E}$ определяется как сила, приходящаяся на элементарный положительный заряд. Электрическая сила $\boldsymbol{F}$, действующая на тело, которое несет q элементарных зарядов, равна $q\boldsymbol{F}$.

б) По закону Кулона электрическое поле $\boldsymbol{E}$ на расстоянии r от q_1 элементарных зарядов, сгруппированных в точке, равно kq_1/r^2 и направлено по радиусу от q_1.

в) Два точечных заряда q_1 и q_2, находящихся друг от друга на расстоянии r, обладают электрической потенциальной энергией U_e, равной kq_1q_2/r.

г) Электрическая потенциальная энергия, приходящаяся на элементарный заряд, называется электрическим потенциалом V; для точечного заряда q_1 потенциал V равен kq_1/r. Он равен кинетической энергии, которую приобрел бы элементарный заряд при переходе из точки с радиусом r в бесконечность.

д) Изменение электрической потенциальной энергии, когда элементарный заряд переходит из одной точки в другую, называют разностью потенциалов между этими точками.

е) Разность потенциалов зависит только от исходного и конечного положений элементарного заряда и не зависит от пути, по которому заряд перемещается между этими двумя точками.

Методические указания. Идея об электрической потенциальной энергии крайне важна и подлежит полному усвоению путем классных занятий и домашних заданий. Электрическое поле есть просто частный случай вектора электрической силы (теперь просто отнесенной к единичному заряду), который был рассмотрен раньше, и на данном этапе не требует особого внимания. Важную роль играет трехмерное изображение электрического потенциала (рис. 28.14). Оно используется в гл. 32.

Мы раньше пользовались представлением о том, что электрическая сила, действующая на заряженное тело, прямо пропорциональна его заряду. Так было, например, в опыте с микро-микровесами в разделе 28.1 и в других местах. На дан-

ном этапе требуется лишь пересмотреть известные ситуации в свете определения электрического поля. Сделать это можно, скажем, следующим образом:

1. Каково электрическое поле в приборе, показанном на рис. 28.1? ($1{,}55 \cdot 10^{-15}$ Н на элементарный заряд с направлением от положительной пластины к отрицательной.)

2. Каково электрическое поле в приборе, изображенном на рис. 28.2, в области справа от отклоняющих пластин? (Нулевое, потому что в этой области сила, действующая на элементарный заряд, равна нулю.)

3. Каким будет электрическое поле на расстоянии 10^{-10} м от протона? ($2{,}3 \cdot 10^{-8}$ Н/элем. зар. с направлением от протона.) Каково электрическое поле на расстоянии 10^{-10} м от электрона? ($2{,}3 \cdot 10^{-8}$ Н/элем.зар. с направлением к электрону.)

Представление об электрической потенциальной энергии необходимо развить полностью. Здесь, как и в других разделах Учебника, материал необходимо излагать в конкретных понятиях, иллюстрируя возникающие ситуации действительными движениями, отталкиваниями и притяжениями. Если материал излагать отвлеченно, то от понимания многих учащихся ускользнет действительная природа и способы использования идеи потенциальной энергии.

Два предмета с одноименными зарядами отталкиваются друг от друга. Если мы сближаем их, то нам приходится совершать работу. Что в таком случае происходит с запасом потенциальной энергии? Теряется ли потенциальная энергия? Предположим, что один предмет сохраняется неподвижным, а другой движется с некоторой заданной начальной скоростью к первому. Пусть у нас нет никаких других действующих сил. Тогда сила электрического отталкивания станет замедлять движущийся предмет. Куда исчезает кинетическая энергия, теряемая при замедлении движения тела? Можем ли мы ее получить опять. Учащиеся должны самостоятельно отвечать на подобные вопросы, исходя из собственного опыта с аналогичными ситуациями, в которых силы зависят только от расстояния.

Рассуждения подобного рода позволят нам прийти к выводу, что в случае одноименных зарядов существует электрическая потенциальная энергия, которая возрастает при сближении двух тел. Как вычислить приращение потенциальной энергии? Нужно найти работу, совершенную электрической силой. Если бы сила, действовавшая между двумя телами, оставалась постоянной при их сближении, то нам нужно было бы просто умножить силу на перемещение по направлению действия силы (т. е. на перемещение вдоль линии, соединяющей два заряда, которое равно как раз изменению расстояния между зарядами). Но эта сила не постоянна. Как находить работу, совершаемую переменной силой? Как мы это делали в случае с пружиной? Нужно найти площадь под кривой силы $F=kq_1q_2/r^2$ в функции расстояния r между исходным и конечным состояниями при r_1 и r_2. Нет необходимости подробно разбираться в данном вопросе, если это уже было сделано при прохождении материала части III. В данном случае можно было бы просто ограничиться приведением результата.

Если же выявится необходимость вычисления работы, совершенной переменной силой, то это лучше всего сделать применительно к конкретному случаю, скажем, для двух элементарных зарядов q_1 и q_2 и двух расстояний $r_1=1$ м и $r_2=2$ м. Нарисуйте или попросите учащихся нарисовать самостоятельно график изменения силы в зависимости от расстояния и попросите сравнить приблизительный ответ для U_e с результатом, даваемым формулой.

Взяв приведенное выше выражение для F, мы можем, вычислив силу при нескольких значениях расстояния между зарядами, построить график изменения силы в зависимости от расстояния для нашего случая (рис. 28, *а*):

при $r=1$ м $\quad F=k\dfrac{1\cdot 1}{1^2}=1{,}0\,k$,

$r=1{,}125$ м $\quad F=k\dfrac{1\cdot 1}{1{,}125^2}=0{,}79\,k$,

$r=1{,}375$ м $\quad F=k\dfrac{1\cdot 1}{1{,}375^2}=0{,}529\,k$,

$r=1{,}625$ м $\quad F=k\dfrac{1\cdot 1}{1{,}625^2}=0{,}378\,k$,

$r=1{,}875$ м $\quad F=k\dfrac{1\cdot 1}{1{,}875^2}=0{,}284\,k$,

$r=2$ м $\quad F=k\dfrac{1\cdot 1}{2^2}=0{,}25\,k$.

Разделим площадь под кривой на прямоугольники, сумма площадей которых приближенно выражает полную площадь под кривой. В нашем случае участок под кривой удобно разбить на четыре прямоугольника (рис. 28, *б*). Теперь мы

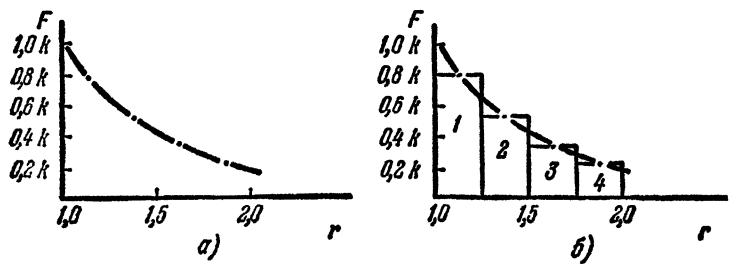


Рис. 28.

сможем вычислить работу $W=Fd$, совершенную на каждом промежутке, и найти всю работу (сумму площадей всех четырех прямоугольников):

$$\Delta W_1=F\,\Delta r=0{,}79k\cdot 0{,}25=0{,}198k,$$
$$\Delta W_2=F\,\Delta r=0{,}529k\cdot 0{,}25=0{,}132k,$$
$$\Delta W_3=F\,\Delta r=0{,}378k\cdot 0{,}25=0{,}094k,$$
$$\Delta W_4=F\,\Delta r=0{,}284k\cdot 0{,}25=0{,}071k;$$
$$W=0{,}495k.$$

Из уравнения потенциальной энергии в нашем случае находим, что

$$\Delta U_e=k\frac{q_1q_2}{r_1}-k\frac{q_1q_2}{r_2}=k\frac{1\cdot 1}{1}-k\frac{1\cdot 1}{2}=0{,}500k.$$

Если площадь под кривой делить на все более узкие прямоугольники, то сумма площадей последних станет все больше приближаться к 0,500 k.

Теперь мы в состоянии дать количественные ответы на все вопросы, которые мы поставили, приступая к обсуждению материала данного раздела. При этом сделать это целесообразно на численных примерах. Мы можем подсчитать работу,

которую нужно совершить при сближении двух зарядов. Она равна приращению электрической потенциальной энергии. Мы в состоянии подсчитать выигрыш кинетической энергии двух зарядов, если им позволить разлететься. Она равна убыли потенциальной энергии и т. д.

Вслед за этим примером нужно вкратце рассмотреть хотя бы один пример двух разноименных зарядов, которые уже притягиваются друг к другу, а не отталкиваются, как это было в первом случае. Следуя тем же рассуждениям, мы установим, что, поскольку работу по раздвиганию зарядов придется совершать внешним силам, электрическая потенциальная энергия должна быть тем больше, чем больше расстояние между разноименными зарядами. Однако алгебраическое выражение для потенциальной энергии уменьшается по абсолютной величине с ростом расстояния между зарядами. Таким образом, в случае зарядов разноименных знаков потенциальная энергия должна быть отрицательной для конечных значений расстояния между зарядами.

Если представление об отрицательной потенциальной энергии трудно поддается усвоению, то можно отметить, что здесь важны лишь изменения потенциальной энергии, а сама ее величина в данной точке пространства физического смысла не имеет. Данное положение можно проиллюстрировать на простом примере.

Пусть предмет с массой 2 кг падает с высоты 10 м над уровнем пола. Какова будет его кинетическая энергия перед самым ударом о пол? Выберем пол в качестве уровня нулевого значения потенциальной энергии. Тогда исходная потенциальная энергия будет равна $mgh_1 = 2 \cdot 9{,}8 \cdot 10 = 196$ Дж *). Поскольку конечный потенциал равен нулю, выигрыш кинетической энергии составит 196 Дж. Если теперь выкопать яму глубиной 10 м и дать упасть в нее предмету с уровня поверхности Земли, то у нас возникнет следующая ситуация: исходная потенциальная энергия равна нулю; конечная потенциальная энергия равна $mgh_2 = 2 \cdot 9{,}8 \cdot (-10) = -196$ Дж. Выигрыш в кинетической энергии равен убыли потенциальной энергии. Последняя, как и раньше, равна 0—(—196 Дж)=196 Дж. Смысл того, что потенциальная энергия на дне ямы составляет —196 Дж, заключается в том, что она на 196 Дж меньше, чем на уровне поверхности Земли.

---

*) Надо помнить о том, что в случае предметов, движущихся вверх и вниз у поверхности Земли, мы пользуемся выражением $U_g = mgh$ вместо $U_g = -Gmm_3/r$. Оно обеспечивает достаточную точность, потому что изменение потенциальной энергии при переходе с уровня h_1 на уровень h_2, если их измерять от точки у поверхности Земли (или r_1 и r_2 от центра Земли), выразится следующим образом:

$$\Delta U_g = mgh_2 - mgh_1,$$

или

$$\Delta U_g = (-Gmm_3/r_2) + (Gmm_3/r_1) = Gmm_3(1/r_1 - 1/r_2) = Gmm_3(r_2 - r_1)/r_1r_2.$$

Но $r_2 - r_1 = h_2 - h_1$, а когда $r_2 - r_1$ много меньше r_1, т. е. когда $r_1 \approx r_2$, мы вправе записать $r_1r_2 = r_1^2$. Следовательно,

$$\Delta U_g = Gmm_3(h_2 - h_1)/r_1^2.$$

Отсюда

$$g = Gm_3/r_1^2 \text{ и } \Delta U_g = mg(h_2 - h_1).$$

Нужно затратить 196 Дж работы, чтобы поднять массу 2 кг на произвольно выбранный нулевой уровень потенциальной энергии.

Наконец, надо отметить, что уравнение $U_e = kq_1q_2/r$ дает правильный знак как для одноименных, так и для разноименных зарядов, если записать как величину, так и знак зарядов q_1 и q_2. Однако учащимся лучше определять знак путем простых физических рассуждений, для чего нужно ответить на следующий вопрос: Расходуется или же освобождается энергия, если заряды, находившиеся в исходном состоянии на бесконечном удалении, сблизить друг с другом?

Дополнительные задачи. А. Электрическое поле на расстоянии 10^{-10} м от точечного заряда q равно $6{,}9 \cdot 10^{-8}$ Н/элем. зар. и направлено к заряду q.

а) Какова величина заряда q? (—3 элем. зар.)

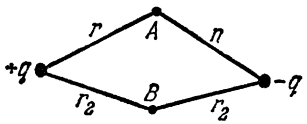


Рис. 29.

б) Каково электрическое поле на расстоянии $3 \cdot 10^{-10}$ м от q? ($^1/_9 \cdot (6{,}9 \cdot 10^{-8}$Н/элем. зар.) с направлением к заряду q.)

в) Каков электрический потенциал на расстоянии 10^{-10} м от q? (—$6{,}9 \cdot 10^{-18}$ Дж/элем. зар.)

г) Какова работа, которую надо совершить, чтобы подвести единичный элементарный отрицательный заряд из бесконечности в точку, отстоящую на расстоянии 10^{-10} м от заряда q? ($6{,}9 \cdot 10^{-18}$ Дж.)

Б. При сформулированных в задаче А условиях определить, какую работу надо совершить, чтобы переместить заряд, состоящий из трех положительных элементарных зарядов, из точки, отстоящей на расстоянии 10^{-10} м от q, в точку, отстоящую от него на расстоянии $3 \cdot 10^{-10}$ м? ($1{,}38 \cdot 10^{-17}$ Дж.)

В. Точки A и B находятся на одинаковом расстоянии от двух равных разноименных зарядов (рис. 29). Каков электрический потенциал в A? (Нулевой.) Какую работу надо совершить, чтобы переместить заряд q из A в B? (Никакой.)

28.7. Батареи. Вольты и амперы

Цель. Ознакомить с вольтом, кулоном и ампером как «практическими» электрическими единицами.

Содержание. а) В батареях химическая энергия превращается в электрическую потенциальную энергию; элемент доставляет определенную энергию на элементарный заряд до тех пор, пока химический состав и температура остаются неизменными.

б) ЭДС батарей удобно измерять в вольтах; 1 В = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж/элем. зар.

в) Заряды можно измерять в кулонах; 1 кулон (Кл) равен $6{,}25 \cdot 10^{18}$ элем. зар.

г) Ток удобно измерять в амперах; 1А=1 Кл/с.

д) ЭДС (вольты)·заряд (кулоны) = энергия (джоули); ЭДС (вольты)·ток (амперы)=мощность (ватты).

е) Электрон-вольт ($1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж) есть удобная мера энергии в атомарном масштабе.

Методические указания. Учащиеся должны знать практические единицы, но прорабатывать данный раздел рекомендуется в основном как домашнее задание, выделив для этого совсем немного классного времени.

Здесь полезно вспомнить некоторые известные вещи. Опыты с микро-микровесами показывают, что энергия, сообщенная элементарному заряду, который пересекает пространство между пластинами, зависит только от батареи, подсоеди-

ненной к пластинам, но не зависит от расстояния между пластинами. Можно было бы поставить даже более прямой опыт по измерению кинетической энергии, приобретенной электронами, определив при этом их заряд. Это даст непосредственно разность потенциалов. Как бы мы ни изменяли расстояние между пластинами, их площадь и форму, но если к пластинам присоединена батарея на 90 В, то электроны всегда приобретают кинетическую энергию $1{,}44 \cdot 10^{-17}$ Дж/элем. зар. Оба металлических электрода имеют такой же потенциал, что и зажимы батареи, к которым они подключены. Батарея на 90 В поддерживает разность потенциалов в $1{,}44 \cdot 10^{-17}$ Дж /элем. зар.

Данное утверждение представляет собой экспериментальный факт. Отсюда следует, что когда один положительный заряд переносится внутри батареи с отрицательного полюса на положительный, он приобретает такое количество электрической потенциальной энергии, которое равно ЭДС. Батарея подает электрическую энергию (qV, когда перенесено q элементарных зарядов). Если соединить последовательно несколько батарей, их разности потенциалов складываются. Это можно понять, представив себе, что через каждую батарею по очереди переносится один (или несколько) элементарный заряд. Каждый раз такой заряд увеличивает свою электрическую потенциальную энергию на определенное количество, которое характерно для батареи. Полное приращение энергии находят суммированием отдельных приращений.

Большинству учащихся известно, что свет от автомобильных фар ослабевает, когда водитель нажимает на кнопку стартера. По-видимому, подключение стартера к аккумулятору изменяет разность потенциалов на клеммах аккумулятора. Грубо говоря, ЭДС элемента не меняется, но приходящаяся на элементарный заряд энергия во внешней цепи становится при включении стартера меньшей долей $\mathcal{E}$. Включение стартера представляет собой почти короткое замыкание, а при идеальном коротком замыкании (соединении положительного полюса аккумулятора с отрицательным) вся подаваемая энергия рассеивается внутри элемента (нагревает его). Тогда разность потенциалов между полюсами (являющимися частями единого хорошего проводника) становится практически равной нулю. Если же мы подключаем приборы, отбирающие лишь небольшой ток (бобину зажигания, фары, радиоприемник), то потенциал батареи почти равен ЭДС. Разницу между $\mathcal{E}$ и разностью потенциалов на полюсах элемента легко понять после прохождения гл. 29. Однако данный момент большой роли не играет.

28.8. Состояние вопроса, рассмотренного в данной главе

Цель. Подчеркнуть, что пройденный в предшествующих разделах материал не позволяет охарактеризовать силы, действующие между двумя зарядами, когда оба они находятся в движении. Обобщить пройденный материал и рассказать вкратце о том, о чем речь пойдет дальше.

Методические указания. Проработать данный раздел в качестве домашнего задания.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам

В табл. 7 задачи распределены по степени их трудности и по разделам, к которым они относятся. Отдельно выделены задачи, предназначающиеся для разбора в классе. Задачи, рекомендуемые к первоочередному решению, отмечены значком #.

ТАБЛИЦА 7

Разделы	Со звездочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
28.1	1, 3	2#, 4	5#		5#
28.2	6, 7	9	8#, 10#		8#, 10#
28.3	11	12			
28.4, 28.5	13, 14, 19, 20	16	17#, 18	27	18
28.6	21, 22		25, 26		26
28.7	28—30	15, 24	23		15

Краткие ответы

1*. $5{,}6\cdot10^{-17}$ Дж.
3*. $7{,}64\cdot10^{-6}$ с.
6*. $2\cdot10^{16}$ элем. зар./с.
7*. $3{,}6\cdot10^{16}$ элем. зар./с.
11*. $4{,}5\cdot10^{22}$ атомов меди.
13*. $2{,}9\cdot10^{-17}$ Дж.
14*. $2{,}7\cdot10^{-26}$ кг.
19*. $4{,}2\cdot10^{-14}$ Н.
20*. 1,7 Дж/с = 1,7 Вт.
21*. Потенциальная энергия U на расстоянии r равна $kq\cdot1$ элем.зар./r. Вся эта энергия будет сообщена движущемуся заряду в виде кинетической энергии, когда он окажется на бесконечном удалении.
22*. $E=9\cdot10^{-18}$ Н/элем. зар.с направлением к телу; $V=-5\cdot10^{-18}$ Дж/элем.зар.
28*. $1{,}9\cdot10^{-18}$ Дж/элем. зар.= 12 В.
29*. 5 А.
30*. 14 эВ.

Ответы с указаниями и решениями

2. Эта задача иллюстрирует применение закона сохранения энергии к движению заряженных частиц в постоянном поле. Один из способов решения данной задачи заключается в следующем.

а) Вычислим сначала силу, действующую на ион кислорода, воспользовавшись результатами опыта Милликена (см. раздел 27.7). Как было установлено в этом опыте, три батареи на 90 В каждая при последовательном подсоединении к пластинам с расстоянием между ними 0,31 см действует на элементарный заряд с силой $1{,}4\cdot10^{-14}$ Н.

Поскольку сила действия заряженных параллельных пластин на ион, находящийся в пространстве между ними, прямо пропорциональна числу последовательно соединенных батарей и заряду иона и обратно пропорциональна расстоянию между пластинами, сила действия пластин с промежутком между ними 6,2 см при подсоединении к ним двух батарей на 90 В на двукратно ионизованный атом кислорода составит

$$F=(1{,}4\cdot10^{-14}\text{ Н})\cdot{}^{2}/_{3}\cdot2\cdot(0{,}31\text{ см}/6{,}2\text{ см})=9{,}3\cdot10^{-16}\text{ Н}.$$

Если ион кислорода пройдет все расстояние, равное 6,2 см, между пластинами, совершенная электрической силой работа составит

$$(9{,}3\cdot10^{-16}\text{ Н})\cdot0{,}062\text{ м}=5{,}8\cdot10^{-17}\text{ Дж}.$$

Так как ион в начальный момент не обладал никакой кинетической энергией, эта величина и будет его кинетической энергией, когда он достигнет отрицательно заряженной пластины.

б) Если ион начнет двигаться с полпути между пластинами, то он пройдет только половину расстояния между ними, т. е. 3,1 см. Поэтому работа, совершенная

электрической силой, и следовательно, приобретенная этим ионом кинетическая энергия, составит

$$(9{,}3\cdot10^{-16}\ \text{Н})\cdot 0{,}031\ \text{м}=2{,}9\cdot10^{-17}\ \text{Дж}.$$

После прохождения главы эту задачу можно решить и другим способом.

Если разность потенциалов между двумя пластинами составляет 180 В, то элементарный заряд приобретает при прохождении от одной пластины к другой кинетическую энергию 180 эВ.

а) Таким образом, ион кислорода с двойным зарядом приобретает при прохождении от одной пластины к другой энергию 360 В.

б) Поскольку электрическое поле между двумя такими пластинами постоянно, разность потенциалов окажется распределенной равномерно. Поэтому при прохождении полпути ион кислорода с двойным зарядом приобретает энергию 180 эВ.

4. На шкале нашего осциллографа 10 см=0,5 с, т. е. 1 см=0,05 с. Если пики на экране осциллографа следуют друг за другом через 8 см, то промежуток между ними должен составлять 8 см·0,05 с/см=0,4 с. Так как шарик проходит за это время 1,2 м, его скорость $v=1{,}2$ м/0,4 с=3 м/с.

5. а) Если ионы несут единичный заряд, то они приобретают такую же кинетическую энергию, как и протоны, т. е.

$$mv^2/2=m_{\text{п}}v_{\text{п}}^2/2.$$

Поскольку время пролета в 1,4 раза больше, чем для протонов, $v/v_{\text{п}}=1/1{,}4$. Отсюда можно заключить, что

$$m/m_{\text{п}}=(v_{\text{п}}/v)^2\approx 2.$$

Следовательно, при однократной ионизации масса тяжелого водорода должна составлять около 2 а. е. м.

б) Если же ионы несут двойной заряд, то приобретенная ими кинетическая энергия должна быть вдвое больше, чем у протонов, т. е.

$$mv^2/2=2\cdot m_{\text{п}}v_{\text{п}}^2/2.$$

Следовательно,

$$m/m_{\text{п}}=2\cdot(v_{\text{п}}/v)^2\approx 4.$$

В таком случае масса иона должна составлять 4 а. е. м.

в) Экспериментальные данные согласуются с предположением о существовании двукратно (но не однократно) ионизованных ионов гелия, потому что масса Не равна 4 а. е. м. Они согласуются также с предположением о существовании иона водорода, масса которого вдвое превосходит массу обычного водорода. Этот изотоп водорода называют дейтерием (по аналогии с протонами, ионы которых именуются дейтеронами).

8. Эта задача показывает, что полный ток в любой точке цепи выражается суммарным потоком положительных зарядов (в направлении тока) и отрицательных зарядов (текущих в противоположном направлении) за единицу времени.

В данной задаче нас интересует только равновесное течение тока. В стационарном режиме положительные и отрицательные ионы создаются рентгеновским пучком попарно, т. е. в одинаковом количестве за единицу времени. Положительные ионы потекут к отрицательно заряженной пластине направо, а отрицательные ионы — к положительно заряженной пластине налево. Если не происходит рекомбинации ионов, то все заряды дают вклад в ток, который, таким образом, будет равен числу ежесекундно возникающих ионных пар. При рекомбинации полный ток будет меньше, но число положительных зарядов, поступающих на правую пластину, опять-таки должно быть равно числу отрицательных зарядов, ежесекундно ударяющихся о левую пластину. В любом случае ток выразится числом зарядов, ежесекундно ударяющихся об обе пластины.

а) Направление тока задается направлением движения положительных зарядов, т. е. в данном случае ток течет слева направо.

б) Ток должен быть равен числу положительных зарядов, ежесекундно притекающих к отрицательной пластине, оставаясь одинаковым повсюду в цепи. Таким образом, число положительных зарядов, ежесекундно ударяющихся об отрицательную пластину, должно составлять 10^{16} элементарных зарядов в секунду.

в) На отрицательную пластину *из трубки* не поступает никаких отрицательных зарядов, но внешняя цепь должна доставлять отрицательные заряды в числе, равном числу ежесекундно поступающих на пластину положительных зарядов. Следовательно, поток отрицательных зарядов к отрицательно заряженной пластине *из внешней цепи* составляет 10^{16} элементарных зарядов в секунду.

г) В плоскости на полпути между пластинами ток должен складываться из двух численно равных потоков положительных и отрицательных зарядов в противоположных направлениях. Таким образом, число положительных зарядов, пересекающих данную плоскость в правом направлении, должно быть равно половине тока, т. е. составлять ежесекундно $5 \cdot 10^{15}$ элементарных зарядов. Если всякий ион несет на себе n элементарных зарядов, то ток положительных ионов должен составлять $5 \cdot 10^{15}/n$ элементарных зарядов в секунду.

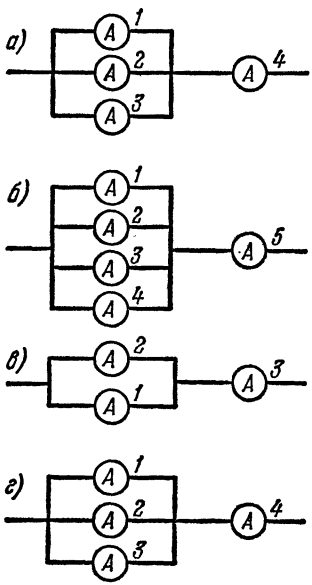


Рис. 30.

9. Если два амперметра соединить последовательно и включить в цепь, то через оба прибора потечет одинаковый ток. Снимая показания с проградуированного амперметра, можно соответственно наносить метки на шкалу второго прибора.

Меняя число последовательно соединенных батарей, можно менять силу тока, нанося каждый раз соответствующую метку на шкалу второго прибора. Если она окажется линейной, то интерполированием легко найти другие метки.

В данной задаче нас не интересует возможность того, что при хорошей проводимости металлической проволоки сила тока может превысить измеряющую способность амперметра.

10. а) При соединении приборов, показанном на рис. 28.16, через каждый из амперметров, которые соединены параллельно, потечет половинный ток, прошедший через третий амперметр. Ток в последнем составит 2А, если через каждый из двух соединенных параллельно приборов течет ток силой 1А. Отрегулируем реостат таким образом, чтобы через каждый из двух параллельно соединенных приборов протекал ток 1А, и нанесем на шкале третьего амперметра метку 2А.

б) Если ползун реостата установить так, что по амперметрам *1*, *2* и *3* потекут токи силой по 1А (рис. 30, *а*), то полный ток через амперметр *4* составит 3А. Подобным же образом параллельное включение четырех амперметров при токе 1/А в каждом даст ток 4А в пятом амперметре (рис. 30, *б*). Еще одна возможность заключается в том, чтобы один амперметр соединить последовательно с двумя другими параллельно соединенными амперметрами. Отрегулировав цепь таким образом, чтобы через каждый из параллельно соединенных амперметров протекал ток 2А, как это уже было сделано в п. а), обеспечим протекание через последовательно включенный амперметр тока силой 4А.

в) Если токи отрегулировать таким образом, чтобы через амперметр *3* протекал ток 1А (рис. 30, *в*), то через приборы *1* и *2* потекут токи силой по $^1/_2$А (это позволит нанести соответствующую метку на шкале).

Если прибор *4* покажет ток 1А (рис. 30, *г*), то в трех остальных амперметрах потекут одинаковые токи силой по $^1/_3$А.

12. а) Каждый ион серебра несет на себе один элементарный заряд. Чтобы найти число элементарных зарядов, ежесекундно протекающих в цепи, разделим все число атомов серебра, отложившихся на отрицательном электроде, на время, за которое они на нем отложились. Это дает

$$\frac{1{,}92\ \text{г}}{108\ \text{г/моль}} \cdot \frac{6{,}02 \cdot 10^{23}\ \text{атомов/моль}}{1800\ \text{с}} = 5{,}94 \cdot 10^{18}\ \text{атомов/с},$$

т. е. $5{,}94 \cdot 10^{18}$ элементарных зарядов в секунду.

б) Нулевой точке на шкале амперметра соответствует отсутствие тока зарядов, а ряд других точек на шкале в интервале действия прибора можно установить рассмотренным выше способом, определив при этом, носит ли перемещение стрелки линейный характер. Если такая линейность установлена, то шкалу можно разделить на равные участки в полном диапазоне действия амперметра с использованием градуировочных точек для определения ширины каждого участка.

15. а) Энергия, сообщенная электрону, который переместился из одной точки в другую с разностью потенциалов 100 В, запишется в виде

$$q\Delta V = 1\ \text{элем. зар.} \cdot 100\ \text{В} = 100\ \text{эВ} = 1{,}6 \cdot 10^{-17}\ \text{Дж}.$$

б) Напряженность электрического поля есть сила, приходящаяся на элементарный заряд, т. е. F/q. Так как приобретенная зарядом энергия равна произведению силы на длину пройденного им под действием этой силы пути, т. е. $q\Delta V = Fd$, напряженность электрического поля можно выразить следующим образом:

$$E = F/q = (q\,\Delta V/d)/q = \Delta V/d.$$

Напряженность электрического поля в области между A и B равна

$$E_{AB} = \frac{100\text{В}}{1 \cdot 10^{-2}\ \text{м}} \cdot \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Дж/элем. зар.}}{1\text{В}} = 1{,}6 \cdot 10^{-15}\ \text{Н/элем. зар.}$$

Поле направлено от положительной пластины B к отрицательной пластине A.

Найдем теперь напряженность электрического поля на участке от B до C:

$$E_{BC} = \frac{200\text{В}}{5 \cdot 10^{-3}\ \text{м}} \cdot \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Дж/элем. зар.}}{1\text{В}} = 6{,}4 \cdot 10^{-15}\ \text{Н/элем. зар.}$$

Поле имеет направление от пластины B к пластине C.

в) Поскольку повсюду между пластинами напряженность электрического поля одинакова, потенциал на полпути между B и C на 100 В меньше, чем у B. Когда электроны прибывают к этой отметке на полпути, они отдадут все 100 эВ кинетической энергии, приобретенной ими при движении от A до B, так что здесь начнется их обратное притяжение к B. Если они ударятся на этом пути или позднее о B, то отдадут в виде теплоты 100 эВ энергии, которую они приобрели вновь.

16. Так как одна батарея на 90 В сообщает элементарному заряду $1{,}4 \cdot 10^{-17}$ Дж энергии, две батареи по 90 В каждая снабдят двукратно ионизованный атом таким количеством энергии, которое выражается в виде

$$2 \cdot 2 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-17}\ \text{Дж} = 5{,}6 \cdot 10^{-17}\ \text{Дж}.$$

(Приближенно это тот же самый ответ, который мы нашли иным способом при решении задачи 2.) Если всякий ион передает пластине всю свою энергию при соударении с ней, то число ионов, необходимое для подвода к пластине 1 Дж энергии, найдется следующим образом:

$$N = 1\ \text{Дж}/(5{,}6 \cdot 10^{-17}\ \text{Дж/ион}) = 1{,}8 \cdot 10^{16}\ \text{ионов}.$$

Наиболее распространенные ионы кислорода заряжены отрицательно, но если судить по направлению движения наших ионов, то они должны быть заряжены положительно.

17. Величина силы, действующей на элементарный заряд, зависит только от расположения пластин и батареи, а расстояние, проходимое в направлении дейст-

вия силы, одинаково для электронов и ионов. Так как в обоих направлениях проходит одинаковое число элементарных зарядов, сообщаемая ими каждой пластине энергия также одинакова.

Если рассмотреть подробнее, то надо сказать, что сила действия на электроны по направлению к положительно заряженной пластине равна по величине половине силы действия на ионы по направлению к отрицательно заряженной пластине (мы имеем дело только с положительными ионами кислорода, а не с более распространенными отрицательными его ионами), потому что электроны несут на себе по одному элементарному заряду, а у ионов таких зарядов по два. Начав движение с полпути между пластинами, электроны и ионы покрывают одинаковое расстояние, но, поскольку на электроны действует в два раза меньшая сила, чем на ионы, электроны приобретают соответственно в два раза меньшую кинетическую энергию, чем ионы. При образовании одного иона освобождаются два электрона, поэтому кинетическая энергия, приобретенная двумя электронами, равна кинетической энергии, приобретенной одним ионом кислорода. Отсюда следует, что количество энергии, сообщенной положительной заряженной пластине, равно ее количеству, доставленному отрицательно заряженной пластине положительными ионами. В данном конкретном случае обе эти энергии равны 1 Дж.

18. Чтобы ответить на данный вопрос, нужно внимательно перечитать разделы 28.1—28.4.

Все данные — от опыта Милликена, измерений времен пролета и до электролитических ванн — показывают, что сила, действующая на любую заряженную частицу в заданном электрическом поле, есть точное произведение какого-то целого числа на некую наименьшую величину. Это возможно только в том случае, когда все элементарные заряды одинаковы, если отвлечься от массы или любого другого свойства заряженной частицы и способа, посредством которого образовался заряд.

К данным другого происхождения надо отнести нейтральность атомов и молекул, а также проведенные в разделе 28.4 рассуждения, которые можно получить просто с проволочным нагревателем и батареей, проградуированной в опыте Милликена, а также амперметра, проградуированного электролитически.

23. а) Гравитационные силы, действующие на электрон и протон, имеют направление вниз и выражаются произведением массы на напряженность поля тяготения. Следовательно, действующая на протон гравитационная сила равна

$$(1{,}67\cdot 10^{-27}\ \text{кг})\cdot 9{,}8\ \text{Н/кг} = 1{,}6\cdot 10^{-26}\ \text{Н};$$

действующая на электрон гравитационная сила равна

$$(9{,}1\cdot 10^{-31}\ \text{кг})\cdot 9{,}8\ \text{Н/кг} = 8{,}9\cdot 10^{-30}\ \text{Н}.$$

Поскольку и электрон, и протон несут на себе по одному элементарному заряду, действующие на них электрические силы одинаковы по величине, но для отрицательно заряженного электрона такая сила направлена вверх, а для положительно заряженного протона — вниз. Работа, которую надо совершить над зарядом q на пути с разностью потенциалов ΔV, равна перепаду потенциальной энергии системы, т. е. $W = Fd = q\Delta V$. Отсюда

$$F = q\,\Delta V/d = 1\ \text{элем. зар.}\cdot(2\cdot 10^{4}\text{В})/0{,}2\ \text{м};$$

но нам известно, что $1\ \text{В} = 1{,}6\cdot 10^{-19}$ Дж/элем.зар.; следовательно,

$$F = \frac{1\ \text{элем. зар.}\cdot(2\cdot 10^{4}\cdot 1{,}6\cdot 10^{-19}\ \text{Дж/элем. зар.})}{0{,}2\ \text{м}} = 1{,}6\cdot 10^{-14}\ \text{Н}.$$

Это — огромная величина по сравнению с гравитационными силами.

б) Электрическое поле между параллельными пластинами не зависит от положения. Гравитационное поле Земли тоже по существу не меняется при дополнительном удалении от центра Земли всего на 1 см. Это означает, что как электрическая, так и гравитационная силы *останутся неизменными*.

в) Эту часть задачи лучше всего, вероятно, рассмотреть, обратившись к аналогии между однородным гравитационным полем и однородным электрическим полем.

Чтобы переместить протон вверх на 0,01 м, преодолевая противодействие направленной вниз гравитационной силы в $1{,}6\cdot10^{-26}$ Н, потребуется работа действующей вверх силы, равная $(1{,}6\cdot10^{-26}\text{Н})\cdot 0{,}01\text{ м}=1{,}6\cdot10^{-28}$ Дж. Подобным же образом, чтобы переместить протон вверх на 0,01 м, преодолевая противодействие направленной вниз электрической силы в $1{,}6\cdot10^{-14}$ Н, необходима работа силы, направленной вертикально вверх, равная $(1{,}6\cdot10^{-14}\text{ Н})\cdot10^{-2}\text{м}=1{,}6\cdot10^{-16}$ Дж. Таким образом, энергия протона изменится следующим образом: гравитационная потенциальная энергия возрастет на $1{,}6\cdot10^{-28}$ Дж, тогда как прирост электрической потенциальной энергии составит $1{,}6\cdot10^{-16}$ Дж.

Изменения энергии электрона находят таким же образом: его гравитационная потенциальная энергия *увеличится* на $(0{,}89\cdot10^{-29}\text{Н})\cdot10^{-2}\text{м}=8{,}9\cdot10^{-32}$ Дж; электрическая потенциальная энергия электрона *уменьшится* на $1{,}6\cdot10^{-16}$ Дж. Уменьшение электрической потенциальной энергии электрона объясняется тем, что электрон движется в направлении действия электрической силы.

24. Данная задача, как и следующая за ней, требует при вычислении электрической потенциальной энергии обращения к закону сохранения энергии. Эта задача представляет собой упрощенную картину ядерного деления, полезную лишь при расчетах порядка величин.

Поскольку на два осколка действуют только электрические силы отталкивания со стороны одного из них на другой, электрическая потенциальная энергия взаимодействия двух осколков вместе с суммой их энергий остается постоянной величиной. Когда осколки разлетаются, их потенциальная энергия убывает с соответствующим возрастанием суммы кинетических энергий. Вычислим исходную потенциальную энергию:

$$U_e=\frac{kZ_1Z_2}{r}=\frac{(2{,}3\cdot10^{-28}\text{ Н}\cdot\text{м}^2)\cdot 42\cdot 50\text{ (элем. зар.)}^2}{(\text{элем. зар.})^2\cdot10^{-14}\text{ м}}\approx 5\cdot10^{-11}\text{ Дж}=300\text{ Мэв}.$$

Эта потенциальная энергия целиком преобразуется в кинетическую энергию осколков, если исходить из нашей простой модели. На самом деле какая-то доля этой энергии расходуется на возбуждение осколков и очень незначительная ее доля — на извлечение нескольких свободных нейтронов, которые также освобождаются в большинстве случаев реакций деления ядер.

25. а) Исходная потенциальная энергия протонов, обусловленная действием кулоновской силы, равна

$$U_e=\frac{kq_1q_2}{r}=\frac{(2{,}3\cdot10^{-28}\text{ Н}\cdot\text{м}^2)\cdot(\text{элем. зар.})^2}{(\text{элем. зар.})^2\cdot10^{-10}\text{ м}}=2{,}3\cdot10^{-18}\text{ Дж};$$

здесь потенциальная энергия при большом (бесконечном) удалении считается равной нулю. Конечная потенциальная энергия равна нулю. Поскольку исходная кинетическая энергия была равна нулю, конечная кинетическая энергия равна $2{,}3\cdot10^{-18}$ Дж.

Каждый протон обладает половиной всей кинетической энергии (по закону сохранения количества движения), так что кинетическая энергия каждого протона приблизительно равна $1{,}2\cdot10^{-18}$ Дж.

Энергии элементарных частиц часто выражают в электрон-вольтах. Поскольку $1\text{ эВ}=1{,}6\cdot10^{-19}$ Дж, находим, что сумма кинетических энергий $=(2{,}3\cdot10^{-18})/(1{,}6\cdot10^{-19})=14{,}4$ эВ.

б) Поскольку накопления или рассеяния энергии не происходит, движущийся протон должен нести на себе всю кинетическую энергию, равную $2{,}3\cdot10^{-18}$ Дж. Закрепленный протон не движется, и *его кинетическая энергия равна нулю*.

26. а) Батарея сообщает двум пластинам заряды противоположного знака, так что они притягивают друг друга, причем B движется к A. Пружина сжимается и оказывает противодействие пластине B, но поначалу электрическое притяжение превосходит противодействие пружины, так что пластина B движется с ускорением. Когда сила действия пружины уравнивается с электрическим притяжением, результирующая сила действия на пластину B равна нулю и какое-то мгновение она движется с постоянной скоростью. За этой точкой сила действия пружины превосходит электрическое притяжение, так что пластина B начинает замедляться, останавливается и возвращается назад. Она опять приходит в состояние покоя

в отправной точке, еще раз начинает притягиваться пластиной A и так продолжает совершать колебательное движение.

Если вам захочется проанализировать ситуацию дальше, то нужно предположить, что пластины имеют большую площадь и расположены близко друг к другу. Тогда можно воспользоваться изложенными на стр. 40 рассуждениями о конусе для того, чтобы утверждать, что электрическое поле у пластины B, создаваемое зарядами на пластине A, не зависит от расстояния между этими пластинами. Следовательно, сила электрического действия на пластину B постоянна. Упругая сила пружины пропорциональна расстоянию, на которое пластина B сместилась из исходного положения. Пластина B движется под совокупным действием постоянной электрической силы и линейной упругой силы. Это дает простое гармоническое движение.

Если рассматривать ситуацию с энергетической стороны, то нужно учесть, что электрическая потенциальная энергия пластин пропорциональна расстоянию между ними и убывает при их сближении. Упругая потенциальная энергия пропорциональна квадрату смещения пластины B из ее исходного положения. На первых порах электрическая потенциальная энергия убывает быстрее, чем возрастает упругая потенциальная энергия. Разность между ними равна кинетической энергии пластины B. По мере приближения пластины B в пластине A

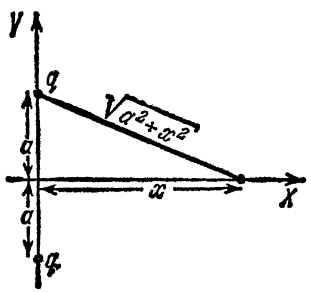


Рис. 31.

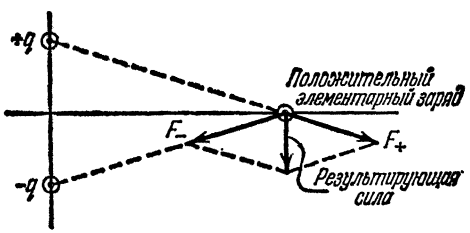


Рис. 32.

упругая потенциальная энергия возрастает все быстрее и быстрее, так что кинетическая энергия начинает убывать и пластина B приходит в состояние покоя, когда суммарная потенциальная энергия достигает еще раз того значения, какое она имела в отправной момент.

б) Если к крюку на конце вертикальной пружины подвесить груз без растяжения пружины и затем отпустить его, то он начнет совершать движение, подобное тому, какое совершала пластина B. Как показывает обстоятельный анализ, сходство в данном случае будет полным. Груз движется под совокупным действием постоянной силы тяготения и упругой силы пружины.

27. а) Потенциальная энергия благодаря кулоновскому взаимодействию элементарного заряда на оси X только с одним закрепленным на оси Y зарядом находится из выражения $U=kq_1q_2/r$.

В данном случае $q_1=q$, а $q_2=1$ элем. зар.; кроме того, $r=\sqrt{a^2+x^2}$ (рис. 31). Следовательно,

$$U = kq \text{ (элем. зар.)}/\sqrt{a^2+x^2}.$$

Потенциальная энергия, обусловленная кулоновским взаимодействием элементарного заряда с обоими закрепленными зарядами, равна работе, совершенной против результирующей кулоновских сил, когда элементарный заряд подводится из бесконечности в свое положение на оси X. Но работа, совершенная против результирующей силы, равна (алгебраической) сумме работ, совершенных каждой силой

(см. раздел 23.9), т. е. сумме потенциальных энергий, обусловленных взаимодействием с каждым из закрепленных зарядов:

$$U_{\text{полн}} = 2kq\ (\text{элем. зар.})/\sqrt{a^2+x^2}.$$

Заметим, что это выражение не содержит члена, обусловленного взаимодействием закрепленных зарядов друг с другом. Это объясняется тем, что мы приняли энергию подвижного заряда равной нулю в бесконечности, когда закрепленные заряды находятся на оси Y.

Так как электрический потенциал представляет собой просто электрическую потенциальную энергию элементарного заряда, его тоже можно вычислить как алгебраическую сумму вкладов в потенциал со стороны отдельных зарядов, которые создают полное электрическое поле.

б) Если закрепленные заряды имеют равные по величине и противоположные по знаку заряды, то полная потенциальная энергия запишется в виде

$$U_{\text{полн}} = k\frac{(+q)\,(\text{элем. зар.})}{\sqrt{a^2+x^2}} + k\frac{(-q)\,(\text{элем. зар.})}{\sqrt{a^2+x^2}} = 0.$$

Этот результат, кажущийся с первого взгляда странным, является следствием того обстоятельства, что результирующая сила, действующая на элементарный заряд, перпендикулярна к оси Y (рис. 32), так что для перемещения этого заряда в любую точку вдоль оси X не требуется никакой работы, даже если его переместить в бесконечность, где, разумеется, потенциальная энергия равна нулю (по определению).

ГЛАВА

29 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Глава 29 посвящена более подробному рассмотрению потока энергии в электрических цепях. Повсюду в главе основное внимание уделяется движению элементарных зарядов, а не самим цепям. И хотя излагаемые в ней сведения создают прочную основу для анализа электрических устройств, обстоятельное рассмотрение закона Ома и связанных с ним задач стоит в стороне от главной цели Учебника.

Как уже отмечалось, закон Ома описывает ток лишь в весьма особом (но технически очень важном) случае, а именно в случае электронной проводимости в металлах при постоянной температуре. Было бы серьезной ошибкой считать, что материал в настоящей главе излагается так, чтобы «привести» в конечном итоге к закону Ома. Наоборот, надлежащая трактовка закона Ома считается побочной целью, достигаемой отправным обстоятельным анализом влияния электрических полей на отдельные элементарные заряды.

В нашу первоочередную задачу не входит и анализ того, что принято называть «цепями постоянного тока». Токи нас интересуют как проявление такого движения элементарных зарядов под действием электрического поля, которое можно заранее предвидеть и которое поддается точному описанию. Подобное представление о токах и движущихся зарядах нам нужно для того, чтобы рассмотреть в очередной главе магнитные взаимодействия. В остальном данная тема особой важности для целостности курса не имеет.

Краткое содержание главы 29

Разделы 29.1—29.3. Если батарею подсоединяют к разомкнутой цепи того или иного рода, то заряды движутся под действием электрического поля до тех пор, пока разность потенциалов между положительным и отрицательным проводниками не уравняется точно с ЭДС батареи. В этом случае электрического поля в проводнике нет. Если цепь замкнута, то в ней потечет постоянный ток, а электрические поля в проводниках не исчезают и зависят от размеров и формы проводников. Сумма разностей потенциалов по контуру цепи все еще равна ЭДС батареи. Разности потенциалов можно измерить электрометром или вольтметром с большим сопротивлением. По уже изложенным нами представлениям кинетическая энергия, приобретенная движущейся в вакууме заряженной частицей, зависит только от величины заряда и разности потенциалов на участке, где движется заряд. Этот вывод поддается экспериментальной проверке.

Раздел 29.4. С повышением разности потенциалов между двумя металлическими пластинами, разделенными ионизованным газом, сначала ток возрастает, затем наступает насыщение и потом уже наблюдается его дальнейшее увеличение довольно сложным образом. Ток, текущий между двумя металлическими пласти-

нами, разделенными вакуумом, зависит от температуры пластин и разности потенциалов между ними. Величина тока в металле прямо пропорциональна разности потенциалов, т. е. $V=RI$, где коэффициент пропорциональности R определяется как сопротивление, величина которого зависит от размеров и разных физических свойств проводника.

Раздел 29.5. Рассматриваются различные электрические цепи. Во всякой цепи, как бы они ни были сложны, полное количество энергии, поступившее от батареи в цепь, должно равняться ее количеству, рассеявшемуся в различных элементах цепи. Это показывает, что сумма разностей потенциалов по контуру цепи всегда равна приложенной ЭДС.

План изучения главы 29

Если вы испытываете недостаток времени, то ознакомьтесь с рекомендациями по программе, изложенными во Введении на стр. 283. Главы 29 и 30 и часть гл. 31 можно опустить, приступив непосредственно к изложению раздела 31.9, т. е. изъяв электрические цепи и магнетизм. И хотя эти темы неоспоримо важны и интересны, их можно отложить в условиях нехватки времени на будущее, если упор переносится на атомную и ядерную физику.

В табл. 8 приведены возможные варианты плана изучения настоящей главы, согласованные с общим планом проработки всей части IV (см. табл. 1 на стр. 284).

ТАБЛИЦА 8

Глава 29	10-недельный план изучения части IV			15-недельный план изучения части IV		
Разделы	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты
29.1	1	0	—	2	0	—
29.2, 29.3	1	0	—	1	0	—
29.4, 29.5	1	1	IV.9	2	2	IV.8, IV.9

Дополнительные материалы к главе 29

Лаборатория. Опыт IV.8 (*Заряд конденсатора*) планируется как иллюстрация к разделу 29.1. Он устанавливает взаимосвязь разности потенциалов между пластинами конденсатора с количеством заряда на пластинах.

Опыт IV.9 (*Энергия, преобразуемая электродвигателем*) относится к начальной части раздела 29.5. Он дает количественную оценку энергии, преобразуемой в цепи электрического тока.

Домашние, классные и лабораторные задания. Ответы, решения и таблица, в которой задания классифицируются по степени их трудности, приведены на стр. 361.

29.1. Проводники, батареи и разность потенциалов

Цель. Приложение понятий об электрическом поле и разности электрических потенциалов к разомкнутой и замкнутой цепям.

Содержание. а) Когда проводники присоединяют к батарее, по ним сразу же потечет заряд, но этот ток прекратится, как только все соединенные с одним

полюсом проводники окажутся под одинаковым потенциалом, отличающимся от потенциала присоединенных к другому полюсу проводников на ЭДС батареи.

б) Если оба полюса батареи соединить единым проводником, то по нему потечет постоянный ток. Ток заряда поддерживается электрическим полем в проводнике. Если проводник представляет собой проволоку, то поле внутри проводника совпадает по направлению с направлением проволоки.

1. Если проволока однородна, то произведение напряженности поля на длину проволоки равно ЭДС батареи, т. е. $El=\mathcal{E}$.

2. Если поле изменяется и равно E_1 на участке длиной l_1 и E_2 на участке длиной l_2, то $E_1l_1+E_2l_2=\mathcal{E}$.

в) Если заряд q проходит через участок с разностью потенциалов V, то электрическая энергия системы изменяется на $U_e=qV$. Однако это верно только в том случае, когда V при движении q остается постоянной. Разность потенциалов V остается постоянной, если батарея соединена через точки, между которыми движется заряд. Она остается постоянной, если величина заряда q много меньше других зарядов. Однако рассматривается случай двух заряженных металлических пластин, которые, будучи незаряженными на первых порах, приобретают заряды соответственно $+q$ и $-q$. Поскольку в начальный момент разность потенциалов равна нулю, а в конце достигает конечного значения V, ясно, что разность потенциалов изменяется. Поэтому полная электрическая энергия системы равна $qV/2$, а не qV, как это могло показаться с первого взгляда.

Методические указания. Представления, излагаемые в этом разделе, лежат в основе углубленной проработки электричества, но они не играют первостепенной роли при усвоении дальнейших разделов курса. Прорабатывать данный раздел нужно фундаментально, выделив для него один-два дня, но его можно наметить и для домашнего чтения или опустить вообще.

Если данный раздел намечено проработать в классе, то полезно подчеркнуть разные выводы в увязке с движением (или покоем) отдельных элементарных частиц.

Классу нетрудно показать, что отдельный проводник представляет собой эквипотенциаль. Это достигается простыми логическими рассуждениями, имеющими конкретный и очевидный характер: 1) Если речь идет о статическом (установившемся) случае, никакого движения зарядов не происходит. 2) Проводник несет заряды, которые перемещаются, если приложить ту или иную силу. Если заряды находятся в покое, то к ним не приложены никакие силы, а электрическое поле внутри проводника равно нулю (непосредственно снаружи проводника силовые линии поля направлены перпендикулярно к поверхности проводника). 3) Следовательно, отдельный элементарный заряд перемещается из одной точки на поверхности проводника в другую без совершения работы. Таким образом, все точки на поверхности проводника находятся под одинаковым потенциалом.

Иногда учащиеся интересуются тем, что понимается под хорошим проводником. Дело не в том, сколь хорош проводник, а в том, сколько времени мы готовы ждать, пока заряды «не успокоятся». Укрепим магнитики на пробках, которые плавают на воде. Они очень быстро выстроятся самостоятельно, создав определенную картину. Если же вместо воды взять сироп, то для выстраивания магнитиков потребуется больше времени, но конечная картина будет той же самой. По истечении достаточно длительного времени даже натертый кусок пластика станет эквипотенциалью, хотя ждать этого придется месяцы и даже годы.

Можно рассмотреть вопрос о притяжении двух проводников A и B неправильной формы, соединенных с батареей, ЭДС которой равна $\mathcal{E}$ (рис. 33). Какую работу надо совершить, чтобы переместить элементарный заряд из точки P в точку Q? (Никакой.) Или из точки Q в точку R? (Никакой.) Почему? Потому что это — единый проводник, т. е. эквипотенциаль. Какую работу надо совершить, чтобы переместить заряд через батарею, например из точки R в точку S? ($\mathcal{E}$ или — $\mathcal{E}$ в зависимости от знака заряда, так как такая работа и есть ЭДС.) Из точки S в точку T? (Никакой.) Какова разность потенциалов между P и T? ($\mathcal{E}$.) Между R и S? ($\mathcal{E}$.) Между Q и S?($\mathcal{E}$.) И т. д. Цель состоит в том, чтобы учащиеся поняли, что батарея просто поддерживает при разомкнутой цепи постоянную разность потенциалов $\mathcal{E}$ между проводниками, подсоединенными к двум ее выводным клеммам.

Если учащиеся уяснили картину, когда ток не течет, то им будет нетрудно понять, что происходит, когда ток течет. Если ток не течет, то внутри проводника нет электрического поля. Если в проводнике течет ток, то внутри проводника

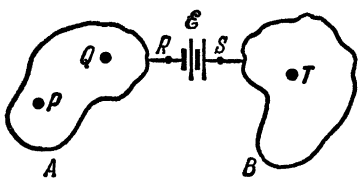


Рис. 33.

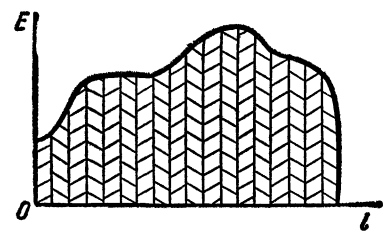


Рис. 34.

должно существовать электрическое поле. Работа, требующаяся для перемещения единичного заряда на расстояние Δl под действием электрического поля E в его направлении, просто равна произведению $E\Delta l$. Таким образом, нам легко определить полную работу, совершенную над единичным зарядом, если нам известно, как E изменяется в зависимости от расстояния. Мы просто суммируем все маленькие площадки $E\Delta l$ (рис. 34) — это дает нам полную работу, совершенную над единичным зарядом, т. е. энергию на единичный заряд при перемещении на расстояние l. Она как раз равна разности потенциалов между точками 0 и l. Поэтому разность V_0—V_l равна площади под кривой изменения E в зависимости от расстояния на участке от 0 до l. Мы можем произвольно разбить любую цепь на произвольное число последовательно соединенных участков и определить таким образом энергию, приходящуюся на единичный заряд, на каждом отрезке. Наконец, мы подойдем в нашей цепи к батарее, которая поставляет ЭДС, равную $\mathcal{E}$. ЭДС есть приходящаяся на элементарный заряд энергия, поставляемая батареей всей цепи. Таким образом, она должна равняться как раз сумме разностей потенциалов на всех последовательно соединенных участках цепи. Следовательно,

$\mathcal{E}$ = сумме разностей потенциалов V вдоль цепи=
= площади под кривой изменения E в зависимости от расстояния для цепи на участке от одного зажима батареи до другого.

Все сказанное выше представляет собой просто формальное изложение закона сохранения энергии. Однако все эти рассуждения сохраняют силу для любой цепи, как бы сложна она ни была.

Учащиеся часто не понимают того, что закон Кулона относится только к *точечным* зарядам. Если нами рассматриваются протяженные проводники, то

нам необходимо учесть и действие наведенных зарядов. Это приходится делать, например, при объяснении, почему точечный заряд притягивается к незаряженной проводящей плоскости (рис. 35).

Существуют разные пути решения данной задачи. Из рис. 29.5 видно, что заряд должен перераспределиться в плоскости следующим образом.

Поскольку индуцированные положительные заряды располагаются к заряду $-q$ ближе, чем индуцированные отрицательные заряды, заряд $-q$ притянется к пластине, хотя полный заряд на ней равен нулю (рис. 36).

Данную задачу можно решить и количественно, если учесть, что проводник должен представлять собой эквипотенциаль. В действительности такой проводник, если он не заряжен, должен находиться под нулевым потенциалом.

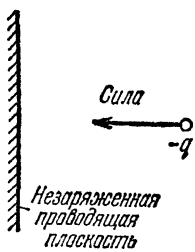


Рис. 35.

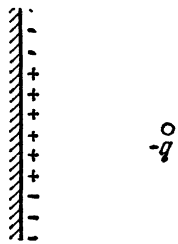


Рис. 36.

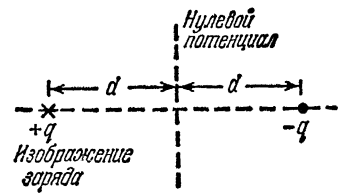


Рис. 37.

Приведенные рассуждения остаются в силе и тогда, когда мы возьмем удаленную плоскость и поместим равный, но разноименный заряд $+q$ на таком же расстоянии за ней. В данном случае плоскость нулевого потенциала совпадает с передней поверхностью проводника (рис. 37). Таким образом, мы вправе заменить действие проводника действием подобного «изображения» заряда. Сила действия на заряд $-q$ равна, разумеется, $-kq^2/4d^2$, где знак минус показывает, что сила имеет направление к пластине.

29.2. Измерение разности потенциалов

Цель. Описать способы измерения разности потенциалов.

Содержание. а) Электрометры измеряют разность потенциалов путем измерения силы действия между заряженными телами.

б) Вольтметры измеряют разность потенциалов посредством определения силы тока, протекающего через большое сопротивление.

в) Ток, текущий по вольтметру, способен изменить измеряемую разность потенциалов.

Методические указания. Данный раздел не играет большой роли при проработке последующего материала, так что при прохождении его в классе ему не нужно уделять особое внимание. Его можно проработать и в виде домашнего чтения. Вольтметры проще рассмотреть после проработки закона Ома (см., например, задачу 27 к этой главе).

29.3. Дальнейшая проверка сведений о разности потенциалов и энергии

Цель. Подчеркнуть то обстоятельство, что количество кинетической энергии, приобретенной движущимися заряженными частицами при движении на

участке с разностью потенциалов, зависит только от разности потенциалов и заряда.

Содержание. Изменение кинетической энергии заряженного тела, движущегося в электрическом поле, равно разности потенциалов, которую оно пробегает, помноженной на число элементарных зарядов, которое оно несет на себе. Знать действительную структуру электрического поля вдоль пути перемещения тела не требуется.

Методические указания. Это обстоятельство играет очень важную роль, но оно вытекает из предшествующих рассуждений. Оно во многом упрощает решение многих задач. Если у вас найдется время для тщательной проработки материала об электричестве, помещаемые здесь иллюстрации могут принести большую пользу. Если же вы испытываете нехватку времени, излагаемые в данном разделе представления не потребуются для усвоения излагаемого в последующем материала.

Рассуждения вытекают из закона сохранения энергии и потому не являются новыми. Не исключено, что данный раздел уместно проработать, заставляя самих учащихся вести рассуждения и выводить доказательства. Они в состоянии независимо доказать закон сохранения энергии, обратившись, например, к механической аналогии. Подходящим простым механическим аналогом может служить тележка на роликах без трения.

Находившаяся в покое в точке A тележка (рис. 38) массой m приходит в движение. Какова ее кинетическая энергия, когда она проходит B (и движется дальше)? Чтобы обстоятельно описать ее движение, нам нужно знать результирующую силу в каждой точке ее пути, но чтобы вычислить кинетическую энергию в B, достаточно воспользоваться законом сохранения энергии. Таким образом, нам

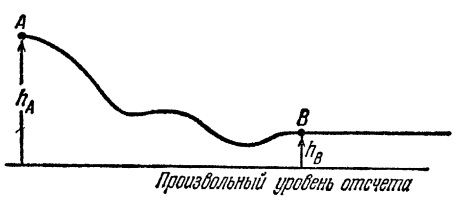


Рис. 38.

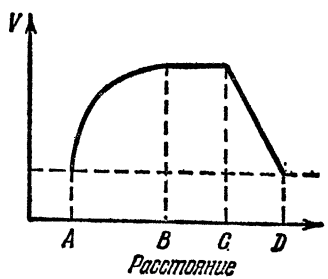


Рис. 39.

потребуется знать только изменение потенциальной энергии тяготения. Из закона сохранения энергии следует, что начавшая двигаться из состояния покоя в A тележка будет иметь в B кинетическую энергию, равную изменению (убыли) потенциальной энергии тяготения при переходе из A в B:

кинетическая энергия в B = потенциальная энергия в A — потенциальная энергия в $B = mgh_A - mgh_B$.

Пока тележка перемещается из A в B, нам не требуется знать ничего о потенциальной энергии или силе в промежуточных точках. Более того, неважно, в какой точке считать потенциальную энергию равной нулю, потому что в расчет входит только ее изменение.

Аналогию можно провести даже еще дальше, если рассмотреть «гравитационную разность потенциалов», т. е. изменение потенциальной энергии на единичную массу. Разность гравитационных потенциалов в нашем примере равна $gh_A - gh_B$; отсюда

кинетическая энергия в B = масса · разность потенциалов = $m(gh_A - gh_B)$.

Не исключено, что учащиеся могут заинтересоваться построением графика изменения потенциала вдоль пути электронов на рис. 29.8 при наложении однородного тормозящего поля, прекращающего электронный ток. Такой график должен выглядеть приблизительно, как показано на рис. 39. Почему этот график перевернут по сравнению с графиком для нашей тележки? (Электроны имеют отрицательный заряд, тогда как тележка обладает положительной инерционной массой.)

29.4. Зависимость силы тока от разности потенциалов

Содержание. Описательное рассмотрение зависимости силы тока от разности потенциалов в случаях ионизованных газов, термоэлектронной эмиссии (диода) и металла.

Методические указания. Излагаемый в данном разделе материал не используется в последующих разделах и может быть опущен без ущерба для целостности курса. Если будет принято решение о его изучении, то можно ограничиться заданием его для домашнего чтения.

Многих учащихся должно заинтересовать чтение излагаемого в данном разделе материала. Однако выигрыш от обстоятельного обсуждения в классе будет небольшим, поскольку для более глубокого понимания потребуются сведения из атомной физики, которых у учащихся на данной ступени не имеется. Излагаемые ниже краткие замечания помогут вам ответить на вопросы, которые могут задать заинтересовавшиеся учащиеся.

Показанная на рис. 29.9 установка (если не считать рентгеновской трубки) представляет собой ионизационную камеру. Ею можно пользоваться для обнаружения ионизующего излучения, создаваемого, например, радиоактивными веществами. Пролетающая быстрая заряженная частица оставляет в газе след из образующихся пар электрон — ион. Эту камеру, снабженную прибором для измерения тока, можно использовать для измерения средней скорости, с которой заряженные частицы пролетают через камеру, или обусловленного пролетом изменения разности потенциалов. Она позволяет также усилить изменение разности потенциалов после пролета отдельной частицы, чтобы обнаружить прохождение через камеру отдельных частиц. При достаточно высокой разности потенциалов электроны порождают вторичные пары ионов, что приводит к пробою газа и возникновению сильного импульса тока. Такое устройство называют трубкой Гейгера.

Участок, где ток ограничен пространственным зарядом, приходится на начало кривых на рис. 29.11, где кривая изменения силы тока в зависимости от разности потенциалов отклоняется вниз. Кристаллические диоды дают кривые, которые в некоторых отношениях отличны от кривых для вакуумных диодов. Поскольку кристаллические диоды работают при абсолютной температуре в тришесть раз ниже абсолютной температуры действия вакуумных диодов, ток убывает гораздо резче, когда знак разности потенциалов меняется на обратный. Это

объясняется тем, что электроны в кристаллических диодах обладают тепловой энергией, которая в три-шесть раз меньше тепловой энергии электронов в вакуумных диодах. Поэтому для их задержания требуется тормозящий потенциал, меньший приблизительно в такое же число раз. Кроме того, у кристаллических диодов отсутствует насыщение, поскольку для них характерно огромное изобилие электронов.

Рассмотренная простая модель позволяет без труда вывести количественно закон Ома. Предположим, что электроны сталкиваются с положительными ионами и после каждого соударения отлетают с произвольной скоростью. Пусть промежуток времени между соударениями равен t. Каждый электрон между столкновениями ускоряется и приобретает дополнительную скорость, равную импульсу (сила·время$=qEt$), деленному на массу. Средний прирост скорости, обусловленный действием электрического поля, равен $(qEt/m)/2$, т. е. пропорционален напряженности электрического поля *).

29.5. Общее представление об электрической цепи

Цель. Рассмотреть электрические цепи с точки зрения движения отдельных зарядов, когда приходится учитывать как энергию, так и величину зарядов.

Содержание. а) Цепь состоит из батареи, которая заставляет заряд перемещаться через ряд устройств, и элементов.

---

*) На самом деле электрическое сопротивление порождается не соударениями с положительными ионами решетки. В идеальном твердом теле все атомы располагаются в пространстве на одинаковом расстоянии друг от друга (при температуре абсолютного нуля). Поэтому соударения носят упругий (а не диффузный) характер и никакого сопротивления не создают. Сопротивление есть следствие наличия в решетке несовершенств. При нормальных температурах несовершенства порождаются в большинстве случаев тепловыми колебаниями атомов решетки. Когда атомы совершают колебания, расстояния между ними не остаются совершенно одинаковыми, благодаря чему рассеяние приобретает частично диффузный характер. Поэтому сопротивление обычно тем больше, чем выше температура. При очень низких температурах сопротивление порождается несовершенствами иных видов, в частности примесными атомами. Действительное вычисление электрического сопротивления сопряжено с большими трудностями, поскольку не все электроны металла «свободны» в том смысле, что они способны двигаться под действием электрического поля. В простых металлах, например в меди, «свободен» приблизительно один электрон на атом. В некоторых металлах, таких, как германий, свободой перемещения обладает лишь крохотная доля всех электронов, причем эта доля резко уменьшается при снижении температуры. Этот эффект сильно превалирует над действием температуры на тепловое расстояние, так что сопротивление германия резко возрастает при понижении температуры и равно при абсолютном нуле бесконечности.

Из-за подобных осложнений закон Ома лучше всего относить к постоянной температуре, т. е. формулировать в следующем виде: ток прямо пропорционален разности потенциалов, если температура металла поддерживается постоянной. Этот закон соблюдается для многих проводников в широком диапазоне изменения напряжения и силы тока.

б) Вся энергия, сообщенная батареей цепи, подлежит учету в той или иной форме, в виде теплоты, механической работы и т. д.

в) ЭДС батареи делится на разности потенциалов совокупности элементов, соединенных последовательно в цепь. Фактическая доля ЭДС, приходящаяся на конкретный элемент, зависит от физической природы элемента и (в общем случае) от силы тока.

г) Если два элемента цепи соединить параллельно, то разность потенциалов на них одинакова. Если же их соединить последовательно, то одинаковой будет сила тока, протекающего через них.

д) Закон сохранения энергии показывает, что сумма падений потенциала на различных последовательно соединенных элементах цепи должна точно равняться приложенной ЭДС для всякой цепи, как бы сложна она ни была.

Методические указания. Хотя данный раздел образует основу мощного подхода к пониманию электрических цепей, излагаемые в нем представления не требуются для последующих глав. Поэтому данный раздел можно опустить без ущерба для целостности изложения курса.

Если вы решили проработать данный раздел, то лучше всего, вероятно, это сделать, рассмотрев количественный пример, подобный задаче 18. Учет изменений энергии весьма полезен даже при рассмотрении более сложных цепей, например в цепях с неравновесными токами, когда энергия способна накапливаться в емкостях и индуктивностях. При проработке существенных моментов данного раздела большую помощь могут оказать лабораторные опыты IV.8 и IV.9.

Надо отдать предпочтение более общему описанию, данному в Учебнике перед любым другим изложением, более простым в отправных представлениях, но имеющим ограниченную приложимость, например простой цепи, состоящей

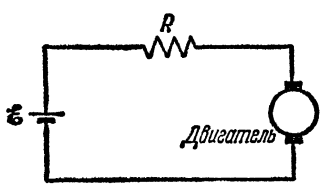


Рис. 40.

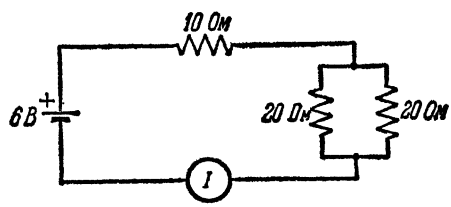


Рис. 41.

лишь из одной батареи и нескольких сопротивлений. Даваемое в Учебнике описание охватывает всевозможные электрические цепи, если только рассматривать все источники и стоки энергии в качестве элементов цепи. Так, если наша цепь содержит электродвигатель, то нам надлежит рассмотреть в качестве элемента цепи и механическую систему, над которой двигатель совершает работу и тем самым накапливает или рассеивает энергию. Если наша цепь включает радиопередатчик, то нам придется включить в цепь и всю энергию, изучаемую в пространство и не рассеиваемую в приемнике. Таким образом, наша «цепь» представляет собой по существу просто замкнутую систему (не исключено, что за такую систему придется взять всю Вселенную, как это должно быть в случае с радиопередатчиком), в которой соблюдается закон сохранения всего количества энергии.

Дополнительные задачи. А. Батарея, ЭДС которой равна 100 В, присоединяется к двигателю через сопротивление $R=100$ Ом. Через цепь течет ток 5 А (рис. 40).

а) Чему равно падение потенциала на сопротивлении? (50 В.)

б) Чему равно падение потенциала на двигателе? (50 В.)

в) Если в двигателе нет выделения тепла, то на какую высоту он способен поднять массу в 10 кг за 1 с? (50 В·5А·1 с=250 Дж=9,8·10 Н·d м; d=2,55 м.)

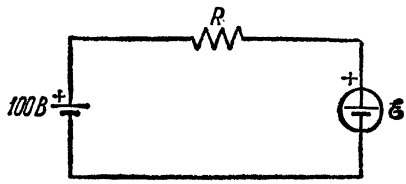


Рис. 42.

Б. а) Какую силу тока I покажет амперметр в изображенной на рис. 41 цепи? (0,3 А.)

б) С какой скоростью станет выделяться тепло в сопротивлении 10 Ом? (0,9 Вт.) С какой скоростью станет выделяться тепло в одном из двух сопротивлений по 20 Ом? (0,45 Вт.)

В. Батарею с ЭДС 12 В предполагается зарядить от мощного источника тока на 100 В со скоростью зарядки 1 А в течение 10 ч (рис. 42).

а) Какова должна быть величина сопротивления R? (88 Ом.)

б) Чему будет равно полное изменение химической потенциальной энергии заряжаемой батареи? ($4{,}3\cdot10^5$ Дж.)

в) Чему будет равно количество подведенной к цепи энергии? ($3{,}6\cdot10^6$ Дж.)

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам

В табл. 9 задачи распределены по степени их трудности и по разделам, к которым они относятся. Указаны задачи, предназначающиеся для разбора в классе. Задачи, рекомендуемые для первоочередного решения, отмечены значком #.

ТАБЛИЦА 9

Разделы	Со звездочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
29.1	1—4	5	7#	6, 8	7#
29.2	9, 10	11			
29.3	14, 15			12#, 13	12#
29.4, 29,5	16, 22	19, 20, 24	17, 23, 25	18, 21, 26, 27#	27#

Краткие ответы

1*. Электрическое поле в проводе совпадает по направлению с проводом.

2*. E=3 В/м=3,0 Н/Кл.

3*. Электрическое поле в первом проводе останется таким же, как и прежде, потому что разность потенциалов между концами провода будет равна, как и раньше, ЭДС батареи независимо от того, что к ней подсоединяется параллельно.

4*. V=18 В.

9*. Если электрометр отберет много электричества от исследуемого тела, то изменится измеряемая разность потенциалов.

10*. Ток в вольтметре должен быть малой величиной по сравнению с током в цепи.

14*. 45 эВ=$7{,}6\cdot10^{-18}$ Дж.

15*. Если отрицательный полюс соединить с правой пластиной, как это показано на рис. 29.8, то электрон отдаст 30 эВ своей кинетической энергии, чтобы

совершить работу против силы отталкивания. Эта энергия сообщается 30-вольтовой аккумуляторной батарее. Когда электрон ударяется о пластину, он отдает остальную энергию, равную 30 эВ в виде тепла.

16*. $R=4{,}4\cdot10^4$ Ом. Падение напряжения на реостате составляет (90—37) В.

22*. $V=4{,}9$ В.

Ответы с указаниями и решениями

5. а) и б) Если батареи соединены *последовательно* положительным зажимом первой с отрицательным зажимом второй, то разность потенциалов между A и B

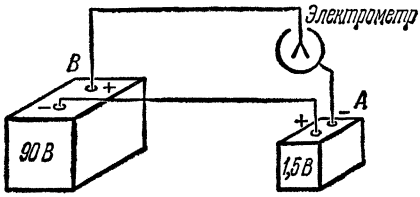


Рис. 43.

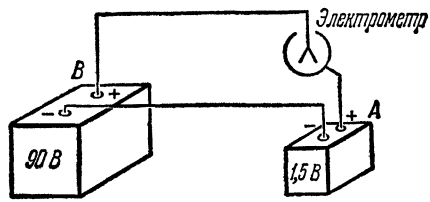


Рис. 44.

есть сумма разностей потенциалов двух батарей (рис. 43). Увеличение потенциальной энергии положительного заряда при переходе через обе батареи от A в B (или отрицательного заряда при переходе от B в A) составит

$$(90+1{,}5)\cdot1{,}6\cdot10^{-19}\text{ Дж}=91{,}5\cdot1{,}6\cdot10^{-19}\text{ Дж},$$

что соответствует разности потенциалов в 91,5 В.

в) Если полярность соединений одной из батарей поменять на обратную, то разность потенциалов между A и B станет меньше (рис. 44). Увеличение потенциальной энергии положительного элементарного заряда при переходе из A в B

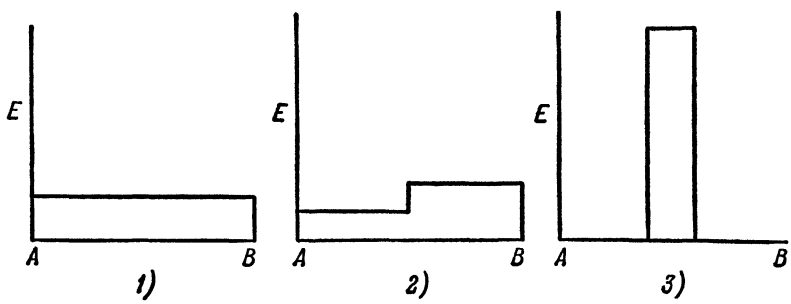


Рис. 45.

по-прежнему будет равно $90\cdot1{,}6\cdot10^{-19}$ Дж, когда он переместится через 90-вольтовую батарею, но его потенциальная энергия уменьшится на $1{,}5\cdot1{,}6\cdot10^{-19}$ Дж, когда он пройдет через 1,5-вольтовую батарейку, так что разность потенциалов в таком случае составит всего $88{,}5\cdot1{,}6\cdot10^{-19}$ Дж/элем.зар. (т. е. 88,5 В).

6. а) Внутри прямого провода электрическое поле повсюду одинаково. Поэтому в случае 1) напряженность электрического поля E должна быть постоянной (рис. 45). В случае 2) сумма токов, протекающих по двум параллельно соединенным проводам, равна силе тока, текущего от C к B, потому что в C никакого накопления заряда не происходит. Поэтому ток, текущий по каждому из двух параллельно соединенных проводов, равен половине силы тока на участке от C до B. Следовательно, напряженность электрического поля внутри параллельно соединенных проводов должна быть равна лишь половине напряженности электрического поля на участке между C и B. В случае 3) электрическое поле между параллельными заряженными пластинами одинаково во всех точках пространства.

Когда пластины заряжены полностью, электрического поля между батареей и пластинами не существует. Если бы оно существовало, заряды перемещались бы на пластины или с пластин, что противоречит нашему предположению о полной заряженности пластин. Надо обратить внимание на то обстоятельство, что полная площадь под кривыми одинакова во всех случаях. Если бы мы построили график изменения силы, действующей на положительный элементарный заряд, в зависимости от расстояния, то площадь под кривой выражала бы работу, совершенную

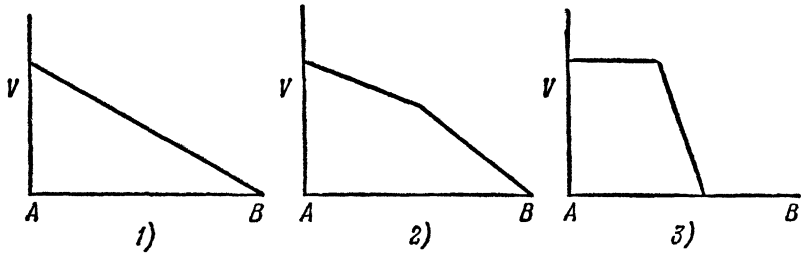


Рис. 46.

электрическим полем на перемещение заряда, а совершенная работа соответствовала бы расходу потенциальной энергии:

сила · расстояние = работа = изменение потенциальной энергии.

Следовательно,

$$\frac{\text{сила}}{\text{элементарный заряд}} \cdot \text{расстояние} = \frac{\text{изменение потенциальной энергии}}{\text{элементарный заряд}},$$

т. е.

напряженность электрического поля · расстояние = изменение потенциала.

Разность потенциалов между A и B одинакова во всех случаях.

б) Так как разность потенциалов между любой точкой и B как раз равна напряженности электрического поля в данной точке, умноженной на ее расстояние от B, построим график изменения площади под кривыми на рис. 45 в зависимости от расстояния рассматриваемой точки до B, чтобы построить графики изменения разности потенциалов по отношению к B в зависимости от положения (рис. 46).

7. а) Энергия, сообщенная батареей единичному заряду при его прохождении через нее, равна ЭДС. Поэтому полное количество сообщенной энергии найдется в виде

$$\mathcal{E}q = (270 \text{ Дж/Кл}) \cdot (6{,}4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}) = 1{,}7 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}.$$

б) При перемещении первого элементарного заряда с одной пластины на другую нет электрического поля, для преодоления действия которого потребовалось бы совершить работу. Такая работа для всякого последующего элементарного заряда прямо пропорциональна заряду на пластинах. Чтобы перенести последний элементарный заряд на пластины, потребуется преодолеть действие разности потенциалов, почти точно равной ЭДС. Поэтому средняя работа, совершенная батареей при переносе каждого заряда на пластины, равна половине работы, совершенной при переносе последнего заряда. Полная работа, требующаяся для перемещения всех зарядов на пластины, равна половине произведения полного заряда на ЭДС, т. е. средней работе на заряд:

$$\mathcal{E}q/2 = (135 \text{ Дж/Кл}) \cdot (6{,}4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}) = 8{,}6 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}.$$

Это количество энергии должно освободиться при разрядке пластин (это количество энергии накопилось на пластинах).

в) Остальная часть энергии, поступившей от батареи, преобразовалась в тепловую энергию сопротивлением цепи. Она составила половину работы, совершенной батареей.

Для дальнейшего рассмотрения предположим, что мы ввели в цепь ключ, позволяющий включать в батарею по одному элементу (рис. 47). Обозначим ЭДС элемента через $\mathscr{E}$. Поскольку все элементы батареи одинаковы, каждый из них добавляет к пластинам по заряду q. Если включить первый элемент, то он совершит работу $1\,\mathscr{E}q$, характеризуемую первым прямоугольником на рис. 48. Потенциальная энергия, сообщенная пластинам, выражается площадью треугольника

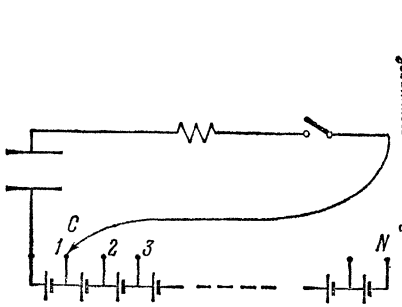


Рис. 47.

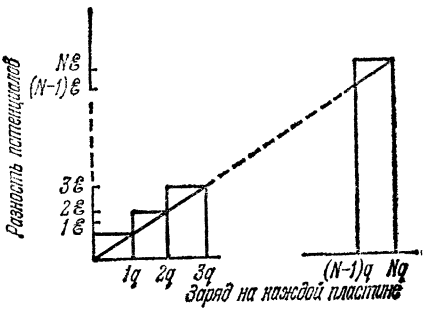


Рис. 48.

под диагональю. Когда включены все элементы, совершенная ими работа выражается суммой площадей всех прямоугольников $(1+2+3+\ldots+N)\mathscr{E}q = [N(N+1)/2]\mathscr{E}q = [(N^2+N)/2]\mathscr{E}q$. Как и раньше, потенциальная энергия, сообщенная пластинам, равна $N\mathscr{E}\cdot Nq/2 = (N^2/2)\mathscr{E}q$. Отношение

$$\frac{\text{работа, совершенная батареей}}{\text{накопленная потенциальная энергия}} = \frac{N^2+N}{N^2} = \frac{N+1}{N} = 1+\frac{1}{N}.$$

Когда $N=1$, как в рассматриваемой задаче, это отношение равно 2, но если число N можно сделать большим, то рассматриваемое отношение незначительно превосходит единицу.

Если бы удалось изобрести «батарею», ЭДС которой можно было бы менять непрерывно (или ступеньками ничтожно малой высоты), совершенную работу можно было бы сблизить с накопленной потенциальной энергией сколь угодно близко.

Если у нас имеется аккумуляторная батарея, то, воспользовавшись ключом для разрядки пластин, можно извлечь бо́льшую часть их потенциальной энергии. Проведя такие рассуждения, как и для процесса зарядки, можно показать, что энергия, сообщенная батарее, равна

$$[(N-1)/2]\cdot[(N-1)+1]\,\mathscr{E}q = [(N^2-N)/2]\,\mathscr{E}q.$$

Таким образом, отношение

$$\frac{\text{энергия, возвращенная батарее}}{\text{энергия, взятая от батареи}} = \frac{N^2-N}{N^2+N} = \frac{N-1}{N+1}.$$

Это отношение можно сделать почти равным единице, если провести ступеньками небольшой высоты процессы зарядки и разрядки. Если же можно было бы ЭДС батареи изменять непрерывно, то это отношение было бы равно единице. Когда батарее можно возвратить всю энергию, взятую от нее, говорят, что процесс *обратим*.

Чтобы узнать, как энергия делится между заряженными пластинами и сопротивлением цепи, рассмотрим зарядку цепи, в которой сопротивление заменено диодом (рис. 49). Батарея загоняет электроны на катод или диод, причем электроны, вылетающие из металла в процессе термоэлектронной эмиссии, попадают под действие сильного отталкивания. Они разгоняются до больших скоростей. При ударе об анод их кинетическая энергия преобразуется во внутреннюю (теп-

ловую) энергию, что сопровождается нагреванием анода. По мере накопления электронов на аноде результирующая сила разгона электронов, которые пролетают в диоде, становится меньше, приобретенные ими скорости убывают, так что они сообщают аноду все меньше кинетической энергии. Батарея сообщает всем электронам одинаковую потенциальную энергию. Поэтому чем меньше потенциальной энергии преобразуется во внутреннюю энергию анода, тем больше ее остается в виде потенциальной энергии параллельных пластин.

Этот процесс можно рассмотреть и в свете энергий участков цепи. Разность потенциалов между параллельными пластинами $V_{пл}$ пропорциональна заряду на этих пластинах. ЭДС батареи есть заданная величина. Небольшой положительный заряд q приобретает от батареи энергию $\mathcal{E}q$ и сообщает параллельным пластинам потенциальную энергию $V_{пл}q$. Разность преобразуется в кинетическую энергию диода и затем во внутреннюю энергию системы. На диоде возникает разность потенциалов V_D. На рис. 50 площадь всего прямоугольника выражает работу,

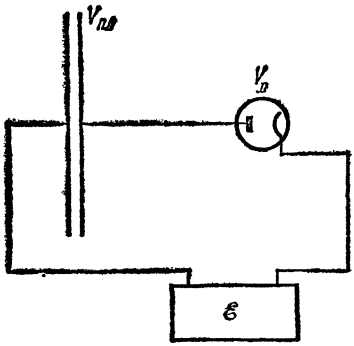


Рис. 49.

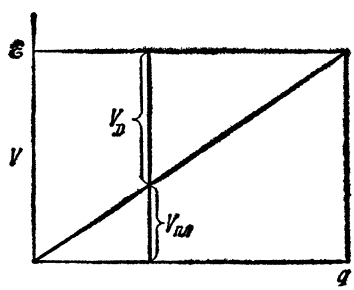


Рис. 50.

совершенную батареей. Площадь нижнего треугольника выражает потенциальную энергию параллельных пластин, тогда как площадь верхнего треугольника характеризует кинетическую энергию электронов, пролетающих через диод, которая преобразуется в тепловую энергию анода.

На основе этой модели сопротивление можно трактовать как совокупность множества последовательно соединенных друг с другом крохотных диодов, в каждом из которых электроны разгоняются и преобразуют свою кинетическую энергию в тепловую энергию всего тела. Тогда график изменения V_D представляет собой сумму всех таких энергий, переданных единичным перенесенным зарядом.

8. а) $E_к = 270\ В \cdot (1{,}6 \cdot 10^{-19}\ Кл) = 4{,}32 \cdot 10^{-17}\ Дж$.

б) Разность потенциалов между пластинами пропорциональна заряду на пластинах. Следовательно,

$$E_к = \left(\frac{3 \cdot 10^{10}\ \text{элем. зар.}}{4 \cdot 10^{10}\ \text{элем. зар.}} \cdot 270\ В\right) \cdot (1{,}6 \cdot 10^{-19}\ Кл) = 3{,}24 \cdot 10^{-17}\ Дж.$$

в) Полная кинетическая энергия равна произведению полного заряда на среднюю разность потенциалов между пластинами:

$$E = qV/2 = (6{,}4 \cdot 10^{-9}\ Кл) \cdot 270\ В/2 = 8{,}6 \cdot 10^{-7}\ Дж.$$

11. Один способ градуировки второго электрометра состоит в том, чтобы соединить два электрометра параллельно, т. е. стержень со стержнем или кожух с кожухом, можно также стержень с кожухом и кожух со стержнем (рис. 51). Если стеклянную палочку натереть материей и дотронуться палочкой до одного из стержней или до соединяющей их проволочки, то тем самым мы зарядим электрометры. Заряд поделится между электрометрами неизвестным способом. Однако при таком делении разность потенциалов между стержнем и кожухом для двух

электрометров будет одинаковой. Если разность потенциалов между двумя соединенными друг с другом электрометрами не будет одинаковой, то вдоль соединяющих их проволочек должна существовать разность потенциалов, которая приведет к перетеканию тока, пока не установится равновесие. Проградуированный электрометр показывает, чему равна такая разность потенциалов, что позволит нанести соответствующие метки на шкале второго электрометра. Повторив несколько раз такую операцию, добавляя или снимая каждый раз заряды, мы решим поставленную задачу.

Гораздо проще проградуировать электрометр можно следующим образом. Зарядим нашу палочку и, не касаясь ею стержней электрометра, подведем ее к нему. Количество наведенного заряда (и, значит, разность потенциалов) можно регулировать, изменяя положение стеклянной палочки.

12. а) Поскольку энергия, сообщенная заряду, равна силе на заряд, помноженной на расстояние, падение потенциала между пластинами V равно

$$V = Ed = (1000\ \text{Н/Кл}) \cdot (2 \cdot 10^{-3}\ \text{м}) = 2\ \text{Дж/Кл} = 2\ \text{В}.$$

б) Ускоряющий потенциал в 2500 В между нитью и анодом пушки сообщает каждому электрону кинетическую энергию 2500 эВ, т. е.

$$mv^2/2 = E_к = 2500\ \text{эВ} \cdot (1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Дж/эВ}) = 4 \cdot 10^{-16}\ \text{Дж}.$$

Отсюда $v^2 = 2E_к/m$, т. е.

$$v = \sqrt{2 \cdot (4 \cdot 10^{-16}\ \text{Дж})/(0{,}91 \cdot 10^{-30}\ \text{кг})} = 3 \cdot 10^7\ \text{м/с}.$$

в) Надо полагать, что экспериментальная установка сооружена так, что вне пушки нет составляющей электрического поля в направлении неотклоненного луча (пусть это будет направление x). Так должно обстоять дело, если анод пушки



Рис. 51.

находится под потенциалом, промежуточным между потенциалами двух отклоняющих пластин. Если дело обстоит именно так, то составляющая скорости в направлении x на всем расстоянии между отклоняющими пластинами одинакова и составляет в момент вылета электронов из пушки $3 \cdot 10^7$ м/с. Время, требующееся электронам для прохождения пути длиной $l = 0{,}06$ м, найдем в виде

$$t = l/v_x = 0{,}06\ \text{м}/(3 \cdot 10^7\ \text{м/с}) = 2 \cdot 10^{-9}\ \text{с}.$$

г) Электрическое поле между пластинами отклоняет всякий заряд q в пространстве между ними в поперечном направлении, действуя на него с силой $F_s = qE$. Эта сила, действуя в течение времени t, сообщает заряженной частице количество движения mv_s согласно соотношению

$$F_s t = mv_s.$$

Следовательно, $v_s = F_s t/m = qEt/m$. Поперечная составляющая скорости электрона

$$v_s = (1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл}) \cdot (1 \cdot 10^3\ \text{Н/Кл}) \cdot (2 \cdot 10^{-9}\ \text{с})/(9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{кг}) = 3{,}5 \cdot 10^5\ \text{м/с}.$$

д) Так как ускорение электронов постоянно, а начальная поперечная составляющая их скорости равна нулю, средняя поперечная скорость равна половине конечной поперечной скорости. Поперечное отклонение электронов s равно

$$s = \bar{v}_s t = [(3{,}5 \cdot 10^5\ \text{м/с})/2] \cdot (2 \cdot 10^{-9}\ \text{с}) = 3{,}5 \cdot 10^{-4}\ \text{м}\ (\text{или } 0{,}35\ \text{мм}).$$

13. а) Проведем такие же вычисления, как и при отыскании ответов на вопросы пп. б), в), г) и д) в задаче 12:

$$qV = mv_x^2/2, \quad v_x^2 = 2qV/m, \quad t = l/v_x;$$
$$mv_s = F_s t = qEt, \quad v_s = qEt/m;$$
$$s = v_s t/2 = qEt^2/2m.$$

Поскольку $t = l/v_x$, $v_x^2 = 2qV/m$, находим

$$s = (qE/2m) \cdot l^2/(2qV/m) = El^2/4V.$$

б) и в) Как видно из п. а), отклонение не зависит от массы и заряда иона. Разумеется, ионы должны быть отрицательными. Если бы они несли положительный заряд, то им не удалось бы вылететь из пушки, а обращение всех разностей потенциалов на обратные, восстановило бы прежнее положение. Траектории ионов с зарядом одного знака, движущихся под действием заданного электрического поля, одинаковы для всех ионов независимо от их массы и заряда (при условии, что все они приходят в движение из состояния покоя в одной и той же точке).

17. Пока электроны протекают через катушку, они приобретают энергию, количество которой равно работе, совершенной электрическим полем. Однако они почти моментально передают приобретенную энергию атомам металла. Когда ток включается впервые, проволока нагревается. Вскоре она становится горячее окружающей воды и отдает теплоту воде. Довольно скоро подобный обмен приходит в равновесное состояние, при котором температура проволоки остается постоянной, а энергия, сообщаемая электрическим полем электронам, увеличивает в эквивалентном соотношении количество теплоты, передаваемой воде. Рассмотрим, что произойдет за промежуток времени, равный 1 с (после достижения равновесного состояния).

а) За промежуток времени, равный 1 с, протекает 1 г воды. Температура 1 г воды повышается на 1 °С, так что энергия, сообщенная воде, равна 1 калории = = 4,18 Дж. Работа, совершенная электрическим полем над зарядом q, равна qV = = 4,18 Дж; заряд q, прошедший за 1 с, должен быть равен

$$q = 4{,}18 \text{ Дж}/2{,}09 \text{ В} = 2 \text{ Кл}.$$

Следовательно, поток в 2 Кл за 1 с есть ток силой 2 А.

б) Чтобы проградуировать амперметр, соединим его последовательно, как это показано на рис. 29.20. Через амперметр потечет такой же ток, как и через катушку. Изменяя приложенную ЭДС (на рисунке не отражено), под действием которой течет ток, можно изменять разность потенциалов между точками α и β. Производя измерения электрометром для каждой разности потенциалов V, мы сможем вычислить ток.

18. Закон сохранения энергии позволяет нам сделать ряд полезных выводов общего характера относительно поведения каждого из элементов цепи. Через все эти элементы течет одинаковый ток, потому что они соединены последовательно. К тому же нам известно, что падение напряжения (разности электрического *потенциала*) на концах всех элементов одинаково. Отсюда можно сделать вывод, что за единичное время к каждому из этих элементов подводится одинаковое количество энергии. Количество рассеиваемой каждым элементом теплоты зависит, таким образом, от того, что еще делается с подводимой энергией.

а) Сопротивления представляют собой просто металлические проволоки значительной длины. В них ничего не делается с получаемой ими энергией, кроме ее рассеяния в виде теплоты. Так как за 1 с они получают одинаковое количество энергии, они должны рассеивать ежесекундно тоже *одинаковое* количество теплоты.

б) В диоде, как и в уже рассмотренном нами примере с двумя сопротивлениями, электрическая энергия может преобразоваться только в теплоту. Таким образом, в нем рассеивается то же количество теплоты, что и в сопротивлениях. Преобразование электрической энергии в теплоту есть двухступенчатый процесс: разность потенциалов на электродах диода ускоряет электроны в пространстве от нити до анода, преобразуя электрическую потенциальную энергию в кинети-

ческую энергию поступательного движения электронов. Затем эта кинетическая энергия превращается в теплоту, когда электроны ударяются об анод.

При изложенных выше рассуждениях мы предполагали, что диоду не нужен иной источник энергии для выполнения своего назначения. Это верно, например, для кристаллического диода. Для вакуумного же диода необходим дополнительный источник энергии для нагревания нити, чтобы содействовать выходу электронов и их перемещению к аноду. Теплота от протекания этого дополнительного тока рассеется у нити, но остальное количество теплоты, обусловленное током в основной цепи, будет таким же, как и в первом случае (равным количеству теплоты, рассеиваемому обоими сопротивлениями).

в) Электродвигатель не представляет собой изолированную систему; он вращает вентилятор, который перемещает воздух, для чего требуется энергия. Если двигатель работает с высоким коэффициентом полезного действия, то лишь малая доля получаемой им энергии рассеивается в самом двигателе в виде теплоты. Бóльшая же часть энергии идет на увеличение кинетической энергии молекул воздуха, что приводит к нагреванию последнего.

г) Прохождение тока через электролитическую ванну сопровождается химическими превращениями в ней, изменяющими ее *химическую энергию*. Она способна возрастать или убывать что зависит от способа включения ванны в цепь. Если химическая энергия *возрастает*, то часть электрической энергии, подаваемой батареей, расходуется на подобное изменение, так что в виде теплоты рассеивается только часть ее. В таком случае теплоты рассеивается меньше, чем в сопротивлении. С другой стороны, если химическая энергия *убывает*, то такая убыль вместе с энергией от батареи должна рассеяться полностью в виде теплоты. Тогда рассеиваемое ее количество будет больше, чем в сопротивлениях.

Поскольку в данной задаче, как нам известно, в ванне рассеивается меньше теплоты, чем в сопротивлении, то ванна включена в цепь так, что ее химическая энергия возрастает. Это значит, что ток, текущий в ванне от зажима A к зажиму B, увеличивает ее внутреннюю энергию. Если теперь ванну включить в цепь, в которой она будет единственным источником энергии, то ее внутренняя энергия должна убывать, а это означает, что ток через ванну потечет от зажима A к зажиму B. Следовательно, в самой цепи ток потечет от B к A. Таким образом, B есть положительный полюс.

Цепь, на всех элементах которой падение напряжения одинаково, представляет собой совершенно исключительный случай. На практике же каждый из таких элементов — сопротивление, диод, двигатель и ванна — может обладать в отношении падения напряжения и рассеяния самыми разнообразными характеристиками.

19. а) Как показали вычисления, сила тока в катушке равна 2А, а разность потенциалов на ее концах составляет 2,09 В. Таким образом, по закону Ома сопротивление R составляет

$$R = V/I = 2{,}09/2 = 1{,}05 \text{ Ом}.$$

б) Рассеиваемая мощность характеризует скорость рассеяния энергии в катушке в виде теплоты. Из задачи 17 следует, что она составляет 4,18 Дж/с. Но

$$I^2R = (2 \text{ Кл/с})^2 \cdot (1{,}05 \text{ В/А}) = 4{,}20 \text{ Дж/с}.$$

Таким образом, этот ответ верен с точностью до 0,5%. Этому не следует удивляться, поскольку в первом случае мы вычисляли силу тока по скорости теплоотвода.

20. Температура газа связана со средней кинетической энергией движения центров масс газовых молекул соотношением

$$mv^2/2 = 3kT/2,$$

где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Отсюда для электронов в металле получим $v^2 = 3kT/m$ и

$$v = \sqrt{3 \cdot (1{,}38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/°К}) \cdot 300 \text{ °К} / (9{,}11 \cdot 10^{-31} \text{ кг})} = 1{,}17 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

21. а) Электроны, которые смогут миновать фиксированную точку в проволоке за время Δt, находятся к началу этого промежутка времени не дальше, чем

на $v\Delta t$, до такой отметки. Они занимают объем $Av\Delta t$, а их число в этом объеме равно $nAv\Delta t$.

б) Ток равен полному заряду, проходящему за единичное время:

$$I = Q/\Delta t = qnAv\,\Delta t/\Delta t = qnAv.$$

в) Плотность есть масса единичного объема, т. е. произведение числа атомов в этом объеме на массу атома. Следовательно, n есть отношение «плотность/масса атома». Так как масса атома меди равна 63 а. е. м., число Авогадро атомов меди имеет полную массу 63 г, а масса, приходящаяся на атом, составляет 63 г/N_0. Следовательно,

$$n = 8{,}9\ \text{г/см}^3 \cdot (6{,}02 \cdot 10^{23})/63\ \text{г} = 8{,}5 \cdot 10^{22}\ \text{см}^{-3}.$$

г) Из п. б) следует, что скорость дрейфа

$$v = \frac{I}{qnA} = \frac{5\ \text{Кл/с}}{(1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл}) \cdot (8{,}5 \cdot 10^{22}\ \text{см}^{-3}) \cdot (8{,}3 \cdot 10^{-3}\ \text{см}^2)} =$$

$$= 4{,}4 \cdot 10^{-2}\ \text{см/с} = 0{,}44\ \text{мм/с}.$$

Этот ответ нужно сравнить с произвольной скоростью теплового движения, вычисленной в задаче 20. Из-за наличия огромного множества электронов проводимости в меди даже большие токи создают лишь весьма слабые изменения (возмущения) в их обычном тепловом движении. Предположение о том, что всякий атом меди в проволоке доставляет один электрон проводимости, представляется разумным, но даже если бы атомы доставляли в два-пять раз больше электронов проводимости, то и это в действительности почти не отразилось бы на скоростях дрейфа электронов.

23. Задачи 23 и 24 в своей совокупности выражают зависимость сопротивления проволоки от ее длины (задача 23) и площади ее поперечного сечения (задача 24).

а) Падение потенциала между концами проволоки B равно его падению между концами проволоки A (рис. 52). Поскольку концы проволоки B отстоят друг от друга в два раза дальше, чем концы проволоки A, электрическое поле E в проволоке B в два раза слабее электрического поля в проволоке A. Так как электрический ток есть результат наложения малой скорости дрейфа электронов на их быстрые тепловые перемещения, а сама скорость дрейфа пропорциональна напряженности электрического поля, скорость дрейфа электронов в проволоке B *составляет лишь половину* их скорости дрейфа в проволоке A, т. е. сила тока в проволоке B в два раз меньше силы тока в проволоке A. *Сопротивление* проволоки определяется законом Ома:

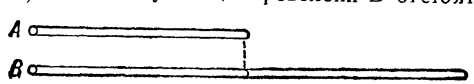
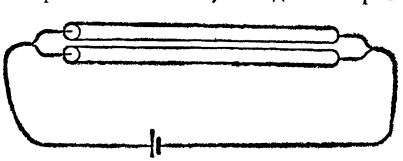


Рис. 52.

$$V = IR, \quad R = V/I.$$

Поскольку разность потенциалов V одинакова для обоих проволок, *сопротивление* проволоки B *в два раза больше* сопротивления проволоки A.

б) Если у нас имеются две проволоки из одинакового материала и одинакового поперечного сечения, но одна в n раз длиннее другой (где n — целое число), то мы сможем повторить приведенные выше рассуждения и показать, что если к концам этих проволок приложена та же самая разность потенциалов, то ток в данной проволоке в n раз меньше тока в короткой проволоке. Поэтому *сопротивление* длинной проволоки в n раз больше сопротивления короткой. Таким образом, *сопротивление прямо пропорционально длине*. Отсюда легко показать, что данная зависимость верна для двух проволок любой длины: сопротивление (проволок одинакового поперечного сечения и из одинакового материала) *пропорционально длине* проволоки.


Рис. 53.

24. а) Если к концам двух одинаковых проволок приложена одинаковая разность потенциалов, то в этих проволоках должны течь токи одинаковой силы. Этот вывод остается в силе, если для обеих проволок используется одновременно единый источник разности потенциалов (рис. 53). Что же касается электронов в проволоках, то они испытывают действие одинаковой электрической силы.

б) Полный ток, протекающий по объединенному проводнику, равен *удвоенному току* в любой из двух проволок.

в) Ток течет вдоль проволок в направлении действия электрического поля. Через цилиндрические поверхности проволок не течет никакого электрического тока. Поэтому неважно, соприкасаются они или же не соприкасаются по образующим. Таким образом мы можем две проволоки из п. б) привести в соприкосновение по направлению их длины и рассматривать их как одну проволоку. Ток через такой «новый» проводник с удвоенным поперечным сечением должен быть *в два раза больше* токов в исходных проволоках.

Всякую проволоку можно представить себе состоящей из многих параллельных тонких проволочек меньшего поперечного сечения, имеющих полную площадь поперечного сечения как у исходной проволоки. Представив себе каждую из двух проволок состоящей из тонких проволочек, мы убедимся в том, что сопротивление этих двух проволок зависит только от их полной площади поперечного сечения и не зависит от их формы. Таким образом, цилиндрическая проволока такого же поперечного сечения, как и суммарная площадь поперечных сечений двух проволок, имеет одинаковое с ними сопротивление.

Неважно, возьмем ли мы две одинаковые проволоки или же одну, но имеющую эквивалентную площадь поперечного сечения. Приложив к их (или к ее) концам заданную разность потенциалов, мы получим ток удвоенной силы по сравнению с током через одну из двух исходных проволок. По закону Ома $V=RI$. Поскольку сила тока I стала вдвое больше, а разность потенциалов V осталась прежней, сопротивление объединенного проводника стало в два раза меньше.

г) Только что проведенные рассуждения дают нам основания полагать, что сопротивление *обратно пропорционально* площади поперечного сечения.

25. а) Из графика на рис. 29.22, *а* узнаем, что при $I=5\cdot10^{-3}$ А разность потенциалов V равна 140 В. Ток той же самой силы в диоде (рис. 29.22, *б*) создается разностью потенциалов, равной 200 В.

б) Когда к диоду приложена разность потенциалов в 100 В, через него протекает ток силой около $2\cdot10^{-3}$ А. Раньше было показано, что такая же разность потенциалов должна быть приложена к концам сопротивления, а из графика 29.22, *а* видно, что при разности потенциалов 100 В через сопротивление течет ток силой $3\cdot10^{-3}$А.

в) Полный ток в точке A есть сумма токов, протекающих через сопротивление и диод, т. е. $(2+3)\cdot10^{-3}$ А$=5\cdot10^{-3}$ А.

г) Сопротивление цепи по закону Ома равно V/I. Это есть величина, обратная наклону прямой на графике 29.22, *а*. Если оси на этом графике поменять местами, то сопротивление станет просто равно наклону прямой. Из этого графика узнаем, что при $I=0$ напряжение V равно нулю, а при $I=15\cdot10^{-3}$А оно равно 430 В. Тогда сопротивление R найдем в виде

$$R=(430\text{ В}-0\text{ В})/(15\cdot10^{-3}\text{ А}-0\text{ А})=2{,}9\cdot10^{4}\text{ Ом}.$$

26. а) Поскольку поведение диода нельзя выразить просто через закон Ома, а характеризуется оно графиком 29.22, *б*, задачу в общем случае приходится решать графически. Однако в данном конкретном случае разность потенциалов столь велика, что ответ можно дать, фактически не строя график.

Нам известно общее падение напряжения на диоде и сопротивлении, а оно должно быть суммой падений напряжения на этих двух участках:

$$V_R+V_D=1000\text{ В}.$$

Через диод и сопротивление течет ток одинаковой силы. Возможный в данном случае максимальный ток ограничивается диодом, а из графика 29.22,*б* можно узнать, что он равен $7\cdot10^{-3}$ А. Ток такой силы мы получим при условии, что V_D

превосходит приблизительно 400 В. Из графика же 29.22, *а* видно, что для тока такой силы напряжение V_R должно составлять 200 В. Таким образом, напряжение V_D должно быть в действительности равно разности (1000—200) В=800 В, что превосходит разность потенциалов, требующуюся для достижения тока насыщения в диоде. Этим завершается круг наших рассуждений, подтверждая нашу догадку, что в действительности ток в сопротивлении представляет собой ток насыщения диода, равный $7 \cdot 10^{-3}$ А.

б) Как мы уже определили, падение напряжения на металлическом сопротивлении составляет 200 В. Общий способ решения данной задачи при любом приложенном напряжении состоит в рассмотрении обратной ситуации, когда известен

ТАБЛИЦА 10

Ток, 10^{-3} А	V_R, В	V_D, В	V_R+V_D, В
0	0	0	0
1	30	40	70
2	60	90	150
3	90	120	210
4	110	160	270
5	140	200	340
6	170	270	440
7	200	400 (и выше)	600 (и выше)

ток, а вычислять нужно общее падение напряжения V_R+V_D. Мы можем построить график изменения V_R+V_D в зависимости от силы тока I и прибегнуть к графической интерполяции для отыскания I при заданной разности напряжения V_R+V_D. Воспользовавшись графиками 29.22, *а* и 29.22, *б*, можно составить таблицу значений (табл. 10), построив затем соответствующий график (рис. 54).

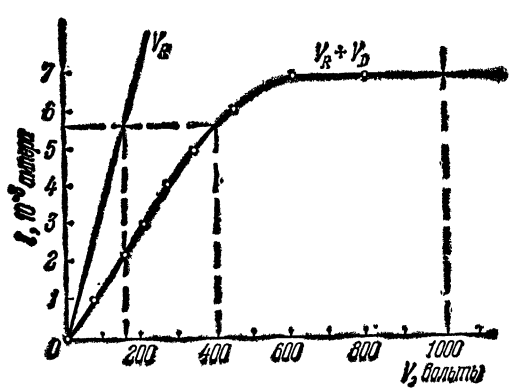


Рис. 54.

Такой график дает решение отправной задачи. Как нетрудно убедиться, это решение лежит в области высоких напряжений, где соблюдается очень простая закономерность. Предположим, что общее падение напряжения равно 400 В. Тогда из нашего графика находим, что ток приблизительно равняется $5{,}6 \cdot 10^{-3}$ А, а падение напряжения только на сопротивлении составляет 160 В.

27. Это прямая задача на приложение закона Ома к простой цепи с последовательным и параллельным соединениями ее элементов. Если данная задача

решается в классе, то ее лучше всего разобрать так, как это сделано в Учебнике без акцента на «формулы» для цепей.

а) Нам известно, что сумма падений напряжения на двух сопротивлениях равна $V_1+V_2=270$ В. Поскольку в любой точке цепи ток одинаков, можно записать $V_1=IR_1$ и $V_2=IR_2$. Следовательно,

$$V_1+V_2=I(R_1+R_2), \quad I=(V_1+V_2)/(R_1+R_2).$$

Падение напряжения на сопротивлении в 1 МОм равно

$$V_1=IR_1=(V_1+V_2)R_1/(R_1+R_2)=270\text{ В}\cdot 1\text{ МОм}/3\text{ МОм}=90\text{ В}.$$

б) Падение напряжения на сопротивлении в 2 МОм равно

$$V_2=IR_2=(V_1+V_2)R_2/(R_1+R_2)=270\text{ В}\cdot 2\text{ МОм}/3\text{ МОм}=180\text{ В}.$$

в) Если вольтметром измерять падение напряжения на сопротивлении 2 МОм, то это будет эквивалентно включению сопротивления 10 МОм параллельно сопротивлению R_2. Как и в п. а),

$$V_1+V_2=270\text{ В}, \quad V_1=IR_1, \quad V_2=I_aR_2=I_bR_m.$$

Поскольку сумма токов I_a+I_b должна равняться полному току, запишем

$$I=I_a+I_b=(V_2/R_2)+(V_2/R_m)=V_1/R_1.$$

Но $V_1=270\text{ В}-V_2$, так что

$$\frac{270\text{ В}-V_2}{R_1}=V_2\left(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_m}\right)=\frac{V_2(R_m+R_2)}{R_mR_2},$$

$$270\text{ В}-V_2=V_2R_1\left[\frac{R_m+R_2}{R_mR_2}\right],$$

$$270\text{ В}=V_2+V_2\left[\frac{R_1(R_m+R_2)}{R_mR_2}\right]=V_2\left[1+\frac{R_1(R_m+R_2)}{R_mR_2}\right].$$

Следовательно,

$$V_2=\frac{270\text{ В}}{1+R_1(R_m+R_2)/R_mR_2}=\frac{270\text{ В}}{1+1\text{ МОм}\cdot 12\text{ МОм}/20\text{ МОм}^2}=$$

$$=\frac{270\text{ В}}{1+{}^3/_5}={}^5/_8\cdot 270\text{ В}=170\text{ В}.$$

Эту задачу полезно решить для других разностей потенциалов и токов:

$$V_1=270\text{ В}-V_2=100\text{ В},$$
$$I=V_1/R_1=100\text{ В}/10^6\text{ Ом}=10^{-4}\text{ А},$$
$$I_a=V_2/R_2=170\text{ В}/(2\cdot 10^6\text{ Ом})=0{,}85\cdot 10^{-4}\text{ А},$$
$$I_b=I-I_a=0{,}15\cdot 10^{-4}\text{ А}.$$

г) В данном случае $R_1=2$ МОм, $R_2=1$ МОм; поэтому

$$V_2=\frac{270\text{ В}}{1+2\text{ МОм}\cdot 11\text{ МОм}/10\text{ МОм}^2}=\frac{270\text{ В}}{1+{}^{11}/_5}={}^5/_{16}\cdot 270\text{ В}=84\text{ В}.$$

Если учащиеся не заметили сами, что ответы пп. а) и б) не дают в сумме 270 В, хотя вольтметр должен показать 270 В при измерении разности потенциалов на концах двух сопротивлений, на данное обстоятельство полезно обратить их внимание.

Учащимся можно было бы задать вопрос о том, как можно использовать показания вольтметров в пп. в) и г) для определения разностей потенциалов без вольтметра. Это нетрудно сделать, если они найдут выражения для V_1 и V_2 в символах. Из п. в) известно, что

$$V_2=\frac{270\text{ В}}{1+R_1(R_m+R_2)/R_mR_2}=\frac{270R_mR_2}{R_mR_2+R_mR_1+R_1R_2}\text{ В};$$

из п. г) следует, что

$$V_1 = \frac{270\text{В}}{1 + R_2(R_m + R_1)/R_m R_1} = \frac{270 R_m R_1}{R_m R_2 + R_m R_1 + R_1 R_2}\ \text{В}.$$

Поэтому $V_2/V_1 = R_2/R_1$; следовательно, хотя фактические показания вольтметра не таковы, как без включения этого прибора, отношения остаются такими же.

Найти ответ на вопрос п. в) можно и по-другому. Заметив, что

$$I = V_2/R_2 + V_2/R_m = V_2\,(1/R_2 + 1/R_m),$$

мы сможем определить эквивалентное сопротивление параллельно соединенных сопротивлений R_2 и R_m следующим образом:

$$R_p = V_2/I,\ \text{т. е.}\ 1/R_p = I/V_2 = 1/R_2 = 1/R_m.$$

Таким образом,

$$R_p = R_2 R_m/(R_2 + R_m) = 2 \cdot 10\ \text{МОм}^2/12\ \text{МОм} = {}^5/_3\ \text{МОм},$$

$$V_2 = I R_p = 270\ \text{В} \cdot R_p/(R_1 + R_p) = (270\ \text{В} \cdot {}^5/_3)/{}^8/_3 = 170\ \text{В}.$$

Этот более обычный способ определяет эквивалентное сопротивление двух элементов цепи при их параллельном включении, дает простые формулы для запоминания и проще в алгебраическом отношении. Однако при данном подходе подлинный смысл того, что фактически происходит с токами и разностями потенциалов в цепи, не очевиден.

ГЛАВА

30 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Глава 30 знакомит с магнитным полем, его источниками, воздействием на электрические токи и движущиеся заряженные тела, измерением массы атомов магнитным масс-спектрометром; магнитное поле при этом описывается с помощью понятия его «циркуляции» вокруг тока.

В рекомендуемых планах проработки курса отмечается, что настоящая глава (вместе с гл. 29 и большей частью гл. 31) может быть опущена без существенного ущерба для понимания последующих глав о строении атомов. Преподавателям, испытывающим нехватку времени, полезно не забывать об этом. В гл. 30 излагается богатый материал по магнитному полю. Изложение ведется не в обычном плане. Вместо того, чтобы строить объяснение вокруг понятий о магнитных полюсах и их силе, с самого начала вводится представление о витке с током. Такой подход позволяет организованно и эффективно изложить материал о магнитных явлениях. И хотя подробности описываемых в данной главе измерений теоретических трудностей не представляют, в ней излагается много фактических данных. На наш взгляд, для надлежащей проработки этой главы потребуется около двух недель. И хотя материал можно пройти за одну неделю, попытки сделать это за еще меньшее время почти наверное приведут к путанице. Подобным же образом еще одна неделя потребуется на гл. 31. Поэтому, если у вас нет двух недель для гл. 30 и 31, переходите сразу к разделу 31.9.

Краткое содержание главы 30

Разделы 30.1—30.3. Глава начинается с описания стрелки компаса в качестве устройства, позволяющего обнаруживать магнитное поле и определять его направление. Изучаются магнитные поля, связанные с постоянными магнитами и электрическими цепями, в которых течет ток, разной формы. В целях исследования векторного характера магнитного поля в связи с магнитным полем Земли используется контур тока особой формы — проволочного витка. Сложение магнитных полей подчиняется правилам векторного сложения при условии, что «сила» магнитного поля считается пропорциональной создающему поле току.

Разделы 30.4—30.6. В этих разделах рассматривается сила, испытываемая проводником с током в магнитном поле. Описываются взаимно перпендикулярные направления поля, тока и силы, а также величина этой силы. Единица измерения магнитной индукции выражается через ньютоны, амперы и метры. О магнитных силах в амперметрах и электродвигателях говорится для того, чтобы подчеркнуть, что изучаемые нами силы играют важную роль в технике. Наконец, выводится выражение для силы, с которой магнитное поле действует на движущиеся заряженные частицы, и показывается, что это соотношение подтверждается опытом.

Разделы 30.7, 30.8. В этих двух разделах прилагаются некоторые из представлений, сформулированных в предшествующих разделах, к описанию экспериментальной методики измерения массы атомных частиц.

Разделы 30.9—30.11. В данных разделах формируется представление о «циркуляции» магнитного поля вокруг постоянного тока, начиная с поля вокруг длинного прямого провода, последующего обобщающего перехода на токи иной конфигурации и кончая приложением теоремы о циркуляции к соленоиду, чтобы опытным путем определить коэффициент пропорциональности между «силой» магнитного поля и током.

План изучения главы 30

В табл. 11 рекомендуются два варианта плана проработки настоящей главы, согласующихся с общими планами проработки части IV (см. табл. 1 на стр. 284).

ТАБЛИЦА 11

Глава 30	10-недельный план изучения части IV			15-недельный план изучения части IV		
Разделы	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты
30.1—30.3	1	1	IV.10	2	1	IV.10
30.4—30.6	1	1	IV.11	2	1	IV.11
30.7—30.8	0,5	1	IV.12	1	1	IV.12
30.9—30.11	1,5	0	—	3	1	IV.13

Дополнительные материалы к главе 30

Лаборатория. В опыте IV.10 (*Магнитное поле тока*) с помощью магнитного компаса определяют величину и направление магнитного поля в центре витка проволоки, по которому течет ток. Опыт показывает, что магнитные поля складываются векторно и пропорциональны создающим их токам. Данный опыт задуман как введение к разделу 30.3. Для проведения этого опыта требуется лишь часть урока, так что его можно объединить с обсуждением материала курса.

Опыт IV.11 (*Измерение индукции магнитного поля*) предназначается для измерения магнитных сил с помощью простых токовых весов и определения единицы «силы» магнитного поля. Это очень важный опыт, который нужно ставить после изучения и обсуждения раздела 30.4.

Опыт IV.12 (*Масса электрона*) проводится с использованием обычной настроечной лампы-глазка и катушек, применявшихся в опыте IV.11. Это очень важный опыт. Его постановке должны предшествовать опыт IV.11 и изучение материала раздела 30.6.

Опыт IV.13 (*Магнитное поле вблизи длинного прямого провода*) ставится по тому же методу, что и опыт IV.10. Величина «силы» магнитного поля определяется как функция расстояния от проводника.

Домашние, классные и лабораторные задания. Ознакомьтесь с замечаниями, ответами, решениями и таблицей классификации задач по степени их трудности на стр. 382.

30.1. Магнитная стрелка

Цель. Ознакомить с фундаментальным средством обнаружения существования магнитного поля и определения его направления.

Содержание. Стрелка магнитного компаса выявляет существование магнитного поля посредством выстраивания вдоль его силовых линий. Северный полюс стрелки указывает направление магнитного поля.

Методические указания. Излагаемые в данном разделе представления просты, но с теоретической точки зрения важны для проработки последующих разделов. Этот раздел рекомендуется изучить как домашнее задание перед постановкой опыта IV.10.

Принято говорить о «северном полюсе» и «южном полюсе» магнита как о равных по величине, но противоположных по знаку магнитных зарядах в этих точках. Но, как это отмечается в Учебнике, никому еще не удалось разделить северный и южный магнитные заряды, хотя предпринимался ряд экспериментальных попыток в данном направлении, причем некоторые из них относятся к самому последнему времени. Поэтому в Учебнике не вводятся понятия о магнитных полюсах, а рисуется картина магнитов и магнитных полей, как бы создаваемых электрическими токами. Изложение с использованием представления о витке с током отличается от отхода с позиции «полюсов», хотя в обоих случаях даются одинаковые ответы на вопросы, предусматриваемые программами средних учебных заведений. Насколько нам известно, реально существуют не полюсы как таковые, а витки с током.

Ознакомьтесь с указаниями на стр. 508, относящимися к опыту IV. 10, чтобы знать, как можно изготовить хороший компас из простых деталей.

30.2. Магнитные поля магнитов и токов. Линии магнитного поля

Цель. Описать два главных источника магнитных полей — постоянные магниты и электрические токи — и дать представление о том, что линии магнитного поля, в отличие от линий электрического поля, не имеют ни начала, ни конца.

Методические указания. Проработать как задание для домашнего чтения перед постановкой опыта IV.10.

Эрстед при демонстрации опытов на лекции по электричеству в 1819 г. открыл, что электрический ток порождает магнитное поле. Еще в 1774 г. напрасно предлагалось вознаграждение тому, кто сможет установить какую-либо взаимосвязь между электричеством и магнетизмом. До открытия Эрстеда это никому так и не удалось сделать. Как отмечается в Учебнике, опыт Эрстеда легко повторить: кусок проволоки, практически любая батарейка и стрелка компаса — вот все, что нужно для этого. Ток силой 5 А заставит стрелку компаса сильно отклониться.

Данный раздел носит описательный характер. Он готовит учащихся к восприятию количественного материала, излагаемого в следующем разделе. Пожалуй, лучший способ оказания помощи учащимся в приобретении нужных представлений состоит в том, чтобы заставить их позабавиться с постоянными магнитами и компасами, быть может, даже в форме домашнего задания. Например, всякий человек, имеющий в своем распоряжении длинный стержневой магнит и компас, может убедиться в том, что стрелка компаса всегда выстраивается по направлению, подобному характеризуемому железными опилками на рис. 30.5, *а*. Поля вокруг стержневого и подковообразного магнитов легко исследовать с помощью желез-

ных опилок. Для воспроизведения такой картины, как на рис. 30.5, *а*, требуются токи довольно большой силы (не исключено, что для этого понадобится автомобильный аккумулятор). Некоторые учащиеся могут захотеть сфотографировать картины, образуемые железными опилками в магнитном поле.

30.3. Сложение векторов, характеризующих магнитные поля

Цель. Показать векторную природу магнитного поля при условии, что «сила» магнитного поля по определению пропорциональна току, который создает это поле.

Содержание. С помощью правила векторного сложения исследуется векторная природа магнитного поля. Два поля равной величины — поле Земли (горизонтальная компонента) и поле, создаваемое током в круглом витке проволоки (подобранное опытным путем так, чтобы уравновесить поле Земли), складываются под разными углами. Это позволяет убедиться в соблюдении правила сложения векторов. Затем определив «силу» магнитного поля как величину, пропорциональную силе порождающего его тока, создаем поля разной «силы». И опять оказывается, что правила векторного сложения соблюдаются и в данном случае.

Методические указания. Представления, формируемые в настоящем разделе, важны для понимания последующих разделов данной главы и материала, излагаемого в следующей главе. Опыт IV.10 и любые его варианты, которые учащиеся захотят поставить для экспериментальной проверки излагаемых в настоящем разделе представлений, могут считаться главным методическим звеном при проработке настоящего раздела.

Главное в настоящем разделе — показ того, что магнитные поля подчиняются правилам векторного сложения и что стрелка компаса представляет собой ценное измерительное средство.

С использованием стрелки компаса для измерения «силы» магнитного поля в единицах поля Земли (горизонтальная компонента) вы, может быть, знакомы по тангенс-гальванометру. Подобный способ измерения «силы» магнитного поля хорош только тогда, когда рядом нет больших масс магнитного материала вроде железа. Если же это условие не соблюдено, то ток в круглом витке намагнитит железо, что создаст побочное поле и заставит стрелку занять неправильное положение.

Опыт IV.10 нужно поставить до проработки настоящего раздела или в процессе такой проработки.

30.4. Силы, действующие на токи в магнитных полях. Единица магнитной индукции

Цель. Найти для тока в магнитном поле направление действия силы, испытываемой током, по отношению к направлениям тока и магнитного поля и связать величину этой силы с током, полем и геометрией.

Содержание. Ознакомить учащихся с правилом правой руки, характеризующим взаимную перпендикулярность $\boldsymbol{I}$, $\boldsymbol{B}$ и $\boldsymbol{F}$. Сила пропорциональна B, I и l, где l есть длина проводника в поле.

Практическая единица измерения магнитной индукции определяется как сила, с которой магнитное поле действует на ток. Одна единица магнитной индукции есть величина, действующая на проводник длиной один метр, по которому течет ток силой один ампер, с силой один ньютон перпендикулярно к полю.

Эта единица, правильно называемая ньютоном на ампер-метр (1Н/(А·м)), идентична единице вебер на квадратный метр (вб/м^2) в системе МКСА и равна 10^4 гаусс в системе СГС.

Методические указания. Без понимания материала настоящего раздела нельзя усвоить то, что излагается в остальной части главы. Учащийся должен знать не только то, как надо находить направление действия силы, но и делать это осмысленно. Иными словами, он должен знать, есть ли эта сила отталкивания или притяжения, действует ли она вверх или вниз, направо или налево. Это сводится к чистому запоминанию, но оно необходимо из-за произвольности взаимосвязи между смыслом вращения тока и направлением порождаемого током поля, которое мы называем положительным.

Мнемонические приемы вроде правила правой руки опасны, и учащийся должен понимать, что ему нужно помнить, направление чего указывает большой палец и направление чего — остальные пальцы правой руки. Он еще не готов к пользованию обозначениями векторного умножения, но помнить порядок множителей полезно. Надо запомнить порядок IB. Направление первого множителя указывает большой палец, направление второго — остальные пальцы. Учащийся, знакомый с правой системой координат, может предпочесть представлять себе, что I имеет направление вдоль x, $B_\perp$ — вдоль y и F — вдоль z. Преподавателю предстоит решить, вводить ли представление о направлении движения винта с правой нарезкой как направлении I, когда такой винт завинчивается в B.

Опыт IV.11 должен сопровождать или следовать за обсуждением материала настоящего раздела в классе. Это очень важный опыт. Если у вас есть время, отведите ему место в плане учебной работы.

30.5. Измерительные приборы и электродвигатели

Цель. Напомнить учащимся, что силы, действующие на токи в магнитных полях, приводят в движение электродвигатели и измерительные приборы.

Содержание. Даются описательные характеристики амперметра и электродвигателя постоянного тока.

Методические указания. Прорабатывается как задание для домашнего чтения.

Следует обратить внимание на то, что в данном разделе не предпринимается никаких попыток вывести выражение для момента вращения в амперметре или электродвигателе.

Из этого ознакомительного изложения предмета учащимся должно быть понятно, что нет путей для доказательства пропорциональности силы, действующей на ток, индукции $B_\perp$ или ее перпендикулярности к $\boldsymbol{B}$ и $\boldsymbol{I}$. Это — экспериментальные факты, хотя из обстоятельного логического анализа нашего определения B, взятого вместе с теорией атомного магнетизма нашей стрелки компаса, следует, что они подразумеваются в нашем *определении* B. Пропорциональность силы току и длине токонесущего проводника — логическая необходимость.

От весьма пытливого учащегося можно ожидать такой вопрос: Почему нам приходится пользоваться правилом правой руки для определения направления действия силы? Почему природа не левша? На такой вопрос очень трудно ответить правильно. Ответ должен гласить, что природа, по крайней мере в данном отношении, здесь ни при чем. Можно было бы выбрать за направление индукции поля направление стрелки компаса, обращенной к южному полюсу. Тогда нам при-

шлось бы отказаться от правила правой руки (рис.30.8) и обратиться к правилу левой руки. Чтобы найти в таком случае направление действия силы, испытываемой током в поле, нам пришлось бы направить большой палец левой руки вдоль тока, остальные ее пальцы — по направлению поля, а направление шлепка ладонью указало бы искомое направление (см. рис. 30.13). Составляемые таким образом прогнозы относительно направления действия силы, испытываемой током в магнитном поле, должны согласовываться с экспериментальными наблюдениями. Ясно, что нам решать, какое из двух направлений мы выберем в качестве направления индукции поля. Именно этот выбор, а не природа определяет кажущуюся односторонность явления. Наблюдаемые нами силы, разумеется, не зависят от нашего произвольного выбора. Однако рассказывать об этом мало смысла, если не был задан такой вопрос. Эти замечания приведены здесь просто из желания вооружить преподавателя ответом на подобный довольно каверзный вопрос.

30.6. Силы, действующие на заряженные частицы, которые движутся в магнитном поле

Ц е л ь. Вывести выражение для силы действия магнитного поля на движущуюся заряженную частицу в предположении, что найденная в разделе 30.4 сила действия на ток есть просто сумма сил, действующих на элементарные частицы, движение которых создает ток.

С о д е р ж а н и е. Выводится соотношение между потоком заряженных частиц и током. Результат подставляется в выражение для силы действия магнитного поля на ток, чтобы найти силу действия магнитного поля на движущийся заряд. Этот результат сопоставляется с экспериментом посредством вычисления на его основе радиуса кривизны траектории протона, обладающего известным количеством движения, в магнитном поле.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Важно уяснить эквивалентность тока и потока (пучка) заряженных частиц в том,что касается отклонения в магнитном поле. Эта эквивалентность не только имеет практические приложения, но и, будучи осознанной, привносит упорядоченность и последовательность в методику изложения материала, оставляя меньше места механическому заучиванию. Выражение $F=qvB_{\perp}$ находит, разумеется, много приложений.

Связь между числом элементарных зарядов, приходящимся на единичную длину проводника, и числом зарядов, которые ежесекундно проходят через конкретную точку, не сразу поддается усвоению и всегда создает трудности для некоторых учащихся. Рис. 30.19 помогает прояснить такую связь.

Много физики заключено в примере с протоном, рассматриваемом в конце настоящего раздела и вновь анализируемом в разделе 30.7. Здесь используются понятия об энергии, центростремительной силе и условиях движения по окружности. Если у вас достаточно времени, то полезно остановиться на данном примере подробнее. Если же вы испытываете нехватку времени, то данный пример следует пройти довольно быстро. В этом случае, видимо, лишь отдельные учащиеся уяснят детали, тогда как остальные будут знать, что такое измерение можно произвести.

Если у вас есть время, то поставьте отличный опыт IV.12. Ему должен предшествовать опыт IV.11. Поскольку в последующих главах лабораторным занятиям отводится мало места, с постановкой опыта IV.12 можно повременить, пока не удастся преодолеть отставание.

30.7. Измерение масс заряженных частиц

Цель. Показать, как можно измерить массы заряженных частиц, разгоняя их до известной энергии и наблюдая за их отклонением в известном магнитном поле, перпендикулярным к их скорости.

Содержание. Кинетическую энергию частицы вычисляют, как об этом говорится в разделах 30.6 и 30.7, по формуле $mv^2/2=qV$, где q есть заряд и V — разность электрических потенциалов. Выводится формула для количества движения в виде $mv=qBr$. Эти две формулы объединяются в одно соотношение, которое разрешают сначала относительно скорости, а затем относительно массы.

Методические указания. Если у вас есть время, хотя бы полтора урока, проработайте данный материал тщательнее. Описанный способ измерения массы заряженных частиц поражает своим изяществом. Но если у вас этого времени нет, то не следует ожидать, что средний учащийся усвоит материал. Если вы испытываете нехватку времени, то лучший способ проработки раздела 30.7 состоит в том, чтобы задать его для домашнего чтения и сэкономить классное время.

В данном разделе, как и в предшествующем, индукция магнитного поля выражается в Н/[(элем. зар./с)·м]. Применяющиеся для измерения массы заряженных частиц магнитные поля представляются как раз достаточными в целях обеспечения разумного отклонения частиц, но их индукция выражается столь малыми числами, что они не производят сильного впечатления. В связи с этим интересно отметить, что электромагниты с железными сердечниками создают магнитные поля, индукция которых достигает приблизительно 2 Н/(А·м). В свете этого обстоятельства следует убедиться в том, что упоминавшиеся магнитные поля имеют разумную индукцию. Способ подстановки численных значений непосредственно в уравнения и разрешение последних сначала относительно скорости, а затем относительно массы не трудны для понимания и дают прямые результаты. Отдельные учащиеся могут предпочесть разрешить основное соотношение алгебраически относительно массы в виде $m=qB^2r^2/2V$ и лишь затем подставлять численные значения.

Отметим, что изложенный в разделе 30.7 способ измерения массы атомных частиц дополняет метод определения скорости по времени пролета, речь о котором велась в разделе 29.2. Поскольку учащиеся знакомы с последним методом, соответствующий раздел в магнетизме можно опустить. Однако магнитный способ измерения массы атомных частиц гораздо изящнее и практичнее, в связи с чем он получил большее распространение.

30.8. Что представляют собой альфа-частицы?

Цель. Описать, как можно с помощью скрещенных электрического и магнитного полей отличить быстро летящие заряженные частицы одного сорта от другого.

Содержание. Описаны два опыта, проведенных Резерфордом и Робинзоном на α-частицах полония: 1) количество движения α-частиц измеряется в магнитном поле; 2) скрещенные электрические и магнитные поля подбирают так, чтобы пучок α-частиц двигался без отклонения; 3) это дает скорость v, равную отношению E/B; 4) разделив количество движения на скорость, найдем массу, которая равна массе атома гелия.

Методические указания. Отклонение α-частиц используется опять в гл. 32 как важное средство исследования строения атомов. Подобно масс-спектро-

скопическому способу определения скорости с помощью скрещенных полей олицетворяет собой и важную методику, и хороший пример проектирования опытов. Данный раздел следует проработать почти целиком как задание для домашнего чтения, уделив ему минимальное классное время.

30.9. Магнитное поле вблизи длиного прямого провода

30.10. Циркуляция вектора *B*

Цель. Определить индукцию магнитного поля на расстоянии r от длинного прямого провода и обобщить полученный результат, воспользовавшись понятием «циркуляция» вектора магнитной индукции $\boldsymbol{B}$ вокруг создающего магнитное поле тока.

Содержание. Описаны результаты первого количественного исследования магнитного поля тока вблизи длинного прямого провода, проведенного Био и Саваром. Циркуляция вектора $\boldsymbol{B}$ вдоль пути, представляющего собой концентрическую окружность относительно тока, определяется как произведение касательной составляющей вектора индукции $\boldsymbol{B}$ на длину замкнутой кривой, к которой она касательна. Таким образом, для пути в виде концентрической окружности циркуляция $2\pi rB$ просто равна KI, где K— коэффициент пропорциональности. Следовательно, циркуляция зависит только от силы тока, протекающего вдоль оси окружности, и совсем не зависит от радиуса последней!

Более того, показывается, что это есть только частный случай более общего закона циркуляции, который гласит: «В общем случае можно выбрать *любую* замкнутую кривую ..., умножить длину каждого достаточно короткого и потому почти прямолинейного отрезка на касательную составляющую вектора $\boldsymbol{B}$ и, наконец, сложить все эти произведения, взятые для всех этих отрезков. Полученная сумма носит название циркуляции вектора $\boldsymbol{B}$ по замкнутому контуру». Циркуляция вектора индукции зависит *только* от суммарного (результирующего) значения силы токов, пронизывающих замкнутый контур.

Методические указания. Раздел 30.9 лучше всего проработать как лабораторный опыт IV.13, если вы не испытываете недостатка времени. Если же у вас наметилось отставание, то надо просто изложить материал данного раздела как исторический факт, поддающийся легкой проверке в лабораторных условиях. Проработка раздела 30.10 сопряжена с гораздо бо́льшими трудностями из-за абстрактной (отвлеченной) природы «циркуляции». Циркуляция вокруг длинного проводника, рассматриваемая в разделе 30.9, поддается легкой проверке в случае замкнутого контура в виде концентрической окружности, причем учащиеся в большинстве своем легко согласятся с тем, что такая циркуляция не должна зависеть от расстояния до проводника. Те же учащиеся, которым захочется выбрать некруговую или неконцентрическую траекторию, могут вычислить циркуляцию вокруг прямого проводника для подобных контуров посредством графического анализа. Экспериментальное измерение циркуляции требует много времени и сопряжено с довольно утомительными процедурами, так что в данный момент проработки Учебника проводить его не рекомендуется. Сами учащиеся без труда могут убедиться в том, что циркуляция равна нулю, если контур не охватывает тока в двух предельных случаях, когда магнитное поле однородно (поле Земли) и когда поле создается током, текущим по прямому длинному проводу. И в данном случае это следует сделать скорее аналитически, нежели экспериментально, причем некоторые контуры поддаются расчету гораздо проще, чем контуры иной формы.

30.11. Однородные магнитные поля

Цель. Определить экспериментально величину коэффициента пропорциональности в законе о циркуляции и получить тем самым полные уравнения магнитного поля, создаваемого токами различных конфигураций.

Содержание. Теорема о циркуляции распространяется на поле длинного соленоида с выбором для расчетов прямоугольного контура. Это позволяет нам заранее определить поле внутри соленоида, выразив его через число витков, приходящихся на единичную длину соленоида. Неизвестной при этом остается только постоянная в теореме о циркуляции. Взяв токовые весы, теперь можно в опыте IV.10 измерить как ток, так и индукцию поля в абсолютных единицах, что позволяет выразить эту постоянную в виде

$$K = 2 \cdot 10^{-7}\ \text{Н/А}^2.$$

Причина, почему эта постоянная выражается столь простым числом, заключается в удачном выборе единиц для выражения силы тока в амперах через число элементарных частиц.

Методические указания. Единственным местом в данном разделе, трудно поддающимся усвоению учащимися, является вычисление циркуляции вдоль специально выбранного контура вокруг соленоида. После того как такое вычисление удачно закончено благодаря целесообразному выбору контура, полезно уравновесить токовые весы еще один раз и предоставить некоторым учащимся возможность повторить опыт, рассматриваемый в разделе 30.11 Учебника, с целью самостоятельного определения постоянной K в выражении для циркуляции.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам

В табл. 12 задачи распределены по степени их трудности и по разделам, к которым они относятся. Отдельно выделены задачи, предназначающиеся для разбора на классных занятиях. Задачи, рекомендуемые для первоочередного решения, помечены значком #.

ТАБЛИЦА 12

Разделы	Со звездочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
30.1—30.3	1—5	6	7#, 8		7#
30.4, 30.5	9—11, 15, 16		12, 14	13	13
30.6—30.8	17, 18, 22	19, 23, 26#	21, 25, 27#	20, 24	20
30.9—30.11	28—30	31	32, 33#, 34		33#

Краткие ответы

1*. Опилки будут выстраиваться вертикально, перпендикулярно к листу бумаги.

2*. Магнитные линии не имеют ни начала, ни конца и представляют собой замкнутые линии различной формы.

3*. В обоих случаях по часовой стрелке.

4*. Индукция общего поля должна быть в $\sqrt{2}$ раза больше индукции каждого из них по отдельности.

5*. Индукция магнитного поля провода пропорциональна силе тока, протекающего по этому проводу.

9*. Параллельно полю, в том же или противоположном с ним направлении.

10*. Вниз.

11*. $F=2{,}1$ Н.

15*. Сила прямо пропорциональна углу отклонения.

16*. Либо переключить полюсы батареи, либо изменить направление магнитного поля на обратное. Нельзя одновременно переключить полюсы и изменить направление поля на обратное.

17*. Радиус возрастет пропорционально квадратному корню из ускоряющего напряжения.

18*. Сила действия магнитного поля на движущийся заряд зависит от скорости движения заряда, знака и величины заряда и компоненты индукции магнитного поля, перпендикулярной к скорости.

22*. 360 эВ$=5{,}76\cdot 10^{-17}$ Дж.

28*. $2\pi KI$.

29*. Нуль.

30*. $B=2\pi\cdot 10^{-3}$ Н/(А·м)$\approx 6\cdot 10^{-3}$ Н/(А·м).

Ответы с указаниями и решениями

6. а) Поскольку нам известны направление и относительная величина обоих полей, можно в определенном масштабе построить векторную диаграмму и найти результирующий вектор магнитного поля $\boldsymbol{B}_{\text{рез}}$. Отсюда можно определить как величину (по отношению к $\boldsymbol{B}_3$), так и направление $\boldsymbol{B}_{\text{рез}}$ (рис. 55).

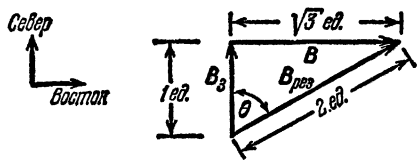


Рис. 55.

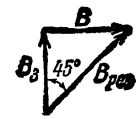


Рис. 56.

Некоторые учащиеся увидят в этой векторной диаграмме сходство с треугольником со сторонами в пропорции $1:\sqrt{3}:2$, т. е. с прямоугольным треугольником, острые углы которого равны 30° и 60°. Воспользовавшись тригонометрическим соотношением $\operatorname{tg}\theta=B/B_3=\sqrt{3}$, находим, что $\theta=60°$. Стрелка компаса установится под углом 60° к направлению на север в сторону востока.

б) Если считать и дальше, что горизонтальное однородное магнитное поле $\boldsymbol{B}$ направлено к востоку, то его величину можно найти, построив треугольник векторного сложения для $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{B}_3$ и $\boldsymbol{B}_{\text{рез}}$. Эти три вектора образуют прямоугольный равнобедренный треугольник, так что $B=B_3$ (рис. 56).

7. По правилу правой руки находим, что магнитное поле, создаваемое током I_1, имеет направление вверх по вертикали к плоскости страницы; магнитное же поле, создаваемое током I_2, направлено вверх по вертикали в плоскости страницы (см. рис. 57, *а*). Поскольку индукция поля пропорциональна порождающему его току, построим в масштабе диаграмму сложения двух векторов, чтобы найти результирующий вектор (рис. 57, *б*). Угол θ между результирующим вектором $\boldsymbol{B}_{\text{рез}}$ и вектором индукции поля $\boldsymbol{B}_2$, создаваемым током I_2, равен 37°. Этот ответ можно получить и тригонометрически, поскольку $\operatorname{tg}\theta=B_1/B_2={}^3/_4=0{,}75$.

8. Если мы станем пропускать ток в данный момент времени только через один из двух витков, то мы сможем получить четыре возможных варианта поля, отвечающих току в одном или другом направлениях в каждом витке. Если же пропускать токи в обоих витках одновременно, то создается возможность получения еще четырех возможных вариантов поля, соответствующих всем мыслимым сочетаниям. Отсюда полное число различных полей получается равным восьми.

12. а) Ток в проводнике, параллельном оси соленоида, тоже параллелен полю в соленоиде (см. рис. 30.32). Поэтому компонента вектора индукции поля $\boldsymbol{B}$,

перпендикулярная к току, равна нулю. Сила действия на проводник в данном случае равна *нулю*. (Эффектами у конца соленоида, где вектор $\boldsymbol{B}$ не совсем параллелен току, можно пренебречь.)

б) Как выяснилось в первом случае, проводники, по которым ток притекает к CD и утекает от CD, параллельны полю. Поэтому никакая сила на них не действует. Ток в CD перпендикулярен к полю. По правилу правой руки, изложенному в разделе 30.4, на отрезок CD действует сила, направленная вниз. Величина этой силы равна BIl; следовательно,

$$F=(1\cdot 10^{-2})\cdot 1\cdot 0{,}02=2\cdot 10^{-4}\ \text{Н (вниз)}.$$

в) Если предположить, что коромысло весов имеет одинаковые плечи, силу, найденную во втором примере, должен уравновесить вес массы m ($w=mg$), который должен равняться $2\cdot 10^{-4}$ Н. Разрешив полученное соотношение относительно m ($g=9{,}8$ м/с^2), найдем, что

$$m=2\cdot 10^{-4}/9{,}8\approx 2\cdot 10^{-5}\ \text{кг}.$$

г) Вес массы можно было бы заменить силой действия растянутой пружины. Растяжение пружины приблизительно пропорционально растягивающей силе,

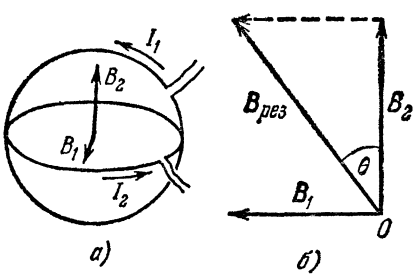


Рис. 57.

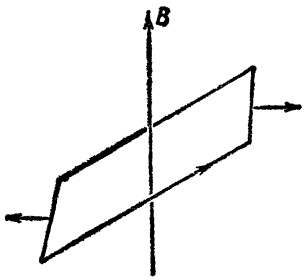


Рис. 58.

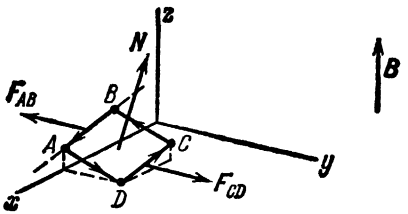
а магнитная сила пропорциональна току, так что шкалу пружинных весов можно было бы разметить линейным образом, чтобы проградуировать ее непосредственно в амперах.

13. а) Предположим, что плоскость витка не перпендикулярна к полю (рис. 58). Тогда ток в витке станет испытывать действие сил, стремящихся растягивать виток и установить его в плоскости, перпендикулярной к магнитному полю. При более сложных ориентациях возникнут более сложные силы, но опять-таки они станут вращать виток, чтобы установить его в плоскости, перпендикулярной к полю.

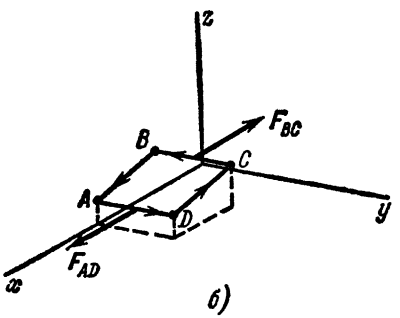
Если вас вынудят на более обстоятельное объяснение, то его можно было бы провести следующим образом.

На рис. 59, *а* показано совершенно произвольное размещение квадратного витка в магнитном поле. Здесь мы выбрали поле (считающееся однородным) так, чтобы его направление совпадало с положительным направлением оси z. Квадратный виток $ABCD$ первоначально ориентирован так, что его сторона AB лежит в плоскости xz. Стрелками показано направление течения тока в витке. Вектор $\boldsymbol{N}$ есть нормаль к плоскости витка. Воспользовавшись правилом правой руки, покажем силы, действующие на стороны AB и CD. Направление поля параллельно оси z, а ток по AB течет в плоскости xz; сила перпендикулярна к плоскости, определяемой током и полем; следовательно, сила $\boldsymbol{F}_{AB}$ перпендикулярна к плоскости xz и имеет направление в отрицательную сторону оси y. $\boldsymbol{F}_{CD}$, т. е. сила действия на сторону CD, равна по величине и противоположна по направлению силе $\boldsymbol{F}_{AB}$ (виток представляет собой квадрат). Таким образом, CD лежит в плоскости, параллельной плоскости xz, а эта плоскость тоже параллельна полю. Более того, компонента индукции поля, перпендикулярная к току, одинакова как для CD, так и для AB, потому что эти стороны тоже параллельны друг другу.

Пусть виток вращается вокруг стороны AB как оси. Тогда под действием силы F_{CD} виток начнет поворачиваться, пока две стороны AD и BC не станут параллельными оси y. Такая ситуация показана на рис. 59, *б*. На рис. 59, *в* мы смотрим вдоль оси y на плоскость xz. Такие же рассуждения можно теперь повторить и в отношении пары сил F_{AD} и F_{BC}. Они равны по величине и противоположны по направлению (компонентой поля, перпендикулярной к току, является просто само поле). Если виток закрепить так, чтобы он вращался вокруг стороны AD как оси, то он станет поворачиваться, пока не займет перпендикулярное к полю положение (в данном случае параллельное оси x).



б) Когда же виток располагается перпендикулярно к полю, то на его стороны действуют силы, показанные на рис. 60. Поскольку все стороны витка имеют одинаковую длину и поскольку во всех его сторонах течет ток одной и той же силы, действующие на стороны витка силы должны быть одинаковой величины. Поэтому результирующая действия этих четырех сил на виток равна нулю. Эти силы стремятся растягивать виток по всем четырем направлениям, удерживая его в перпендикулярном к полю положении.



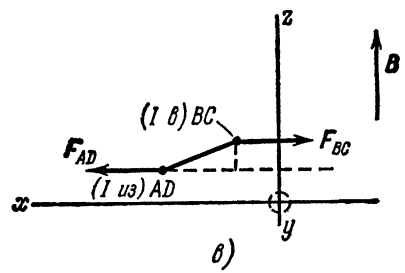


Рис. 59.

Замечания. 1. Если бы виток находился в неоднородном поле, то он все-таки проявлял бы тенденцию к повороту в такое положение, в котором его плоскость была бы перпендикулярной к полю в определенном усредненном смысле. (В таком случае можно было бы определить поля, в которых виток не стал бы поворачиваться.) После такого поворота на виток могла бы действовать та или иная результирующая сила, стремящаяся к его параллельному смещению. Такую неуравновешенную силу можно разложить на две компоненты: одну, параллельную плоскости витка, и другую, перпендикулярную к этой плоскости. Не составляет труда показать, что обе эти компоненты имеют такие направления, которые должны перемещать виток в область самого сильного магнитного поля.

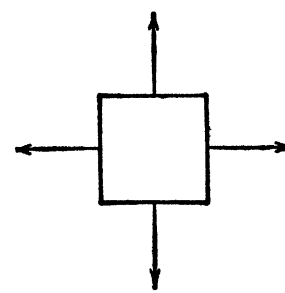


Рис. 60.

2. Если вспомнить, что полосовой магнит эквивалентен виткам тока определенной конфигурации с плоскостями, перпендикулярными к магниту, то этой эквивалентностью, взятой в обращенном виде, можно воспользоваться для того, чтобы попытаться найти решение п. а) данной задачи. Заменим квадратный виток

с током полосовыми магнитами надлежащей конфигурации, лежащими по направлению вектора N. Они, как известно, выстроятся по полю. Таким образом, виток с током будет располагаться своей плоскостью перпендикулярно к полю. Более того, существует еще одно положение равновесия для витка с током. Это — обращенное положение. В этом положении сила, действующая на каждую сторону витка, направлена не наружу, а внутрь. Любое незначительное отклонение от положения точной перпендикулярности приведет к переворачиванию катушки действующими на нее силами. Равновесие подобного рода и называют поэтому неустойчивым. Когда же силы действуют наружу, равновесие устойчиво, так как при любом незначительном отклонении они восстановят прежнее положение.

14. а) Полезный интервал показаний наших пружинных весов простирается от 2,4 до 5 Н, т. е. составляет 2,6 Н. При силе тока по 0,5 А на 0,3 Н мы получим максимальный интервал, равный

$$2{,}6\ \text{Н}\cdot 1{,}7\ \text{А/Н} = 4{,}4\ \text{А}.$$

б) Если в каждом витке вклад в направленную вниз силу дает перпендикулярный к полю отрезок проводника длиной 4 см, то полная длина для 100 витков составит 4 м. Следовательно,

$$B = F/Il = 0{,}3\ \text{Н}/(0{,}5\ \text{А}\cdot 4\ \text{м}) = 0{,}15\ \text{Н}/(\text{А}\cdot\text{м}).$$

19. Магнитная сила F, действующая на движущуюся заряженную частицу найдется в виде $F=qB_{\perp}v$. Поскольку эта сила всегда действует перпендикулярно к скорости частицы, она заставляет последнюю двигаться по окружности, радиус которой r связан с магнитной силой F соотношением $F=mv^2/r$. Отсюда количество движения p частицы равно

$$p = mv = qB_{\perp}r.$$

Поскольку и протон, и электрон несут на себе по одному элементарному заряду, при их движении по окружностям одинакового радиуса перпендикулярно к одному и тому же магнитному полю *их количества движения должны быть равны по величине.*

Заметим, что векторы количества движения протона и электрона вращаются в противоположных направлениях; если для одной частицы они вращаются по часовой стрелке, то для другой они будут вращаться против часовой стрелки. Чтобы определить, в каком же именно направлении станет вращаться частица, нужно знать направление магнитного поля.

20. Для изотопов, массы которых разнятся на определенное количество Δm (скажем, на массу еще одного нейтрона), относительное увеличение $\Delta m/m$, где m есть масса атома более легкого изотопа, тем больше, чем меньше m, т. е. больше всего для самых легких элементов. Таким образом, если масс-спектрограф чувствителен к относительной разности масс, то с его помощью легче всего разделить изотопы самых легких элементов.

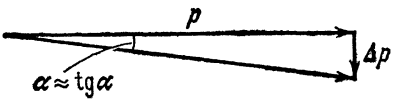


Рис. 61.

Рассмотрим конкретный случай спектрографа, показанного на рис. 30.21. Ионы, пролетая между полюсами магнита, отклоняются и движутся по слегка искривленной траектории. В дальнейшем они летят прямолинейно, пока не ударятся об экран. Поскольку круговое отклонение в магнитном поле мало, мы можем аппроксимировать круговую часть траектории отрезком параболы. Это эквивалентно утверждению, что магнитная сила приблизительно постоянна в направлении, перпендикулярном к начальной скорости иона. Следовательно, количество движения изменяется под действием магнитной силы в направлении, перпендикулярном к начальному количеству движения p, причем величина такого изменения составляет (рис. 61)

$$|\Delta p| = F\,\Delta t = qvB\,\Delta t.$$

Время Δt, требующееся иону для пролета через магнитное поле, равно горизонтальному размеру полюсов L, деленному на горизонтальную компоненту

скорости v. Следовательно,

$$|\Delta p| = qvB\,(L/v) = qBL.$$

Угловое отклонение иона найдется в виде

$$\alpha \approx \operatorname{tg}\alpha = |\Delta p|/p = qBL/p.$$

Количество движения иона, с которым он влетает в магнитное поле, можно выразить через кинетическую энергию $E_к = qV$, приобретаемую им при разгоне под действием ускоряющего напряжения V:

$$p = (2mE_к)^{1/2} = (2mqV)^{1/2}.$$

Таким образом, угловое отклонение α составит

$$\alpha = qBv/(2mqV)^{1/2},$$

т. е. изменяется обратно пропорционально корню квадратному из массы иона. Если нам задано изменение массы Δm, то угловое отклонение будет тем больше, чем меньше масса m, в чем можно убедиться, построив график изменения углового отклонения α в зависимости от массы.

21. а) Пусть m — масса протона, q — заряд, который он несет на себе, и v — скорость его движения. Радиус круговой траектории, перпендикулярной к магнитному полю $\boldsymbol{B}$, найдется в виде отношения

$$r = mv/qB.$$

Выразив через кинетическую энергию, запишем количество движения в виде

$$p = mv = (2mE_к)^{1/2}.$$

Теперь выразим радиус через известные величины m, $E_к$ q и B:

$$r = (2mE_к)^{1/2}/qB.$$

Еще проще вывести выражение для периода обращения протонов. Период обращения T частицы, движущейся по окружности радиуса r с постоянной скоростью v, равен $2\pi r/v$. Из нашего первого выражения для радиуса через скорость v находим $r/v = m/qB$. Отсюда

$$T = 2\pi m/qB.$$

б) При повышении начальной кинетической энергии $E_к$ в четыре раза радиус возрастет всего лишь в два раза, потому что он изменяется пропорционально корню квадратному из кинетической энергии. Что же касается периода обращения протонов, то он никак не зависит от кинетической энергии и останется прежним.

в) Воспользовавшись выражениями, выведенными в п. а), запишем

$$T = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\cdot 3{,}14\cdot(1{,}67\cdot 10^{-27}\ \text{кг})}{(1{,}6\cdot 10^{-19}\ \text{Кл})\cdot[2{,}1\cdot 10^{-2}\ \text{Н/(А}\cdot\text{м)}]} = 3{,}12\cdot 10^{-6}\ \text{с}.$$

Найдем теперь радиус:

$$r = \frac{(2mE_к)^{1/2}}{qB} = \frac{[2\cdot(1{,}67\cdot 10^{-27}\ \text{кг})\cdot(4{,}6\cdot 10^{5}\ \text{эВ})\cdot(1{,}6\cdot 10^{-19}\ \text{Дж/эВ})]^{1/2}}{(1{,}6\cdot 10^{-19}\ \text{Кл})\cdot[2{,}1\cdot 10^{-2}\ \text{Н/(А}\cdot\text{м)}]} = 4{,}67\ \text{м}.$$

23. В данном опыте измерению подлежат напряжение, разгоняющее частицы, заряд частицы (эти две величины определяют кинетическую энергию частицы, когда она входит в магнитное поле), магнитное поле и радиус кривизны траектории частицы в магнитном поле (эти две величины определят вместе с зарядом количество движения). Зная кинетическую энергию и количество движения, можно определить массу частицы.

24. а) Радиус окружности, по которой заряженная частица движется в магнитном поле, перпендикулярном к ее траектории, найдется в виде отношения $r = mv/qB$. Так как $mv = \sqrt{2mE_к}$, а $E_к = qV$, получим

$$r = mv/qB = \sqrt{2mqV}/qB = \sqrt{2mV/q}/B.$$

Для иона He^+

$$r^+ = \sqrt{\frac{2\cdot(6{,}6\cdot10^{-27}\text{ кг})\cdot 90\text{ В}}{1{,}6\cdot10^{-19}\text{ Кл}}}\cdot\frac{1}{1{,}5\cdot10^{-2}\text{ Н/(А}\cdot\text{м)}} = 0{,}18\text{ м}.$$

Для иона He^{++} все величины, кроме заряда, остаются прежними, а заряд в два раза больше; следовательно,

$$r^{++} = r^+/\sqrt{2} = 0{,}13\text{ м}.$$

б) См. рис. 62.

в) Если ион He^{++}, находясь еще в электрическом поле, захватит один электрон, то его энергия окажется в интервале от 1 до 2 эВ, а в магнитное поле он войдет

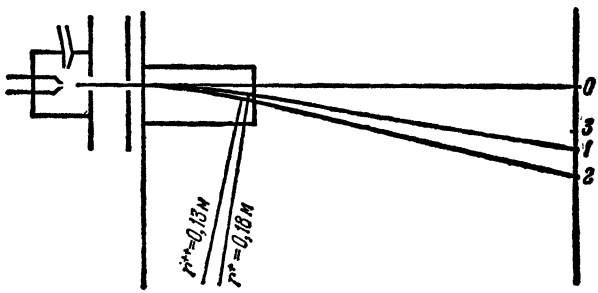


Рис. 62.

со скоростью v, лежащей между v_1 и v_2. Давайте найдем решения для предельных случаев. Если электрон захватывается ионом, как только тот вошел в электрическое поле, то $v=v_1$ и $R=R_1$. Если же ион захватывает электрон в тот самый момент, когда он покидает электрическое поле, то $v=v_2$ и $R=2R_2$, что приведет к смещению пятна на экране в положение выше цифры *1* (см. рис. 62), куда-то приблизительно на полпути между *0* и *2* в точку *3*. Таким образом, захват одного электрона в электрическом поле приводит к изменению радиуса R в пределах от R_1 до $2R_2$, тогда как пятно при этом перемещается из положения *1* в положение *3*.

г) Если ион захватывает электрон в магнитном поле, то он станет двигаться со скоростью v_2. Мы уже нашли решения для двух предельных случаев. Если ион захватывает электрон в пространстве между двумя полями, то радиус R приобретает значение $2R_2$. Если же ион захватит электрон при выходе из магнитного поля, радиус кривизны будет равен R_2. Ион будет перемещаться по дуге окружности радиусом R_2, пока он не захватит электрон, после чего перейдет на дугу окружности радиусом $2R_2$ и ударится об экран, где-то между положениями *2* и *3*.

25. а) Электрическая сила, действующая на шарик в пространстве между пластинами, найдется в виде

$$F_E = qE = \frac{qV}{d} = \frac{(2{,}2\cdot10^{-8}\text{ Кл})\cdot(2\cdot10^4\text{ В})}{0{,}5\text{ м}} = 8{,}8\cdot10^{-4}\text{ Н}.$$

б) В этом случае шарик стал бы двигаться по параболической траектории.

в) Сила действия магнитного поля в таком случае выразится следующим образом: $F_B = qvB = (2{,}2\cdot10^{-8}\text{ Кл})\cdot(1\text{ м/с})\cdot[0{,}5\text{ Н/(А}\cdot\text{м)}] = 1{,}1\cdot10^{-8}\text{ Н}$. В данном случае электрическая сила в $8\cdot10^4$ раз больше магнитной силы.

26. Нам предстоит найти скорость, при которой магнитная сила равна и противоположна по направлению электрической силе. Магнитная и электрическая силы действуют на ион в противоположных направлениях. Это позволяет написать $qE=qvB$. Сократив данное соотношение на q и разрешив относительно v,

получим (рис. 63)

$$v=\frac{E}{B}=\frac{1\cdot10^3}{2\cdot10^{-2}}\left[\frac{\text{Н/Кл}}{\text{Н/(А·м)}}\,\frac{\text{Кл}}{\text{А·с}}\right]=5\cdot10^4\ \text{м/с}.$$

27. Пятно, где ионы неона станут ударяться о фотопластинку, находится от щели на расстоянии, равном диаметру (рис. 64). (Здесь индукция поля $\boldsymbol{B}$ направлена по вертикали к плоскости страницы вверх.) Мы можем вычислить радиус круговой траектории по способу, описанному в разделе 30.7. Магнитная сила qvB создает центростремительное ускорение v^2/r. Таким образом, по закону Ньютона

$$qvB=mv^2/r,\quad mv=qBr\quad\text{и}\quad r=mv/qB.$$

Ионы двигаются с одной и той же скоростью и несут одинаковый заряд, так что

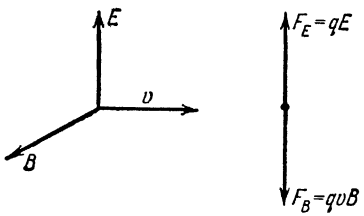


Рис. 63.

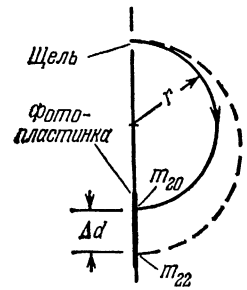


Рис. 64.

разница диаметров их круговых траекторий обусловлена только разной массой ионов. Выразим это математически: $\Delta d=d_{22}-d_{20}=2\,(m_{22}-m_{20})\,v/qB$. Поскольку 1 а.е.м. (атомная единица массы)$=1{,}7\cdot10^{-27}$ кг, получаем

$$\Delta d=\frac{2\cdot(2\text{ а.е.м.})\cdot(1{,}7\cdot10^{-27}\text{ кг/а.е.м.})\cdot(5\cdot10^4\text{ м/с})}{(1{,}6\cdot10^{-19}\text{ Кл})\cdot[9\cdot10^{-2}\text{ Н/(А·м)}]}=0{,}02\text{ м}.$$

31. Магнитное поле каждого проводника в точках P, Q и R перпендикулярно к плоскости страницы. Воспользовавшись правилом правой руки, можно определить направление поля во всех трех случаях: от читателя или же к читателю. Магнитная индукция во всех этих случаях на расстоянии r от создающего поле проводника удовлетворяет равенству $B=KI/r$, где $K=2\cdot10^{-7}\text{Н/А}^2$. В точке P:

$\boldsymbol{B}_1=(2\cdot10^{-7})\cdot10/(5\cdot10^{-2})=$
$=4\cdot10^{-5}$Н/(А·м) (к читателю),

$\boldsymbol{B}_2=(2\cdot10^{-7})\cdot20/(15\cdot10^{-2})=$
$=3\cdot10^{-5}$Н/(А·м) (к читателю).

Следовательно, результирующее поле найдется в виде

$\boldsymbol{B}_{\text{рез}}=7\cdot10^{-5}$ Н/(А·м) (к читателю).

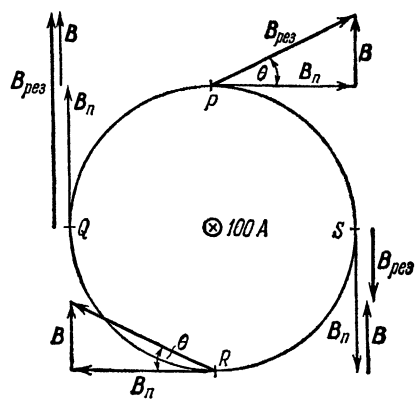


Рис. 65.

В точке Q: $\boldsymbol{B}_1$ имеет ту же самую величину, что и в точке P, но направлено противоположно (от читателя); $\boldsymbol{B}_2$ имеет направление к читателю и равно удвоенному полю $\boldsymbol{B}_1$, так как его создает ток вдвое большей силы. Таким образом, результирующее поле будет равно (рис. 65)

$$\boldsymbol{B}_{\text{рез}}=4\cdot10^{-5}\text{ Н/(А·м)}\ \text{(к читателю)}.$$

В точке R : $\boldsymbol{B}_1$ имеет направление от читателя и составляет по величине всего лишь $^1/_3$ поля в точке P:

$$\boldsymbol{B}_1 = 1 \cdot 10^{-5} \text{ Н/(А·м)} \text{ (от читателя).}$$

$\boldsymbol{B}_2$ также направлено от читателя и равно по величине значению в точке Q:

$$\boldsymbol{B}_2 = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Н/(А·м)} \text{ (от читателя).}$$

Следовательно, результирующее поле

$$\boldsymbol{B}_{\text{рез}} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ Н/(А·м)} \text{ (от читателя).}$$

32. Найдем поле проводника $\boldsymbol{B}_{\text{п}}$, создаваемое в каждой точке током 100 А, и сложим его векторно с полем $\boldsymbol{B}$, чтобы определить результирующее поле $\boldsymbol{B}_{\text{рез}}$ в такой точке. Величина поля проводника найдется в виде

$$B_{\text{п}} = (2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2) \cdot 10^2 \text{ А}/10^{-2} \text{ м} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Н/(А·м)}.$$

Направление поля $\boldsymbol{B}_{\text{п}}$ в каждой точке указано на рис. 65. В точке P или в точке R:

$$B_{\text{рез}} = \sqrt{B^2 + B_{\text{п}}^2} = \sqrt{1^2 + 2^2} \cdot 10^{-3} = 2{,}2 \cdot 10^{-3} \text{ Н/(А·м)}.$$

В точке Q:

$$B_{\text{рез}} = B_{\text{п}} + B = (2 + 1) \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Н/(А·м)}.$$

В точке S:

$$B_{\text{рез}} = B_{\text{п}} - B = (2 - 1) \cdot 10^{-3} = 10^{-3} \text{ Н/(А·м)}.$$

Направления $\boldsymbol{B}_{\text{рез}}$ показаны на рис. 65. Для угла θ имеем

$$\operatorname{tg} \theta = B/B_{\text{п}} = (1 \cdot 10^{-3})/(2 \cdot 10^{-3}) = 0{,}5; \quad \theta = 26{,}5°.$$

33. а) 1 микроампер $= 10^{-6}$А. Это означает, что ежесекундно мимо заданной точки проходит 10^{-6}Кл (электричества). Один кулон эквивалентен $6{,}25 \cdot 10^{18}$ элементарных зарядов, а поскольку микроампер есть микрокулон в одну секунду, запишем

$$1 \text{ мкА} = 1 \text{ мкКл/с} = (10^{-6} \text{ Кл/с}) \cdot (6{,}25 \cdot 10^{18} \text{ элем. зар./Кл}) = 6{,}25 \cdot 10^{12} \text{ электрон/с}.$$

б) Поскольку электроны движутся со скоростью $3 \cdot 10^6$м/с, $3 \cdot 10^6$м пучка ежесекундно проходят мимо заданной точки. Из п. а) задачи нам известно, что в пучке такой длины содержится $6{,}25 \cdot 10^{12}$ электронов. Если электроны распределены равномерно по пучку длиной $3 \cdot 10^6$м, то в 1 м их число найдется как частное

$$(6{,}25 \cdot 10^{12})/(3 \cdot 10^6) = 2{,}08 \cdot 10^6 \text{ электронов}.$$

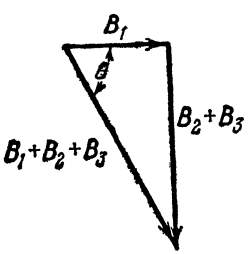


Рис. 66.

в) Ток I, текущий по прямому проводнику, создает на расстоянии d от его оси магнитное поле $B = KI/d$. Именно ток создает поле, а проводник представляет собой просто удобный контейнер для движущихся зарядов. Таким образом, электронный пучок образует ток, создающий следующее поле:

$$B = (2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2) \cdot (1 \cdot 10^{-6} \text{ А})/1 \text{ м} = 2 \cdot 10^{-13} \text{Н/(А·м)}.$$

г) В поле B проводник длиной l с током I испытывает действие силы $F = BIl$. Для пучка длиной 1 м в поле 0,1 Н/(А·м) полная сила равна

$$F = 0{,}1 \cdot (1 \cdot 10^{-6}) \cdot 1 = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Н}.$$

д) Как известно из п. б) данной задачи, в пучке длиной 1 м заключается $2{,}08 \cdot 10^6$ электронов. Если на всякий электрон действует одинаковая сила, то полная сила, равная 10^{-7}Н, даст при делении на $2{,}08 \cdot 10^6$ электронов силу,

действующую на отдельный электрон:

$$F=(1\cdot10^{-7}\ \text{Н})/(2{,}08\cdot10^{6})=4{,}8\cdot10^{-14}\ \text{Н}.$$

Этот результат вытекает из таких же рассуждений, проводившихся в разделе Мы можем воспользоваться из этого раздела конечной формулой для F:

$$F=qvB=(1{,}6\cdot10^{-19}\ \text{Кл})\cdot(3\cdot10^{6}\ \text{м/с})\cdot[0{,}1\ \text{Н/(А}\cdot\text{м)}]=4{,}8\cdot10^{-14}\ \text{Н}.$$

34. Поскольку точка находится на одинаковом расстоянии от токов I_2 и I_3, располагаясь на соединяющей их линии, и поскольку эти два тока текут параллельно, вверх по вертикали к плоскости чертежа, их вклады в поле в точке A полностью уравновешиваются, давая нулевую результирующую. Поэтому суммарное поле в точке A как бы создается только током I_1:

$$B=B_1=KI/d=(2\cdot10^{-7}\ \text{Н/А}^2)\cdot10\ \text{А}/(2\cdot10^{-2}\ \text{м})=10^{-4}\ \text{Н/(А}\cdot\text{м)}.$$

Индукция магнитного поля имеет горизонтальное направление слева направо.

б) Поля $\boldsymbol{B}_2$ и $\boldsymbol{B}_3$ имеют теперь одинаковое направление вниз. Поскольку

$$B_1=B_2=B_3=10^{-4}\ \text{Н/(А}\cdot\text{м)},$$

индукция результирующего поля найдется в виде (рис. 66)

$$B=\sqrt{B_1^2+(B_2+B_3)^2}=2{,}2\cdot10^{-4}\ \text{Н/(А}\cdot\text{м)}.$$

Результирующее поле $\boldsymbol{B}$ образует с $\boldsymbol{B}_1$ угол θ, удовлетворяющий соотношению

$$\operatorname{tg}\theta=2,\quad \text{т. е. } \theta=63^\circ.$$

ГЛАВА

31 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

В излагаемых в настоящей главе представлениях находит свое кульминационное выражение классическая физика, в которой электричество и свет становятся одним предметом. И хотя излагаемый в главе материал трудно поддается усвоению учащимися, все же его с пользой можно доносить до учащихся с любой подготовкой, то ли в виде задания для домашнего чтения, щедро подкрепляемого классными демонстрационными опытами, то ли при наличии достаточного времени и для хорошо подготовленных учащихся в количественной форме.

Здесь нужно подчеркнуть важность демонстрационных опытов, проводимых в классе. Многие представления, излагаемые в настоящей главе, учащиеся уяснят должным образом только в том случае, когда у них сложится общее представление о том, что происходит. С помощью демонстрационных опытов этого можно добиться с большей пользой и быстрее, чем при лекционной подаче материала. Само собой разумеется, что при достаточности времени количественная сторона настоящей главы должна излагаться так же, как это делалось при проработке материала предыдущих глав. Однако в Учебнике имеется много идей, излагаемых в сжатой форме, так что основательного количественного усвоения материала можно ожидать лишь от способных учащихся и при наличии большого запаса времени.

Краткое содержание главы 31

Разделы 31.1—31.5. Глава начинается с решения вопроса о том, не может ли магнит создать ток. Описан ряд опытов, в которых контуры проводников перемещаются в магнитном поле или магнитное поле движется относительно проволочного витка и т. д. Вводится понятие о магнитном потоке, а предсказание, что для протекания в замкнутом контуре индукционного тока необходимо изменение магнитного потока, пронизывающего контур, проверяется в случае, когда магнитное поле и контур зафиксированы в пространстве, но индукция магнитного поля изменяется со временем.

Разделы 31.4, 31.5. Вводится представление об ЭДС индукции как фундаментальной величине, возникающей при изменении магнитного потока, причем получаются количественные результаты, позволяющие предсказывать величину и направление ЭДС индукции.

Раздел 31.6. Показывается, что вокруг переменных магнитных потоков возникает электрическое поле в пространстве.

Раздел 31.7. Выведенное в гл. 30 уравнение циркуляции прилагается к длинному прямому проводнику с током, который разорван, а в разрыв вставлены две близко расположенные параллельные пластины. В данном случае ток изменяется со временем, а закон циркуляции не соблюдается, если в него не включить второй член, своеобразный «эквивалентный ток», т. е. ток смещения,

который характеризует изменение электрического потока между параллельными пластинами. В тексте на стр. 155, набранном мелким шрифтом, вычисляется коэффициент пропорциональности, связывающий циркуляцию магнитного поля с величиной «эквивалентного тока».

Разделы 31.8, 31.9. В разделе 31.8 показывается, что граница между областью совокупных электрического и магнитного полей и областью, в которой нет никакого поля, способна перемещаться в пространстве сама по себе с совершенно определенной скоростью, равной скорости распространения света. Экспериментальное подтверждение этого предсказания доказывает справедливость сделанных в разделе 31.7 предположений, потребовавшихся для внесения поправки в уравнение циркуляции. В разделе 31.9 описывается в общем виде электромагнитное излучение различных длин волн.

План изучения главы 31

Прежде чем приступить к проработке настоящей главы, важно точно знать, какие части главы учащиеся должны понять во всех деталях и какие вы хотите изложить описательно (табл. 13).

ТАБЛИЦА 13

Глава 31	10-недельный план изучения части IV			15-недельный план изучения части IV		
Разделы	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты
31.1—31.3	1	0	—	2	0	—
31.4—31.6	2	0	—	3	0	—
31.7	1	0	—	1	0	—
31.8—31.9	1	0	—	2	0	—

Если вы решили опустить изучение магнетизма, то вам не потребуется охватывать материал, содержащийся в разделах 31.1—31.8. Однако в таком случае раздел 31.9 подлежит проработке в качестве задания для домашнего чтения.

Первые три раздела закладывают научные основы под понимание принципов действия электрического генератора. Они представляют собой непосредственное продолжение гл. 30 и легко усвоятся большинством учащихся. Один урок надо посвятить тщательному разбору материала, излагаемого в этих трех разделах.

В разделах 31.4 и 31.5 на сравнительно простом материале из первых трех разделов дается понятие об ЭДС индукции, наводимой в контуре. Если учащиеся хорошо усвоили раздел 31.3, то затруднений с овладением данным материалом у них не должно возникнуть. Всем учащимся понравится простота закона Ленца. В разделе 31.6 говорится об электрических полях, порождаемых переменными магнитными полями. Некоторым учащимся этот материал может показаться настолько отвлеченным по сравнению с двумя предшествующими разделами, что они с трудом станут его воспринимать. Вероятно, потребуется не менее двух уроков, чтобы добиться надлежащего усвоения учащимися этих фундаментальных представлений.

При проработке разделов 31.1—31.6 важная роль отводится классным демонстрационным опытам. Все описываемые в этих разделах явления можно легко про-

демонстрировать небольшим группам учащихся на опытах, для постановки которых не требуется сложного оборудования. Для демонстрации перед всем классом потребуются более усовершенствованные лабораторные установки. У вас могут быть свои суждения о том, как надо проводить демонстрационные опыты, но если их у вас нет, то постарайтесь придерживаться излагаемых ниже рекомендаций.

Разделы 31.7 и 31.8 покажутся классу средней успеваемости трудными, но даже частичное усвоение этого материала принесет большую пользу большинству учащихся. В данной главе учащихся ждет настоящий сюрприз, когда они убедятся в том, что электромагнитное излучение действительно распространяется, как этого требует предвидение, с единственной скоростью — скоростью света. Раздел 31.9 можно проработать в качестве задания для домашнего чтения. На эти разделы нужно отвести не менее двух дней, но три-четыре дня еще лучше.

Дополнительные материалы к главе 31

Лаборатория. Рекомендаций в отношении опытов по настоящей главе не дается, но тем учащимся, которые не делали этого раньше, было бы полезно протягивать рукой магниты через катушки и, быть может, познакомиться с простыми радиопередатчиками, если таковые окажутся в наличии.

Домашние, классные и лабораторные задания. Ознакомьтесь с замечаниями по ДКЛ, ответами, решениями и таблицей, которая классифицирует задачи по степени их предположительной трудности, на стр. 409.

31.1. Наведенный или индукционный ток

31.2. Относительность движения

Цель. Показать, что в проволочном витке наводится ток, когда есть относительное движение в направлении, перпендикулярном к магнитному полю.

Содержание. а) В проволочном витке, движущемся перпендикулярно к магнитному полю, наводится ток.

б) Величина и направление наведенного тока зависят от величины и направления скорости движения витка относительно направления поля.

в) Значение имеет только относительная скорость движения витка по отношению к магнитному полю.

Методические указания. Эти два раздела закладывают отличный экспериментальный фундамент под предмет электромагнитной индукции. В совокупности с надлежащими демонстрационными опытами они легко усваиваются учащимися за сравнительно короткое время. Если у вас туго со временем, то при желании можно ограничиться опытными данными из этих двух разделов и раздела 30.3 и затем перейти к разделу 30.9. (Тем самым вы пойдете по стопам Фарадея в проведении его знаменитых опытов.)

Данные разделы лучше всего преподносить свободно в отношении демонстрационных опытов и классных занятий. Многие учащиеся не видели раньше этих опытов с магнитной индукцией, а посмотреть их им нужно и важно.

Демонстрационные опыты. Полезно и нетрудно показать качественно, что в контуре проводника, двигающемся в магнитном поле, создается ток. Разумеется, количественный демонстрационный опыт произвел бы большее впечатление, но если у вас нет специального лабораторного оборудования, то количественные демонстрации сопряжены с трудностями. (Нелегко, например, создать или измерить

равномерную скорость. Может не оказаться возможности создания большого однородного магнитного поля. В наличии может не быть нужного измерительного прибора или соответствующего контура проводника.)

Педагогически было бы полезнее проводить демонстрационные опыты с одним проволочным витком. Однако отнюдь не исключено, что масштаб явления и имеющийся в наличии измерительный прибор сделают результаты демонстрационного опыта с одним контуром проводника весьма описательным. Приводимые ниже рекомендации, кроме первой, предусматривают опыты со многими витками.

1. *Опыт с одним проволочным контуром.* Для проведения опыта необходимо иметь магнит и микроамперметр (или чувствительный осциллограф постоянного тока). Нужен сильный магнит. Обычно находятся возможности создавать магнитные поля до 0,1—0,2 Н/(А·м), т. е. до 1—2 кГс (килогаусс). Если у вас есть разные микроамперметры, выберите прибор с наименьшим внутренним сопротивлением. От осциллографа требуется надлежащая чувствительность: лучше всего, если он способен реагировать на изменения напряжения, выражающиеся в долях милливольта.

Соберите замкнутую цепь, включающую контур длинного проводника и микроамперметр. Если вы пользуетесь осциллографом, вместо микроамперметра, то включите в цепь большое сопротивление (не меньше 1 кОм), подсоединив осциллограф к концам сопротивления.

Быстро проведите проводник через пространство между полюсами магнита. Следите за реакцией микроамперметра (или осциллографа).

Типичные значения и возможные трудности: Пусть ваш магнит создает индукцию B=0,2 Н/(А·м) и имеет полюс площадью 10 см^2 (10^{-3} м^2). Максимальный поток, пронизывающий контур проводника, найдется как произведение индукции B на площадь A:

$$B \cdot A = 0{,}2 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Н·м/А} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Н·м·с/Кл} =$$
$$= 2 \cdot 10^{-4} \text{ Дж·с/Кл} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ В·с.}$$

Предположим, что вы перемещаете проводник с такой скоростью, что этот поток проходит (или перестает проходить) через площадь, заключенную внутри замкнутого электрического контура, скажем, за 0,5 с; тогда наведенная ЭДС индукции выразится соотношением

$$\text{ЭДС} = (2 \cdot 10^{-4} \text{ В·с})/0{,}5 \text{ с} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ В.}$$

Если в цепи включено сопротивление, с концами которого соединен осциллограф, то последний обнаружит данное напряжение. Устройство, состоящее из сопротивления с осциллографом, позволит показать (описательно) зависимость наведенной ЭДС от скорости v.

Показать влияние изменения сопротивления или скорости с помощью микроамперметра гораздо труднее. Представим себе идеальный микроамперметр с внутренним сопротивлением 100 Ом. Наведенная ЭДС=$4 \cdot 10^{-4}$ В создаст ток I, удовлетворяющий соотношению

$$I = V/R = (4 \cdot 10^{-4})/100 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ А.}$$

Однако реальный микроамперметр может вести себя иначе, чем идеальный прибор. Во-первых, катушка прибора может обладать индуктивностью. Поэтому в самом микроамперметре может возникнуть обратная ЭДС. (Катушка прибора находится в магнитном поле, а сам прибор действует как двигатель; когда в него поступает

электрическая энергия, стрелка прибора совершает механическое движение.) Во-вторых, время механической реакции прибора может достигать слишком значительной величины, так что он просто не успеет среагировать полностью на ток. (В предельном случае очень замедленной механической реакции в микроамперметр поступает резкий импульс тока, причем отклонение его стрелки зависит только от полного заряда: в таком случае прибор действует как баллистический гальванометр, которым можно измерить заряд на емкости. Когда ваш микроамперметр действует как баллистический гальванометр, он измеряет полное изменение потока и не способен обнаружить последствий изменения скорости v.)

Нецелесообразно тратить время в классе на объяснение подобных побочных явлений. До постановки этого демонстрационного опыта в классе установите, реагирует ли ваш микроамперметр на изменение скорости v.

2. *Наведение тока с помощью многовитковой катушки.* Если вы все же пользуетесь микроамперметром, то гораздо более лучших результатов можно добиться

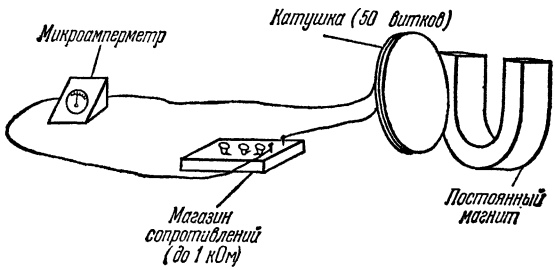


Рис. 67.

с помощью многовитковой катушки (рис. 67). Так, 50 витков проволоки можно намотать, например, на деревянную бобину диаметром 15 см. В случае 50 витков ЭДС будет в 50 раз больше и составит $50 \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 2 \cdot 10^{-2}$ В. Такое более высокое наведенное напряжение позволит воспользоваться сравнительно большим сопротивлением, соединенным последовательно с микроамперметром. Например, к микроамперметру на 100 Ом можно последовательно подсоединить сопротивление на 1 кОм; в этом случае ток будет составлять

$$I = (2 \cdot 10^{-2})/(1{,}1 \cdot 10^{3}) = 18 \cdot 10^{-6} \text{ А} = 18 \text{ мкА}.$$

Далее можно показать, что включение сопротивления 5 или 10 кОм приводит к такому уменьшению силы тока, какое предсказывается теорией. Когда имеется катушка с большим количеством витков и когда последовательно с микроамперметром включено большое сопротивление, влияние механических или электрических свойств прибора на результаты измерения становится гораздо слабее. Это дает возможность продемонстрировать зависимость индукционного тока от скорости.

Однако изменение тока может быть вызвано не только изменением скорости движения проводника. Для наблюдений зависимости тока только от скорости, необходимо, чтобы магнитное поле оставалось постоянным в большой области.

Демонстрационные опыты можно расширить посредством вращения катушки вокруг диаметра, как это показано на рис. 68 (см. также раздел 30.3). Если вы пользуетесь сопротивлением и осциллографом (а не микроамперметром), то вы-

ходное напряжение на катушке, как в этом можно убедиться, меняет знак. Даже с микроамперметром можно наблюдать обращение индукционного тока, о чем свидетельствует отклонение стрелки в другую сторону. Микроамперметр с нулевой отметкой на середине шкалы может показать симметрию положительного и отрицательного напряжений. При проведении демонстрационного опыта подобного

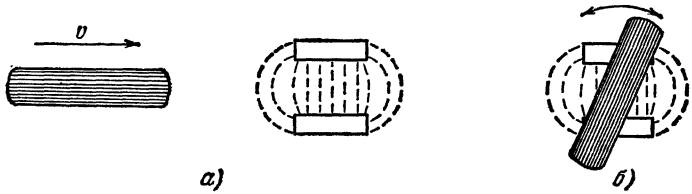


Рис. 68.

рода нужно подчеркнуть, что важным параметром в данном случае является $B_\perp$, а не B.

3. *Относительность движения.* Подсоедините к микроамперметру или чувствительному гальванометру концы одного из соленоидов. Вводите и выводите полосовой магнит в соленоид и из соленоида, после чего, удерживая магнит неподвижным, перейдите к возвратно-поступательному перемещению катушки по отношению к магниту, чтобы показать, что наличие наведенного напряжения в катушке зависит только от существования относительного движения между магнитным полем и катушкой.

31.3. Переменный магнитный поток

Цель. Дать единую концепцию, объясняющую ранее наблюдавшиеся явления индукции, и предсказать характер ряда других эффектов, которые можно подтвердить простыми опытами.

Содержание. а) Магнитный поток Φ_B сквозь замкнутый контур определяется как произведение перпендикулярной составляющей магнитного поля $B_\perp$ на площадь A, ограниченную контуром.

б) Чтобы навести в контуре ток, надо менять магнитный поток, пронизывающий этот контур.

в) Это утверждение согласуется с ранее наблюдавшимися явлениями индукции и позволяет предсказать ряд других возможных способов наведения токов: изменением индукции магнитного поля в электромагните независимо от того, находится ли контур проводника в поле или просто охватывает поле; сокращением площади контура (сделанного из пружины); вращением небольшого контура постоянной формы вокруг оси, перпендикулярной к направлению поля.

Методические указания. В данном разделе воедино собран многочисленный ряд наблюдавшихся ранее явлений индукции с их объяснением с единой простой позиции изменения магнитного потока, пронизывающего контур. Это очень важный материал, который учащиеся должны твердо усвоить.

При проработке материала этого раздела главное бремя преподавания можно возложить на демонстрационные опыты, которые вы в состоянии поставить. Для большей части учащихся понятие о магнитном потоке не должно оказаться слишком трудным, хотя при этом не исключены некоторые трудности, когда речь

пойдет о неоднородном магнитном поле (см. текст, набранный мелким шрифтом, на стр. 147).

Демонстрационные опыты. 1. *Токи, наводимые изменением магнитного поля.* С помощью неподвижной катушки и движущегося магнита покажите, что индукционный ток возрастает пропорционально скорости изменения магнитного поля, проходящего сквозь катушку. В случае слабого магнита нужна более высокая скорость движения, чтобы создать заметный эффект. Тем самым показывается, что значение имеет скорость изменения потока, а не скорость движения магнита. Продемонстрируйте разную «силу» магнитов на их способности удерживать в подвешенном состоянии разное число гвоздей, притягиваемых ими из рассыпанной кучки.

При наличии электромагнита можно учащимся продемонстрировать эффекты, иллюстрируемые рис. 31.9. Если же электромагнита нет, то не составляет труда изготовить простую его разновидность. Возьмите кольцо из мягкого железа, небольшой кусочек которого вырезан. Если у вас нет готового кольца, то можно

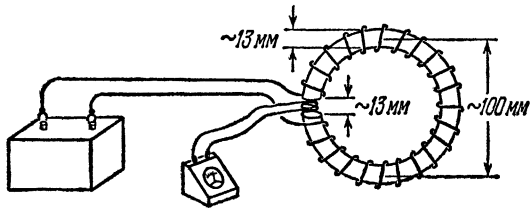


Рис. 69.

взять пруток с площадью поперечного сечения около 2 см^2 и согнуть из него кольцо диаметром 10 см. С помощью такого кольца можно создать достаточно сильное поле, обмотав кольцо плотно витками изолированной медной проволоки диаметром 0,93 мм в один слой. Для наших целей на кольцо достаточно навить 100—300 витков. Теперь нужно взять автомобильный аккумулятор на 6 В в качестве источника тока и подсоединить электромагнит, как это показано на рис. 69.

Для присоединения к аккумулятору возьмите кабели, снабженные на концах накидными контактами с прижимами, чтобы их можно было легко снимать с клемм аккумулятора. В зазоре железного кольца при токе 6 А возникает поле с индукцией около 0,03 Н/(А·м). Если на кольцо намотано несколько сотен витков проволоки, то снимаемый с аккумулятора ток не превзойдет 10 А, т. е. будет иметь приемлемую величину. Если же ваша катушка отбирает слишком большой ток, то его можно снизить включением в цепь сопротивления на несколько ом. Для этого можно взять около восьми 150-ваттных электроламп (или два нагревательных элемента по 500 Вт) и присоединить их параллельно основной цепи. Ток в 10 А способен при непрерывном протекании пережечь проволоку диаметром 0,03 мм.

Теперь введите в зазор небольшую катушку приблизительно на 10 витков, соединив ее с микроамперметром, как это показано на рис. 69. *При перемене направления* тока в электромагните и полной неподвижности 10-витковой катушки стрелка микроамперметра отклонится в сторону. Это объясняется тем, что магнитное поле сквозь катушку изменилось при неизменности геометрии (от B до $-B$).

Измените ориентацию 10-витковой катушки так, чтобы плоскость витков была *параллельна направлению* поля. Повторите опыт, и вы убедитесь в отсутствии отклонения стрелки. Это объясняется тем, что изменение B не ведет в данном случае к изменению потока Φ_B.

Если у вас есть трансформатор, покажите учащимся, как он действует. Возьмите источник переменного тока и осциллограф (или амперметр переменного тока). Укажите, что отношение вторичного напряжения к первичному практически равно отношению числа витков вторичной катушки к числу витков первичной.

Если у вас есть еще один, запасной трансформатор, разберите его и покажите учащимся его обмотки. Отметьте сходство с электромагнитом на железном кольце (первичная катушка) и с катушкой, присоединенной к микроамперметру (вторичная). Если на сердечнике найдется место, то намотайте там несколько витков и покажите учащимся, что в такой третьей обмотке наводится ЭДС, когда в первой или второй обмотке генерируется переменный ток.

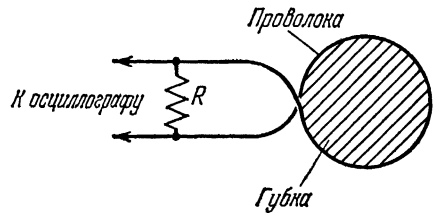


Рис. 70.

2. *Токи, наводимые изменением площади.* Намотаем проволоку на упругий предмет, например на губку (рис. 70). Площадь витка в исходном положении должна быть немного меньше площади сильного магнитного поля. Если теперь потянуть за концы витка, то его площадь станет меньше, что приведет к соответствующему (пропорциональному) уменьшению потока. Если поле B перпендикулярно к плоскости страницы и направлено от читателя, то подобное уменьшение потока наведет индукционный ток с направлением по часовой стрелке. Если чувствительность амперметра недостаточна или если магнит не обладает достаточной силой, чтобы можно было обнаружить заметное отклонение стрелки с одним витком, намотайте на губку несколько витков и сжимайте губку рукой. В качестве детектора лучше пользоваться чувствительным осциллографом, а не амперметром.

Повернув плоскость витка на 90°, покажите, что если направление поля B лежит в плоскости витка (т. е. $B_\perp=0$), то никакой ЭДС не наводится даже тогда, когда B и A имеют большие значения. Если взять простую гибкую проволоку, то можно легко изменять площадь образуемого ею витка простым ее скручиванием. Главная трудность при этом заключается в малой величине наводимого в одном витке сигнала.

3. *Токи, наводимые изменением положения контура относительно магнитного поля.* Намотайте проволоку на небольшую катушку и прикрепите ее клейкой лентой к концу стержня или палочки. Выводы катушки скрутите вместе и отведите вдоль стержня к амперметру или к сопротивлению с чувствительным осциллографом. Медленное вращение катушки позволит воспроизвести эффекты, иллюстрируемые рис. 31.10.

31.4. ЭДС индукции

31.5. Направление ЭДС индукции

Ц е л ь. Показать, что фундаментальным следствием изменения магнитного потока является наведение ЭДС индукции, а не индукционного тока. Величину

наведенной таким образом ЭДС можно увязать с изменением потока посредством закона сохранения энергии. Отправным источником энергии служит механическая энергия, требующаяся для поддержания движения.

Содержание. а) Если ЭДС индукции в движущемся проводнике создает ток I, то механическая энергия необходима для поддержания скорости проводника.

б) Механическое усилие, необходимое для поддержания движения проводника с постоянной скоростью, равно магнитной силе действия на проводник, т. е. $F=-IlB$; следовательно, подводимая механическая энергия есть просто $W=-IlBv\Delta t$.

в) Количество электрической энергии, требующейся для проталкивания заряда $I\Delta t$ по цепи, равно просто произведению ЭДС на заряд, т. е. $\mathcal{E}I\Delta t$.

г) ЭДС индукции находят уравниванием этих двух энергий с учетом данного раньше определения изменения магнитного потока в виде $\Delta\Phi_B=Blv\Delta t$; следовательно,

$$\mathcal{E}=-\Delta\Phi_B/\Delta t.$$

д) Отрицательный знак говорит о том, что индукционный ток имеет такое направление, при котором его собственный магнитный поток противоположен по направлению изменению порождающего его магнитного потока.

Методические указания. В этих разделах, по своей важности превосходящих весь предшествующий материал, дается количественная оценка всем явлениям индукции, которые нами до сих пор наблюдались. В них приводится, в частности, важный пример использования закона сохранения энергии, который учащиеся способны воспринять без излишне подробной проработки материала. Бóльшая часть учащихся поймет, что для работы электрических генераторов нужны механические силы. Нет необходимости решать количественно задачи на началах этого принципа. С другой стороны, если у вас достаточно времени для тщательной переработки главы, то используйте этот интересный материал для привития учащимся полезных практических навыков.

Важное место при проработке этих разделов отводится демонстрационным опытам, которые можно поставить с тем же лабораторным оборудованием, что и в предшествующих разделах. Эти опыты убедительно покажут два момента, которые подчеркиваются в Учебнике: 1) катушка движется в магнитном поле *под действием* определенной силы; 2) сила зависит только от относительного движения. Эти демонстрационные опыты столь просты и убедительны, что их надо показать учащимся до подробного обсуждения излагаемого в Учебнике материала.

Демонстрационные опыты. Назначение демонстрационных опытов состоит в показе того, что, когда замкнутый контур движется в области с магнитным полем, наводимые токи порождают силу, которая противодействует движению катушки. Но, поскольку учащимся уже известно (из гл. 30), что на проводник с током в магнитном поле действует определенная сила, этот вывод не должен показаться им совершенно неожиданным. Однако демонстрации подчеркнут то обстоятельство, что рассеиваемая в цепи электрическая энергия должна поступать от того или иного источника механической энергии.

1. *Закон Ленца и сохранение энергии.* По направлению наведенного тока, определенного с помощью амперметра, и направлению намотки катушки определите направление магнитного поля, создаваемого индукционным током. Покажите, что это поле взаимодействует с полем магнита таким образом, что результирующая

сила противодействует движению магнита и что, следовательно, направление индукционного тока согласуется с законом сохранения энергии.

Весьма убедительный демонстрационный опыт, иллюстрирующий передачу механической энергии, можно поставить следующим образом. Подвесьте сильный полосовой магнит за один конец к пружине таким образом, чтобы он совершал колебания по вертикали вверх и вниз внутри соленоида. Соедините соленоид последовательно с переключателем и амперметром (приблизительно на 0—3 А) посредством толстой проволоки. При разомкнутом переключателе приведите магнит в колебательное движение, обратив внимание учащихся на то, что почти никакого рассеяния энергии при этом не происходит и что магнит к концу каждого колебания поднимается почти на первоначальную высоту. Пока магнит совершает колебательное движение, замкните переключатель. Теперь колебания быстро затухают, а магнит теряет механическую энергию, превращающуюся в энергию тока в катушке, где она проявляется в виде теплоты, рассеиваемой при течении тока в проволоке. Чтобы сделать более явным затухание колебаний, нужна довольно большая скорость передачи энергии, обеспечение которой требует использования амперметра с низким сопротивлением и достаточно толстого проводника.

2. *Свободно качающийся виток.* Изготовьте круглый виток из медной трубки (удобнее всего взять трубку диаметром около 6 мм) или очень толстого медного

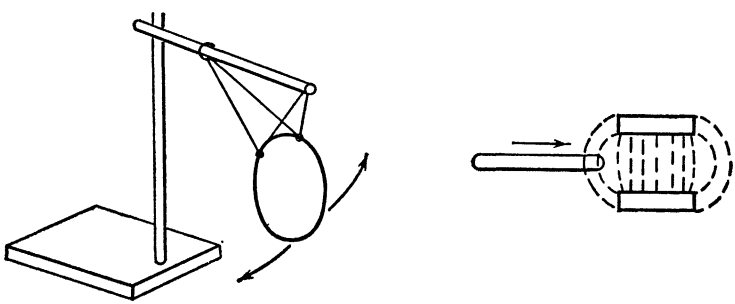


Рис. 71.

провода. Сделайте механически прочный зажим (наподобие струбцины) с малым сопротивлением для соединения концов трубки, образующей виток. Если у вас встретятся трудности с изготовлением электрической цепи (витка), допускающей легкое ее замыкание и размыкание, сделайте два одинаковых витка, спаяв между собой концы одного из них и оставив концы другого электрически изолированными друг от друга.

Подвесьте виток так, чтобы он мог совершать свободные колебания как маятник, пролетая между полюсами магнита и пересекая своей плоскостью как можно более сильный магнитный поток (рис. 71). Движение подобного маятника, когда электрическая цепь катушки замкнута, заметно замедляется при прохождении через магнитное поле. Чем сильнее поле, тем заметнее торможение (оно пропорционально квадрату силы поля). (Поэтому есть смысл попытаться найти крупный магнит, вместо того, чтобы проводить демонстрационный опыт с маленьким магнитом.) Если электрическая цепь катушки разомкнута (или магнит удален), то маятник колеблется свободно. Обратите внимание учащихся на то, что в том случае, когда площадь витка меньше или больше площади полюсов магнита, катушка

может совершать колебания малой амплитуды без изменения магнитного потока. В таком случае никаких токов не наводится и их изменения становятся незначительными, а колебания могут совершаться длительное время.

3. *Брусок металла как цепь.* Виток можно заменить металлическим бруском небольшой высоты (рис. 72, *а*). Если такой брусок колеблется между полюсами магнита, то образуются электрические токи (называемые «вихревыми»), а действующие на них силы тормозят движение. (Если поле индукции B перпендикулярно

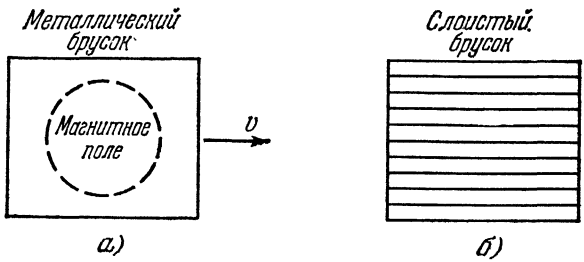


Рис. 72.

к странице книги, то в очерченной пунктиром области на рис. 72, *а* циркулирует ток.) Металлическая плитка достаточной толщины испытывает противодействие большой силы даже при медленном движении. И хотя торможение достигает значительной силы, подобный демонстрационный опыт может показаться учащимся менее убедительным из-за того, что им трудно представить себе вихревой ток. Другой такой же металлический брусок, но с воздушными зазорами в виде боковых прорезей (рис. 72, *б*), сделанных тонкой пилкой, станет колебаться гораздо свободнее.

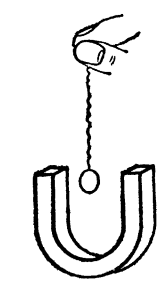


Рис. 73.

К действию вихревых токов часто прибегают для успокоения колебаний чаш чувствительных химических весов. Магнитному торможению (демпфированию) свойственно то преимущество, что противодействующая движению сила велика только тогда, когда значительна скорость, и сходит на нет при постепенном прекращении движения.

4. *Сила торможения, препятствующая кручению.* Сделайте из толстой проволоки (с большим поперечным сечением) виток достаточно малой площади, чтобы он мог вращаться между полюсами магнита. Подвесьте его на тонком шнуре, способном легко закручиваться (рис. 73).

Когда виток находится далеко от магнита, покручивание верхней части шнурка легко приводит подвешенный виток во вращение. Когда же виток находится между полюсами магнита, он движется гораздо медленнее.

Более того, сила торможения меняется со временем в процессе вращения. Она максимальна, когда виток движется, а его плоскость располагается вдоль магнитного поля. Чтобы уяснить это, от учащихся требуется понимание важности перпендикулярной составляющей индукции магнитного поля $B_{\perp}$.

Количественный расчет, проведенный в данном разделе, закладывается фундамент под понимание работы электрического генератора. Исходя из приобретенных знаний о силе магнитного действия на ток, бóльшая часть учащихся без труда

уяснит логику изложения этого материала, но им для этого потребуются некоторые навыки, даваемые решением задач 13—22 из раздела ДКЛ.

Дополнительные задачи. А. Рамка из медной проволоки протягивается через магнитное поле с определенной скоростью.

а) Что случится с силой, требующейся для сохранения начальной скорости, если индукцию поля увеличить в два раза?

б) Что случится с мощностью, необходимой для поддержания движения?

в) Что делается с энергией, поступающей в рамку в виде электрической энергии? Каково ее значение по сравнению с прежним?

Ответ. а) Она возрастет в четыре раза, потому что индукция поля удвоилась и ток тоже возрос вдвое. Сила пропорциональна произведению I на B, а так как оба множителя стали вдвое больше, сила должна возрасти в четыре раза.

б) Поскольку сила возросла в четыре раза, а скорость осталась прежней, расход энергии возрастет в четыре раза.

в) ЭДС индукции удваивается, вследствие чего должен удвоиться и ток. Следовательно, произведение $I\mathcal{E}$ станет в четыре раза больше прежнего значения, что соответствует четырехкратному возрастанию расхода энергии, т. е. мощности питания.

Б. Пятивитковая катушка охватывает прямоугольную область 2×3 см, которую перпендикулярно пронизывает однородное магнитное поле с индукцией $4\cdot10^{-2}$ Н/(А·м). Если магнитное поле сходит на нет за 10^{-3} с, то какова будет величина ЭДС индукции в катушке?

Ответ. Поток равен произведению $B_{\perp}$ на площадь A; следовательно, поток$=B_{\perp}A=(4\cdot10^{-2})\cdot(2\cdot10^{-2}\cdot3\cdot10^{-2})=24\cdot10^{-6}$ Н·м/А$=2{,}4\cdot10^{-5}$ В·с. ЭДС в одном витке$=\Delta\Phi/\Delta t=2{,}4\cdot10^{-5}/10^{-3}=2{,}4\cdot10^{-2}$ В. ЭДС в пяти витках$=$ $=1{,}2\cdot10^{-1}$ В.

Эту задачу наиболее способные учащиеся должны легко решить, если им задать следующие наводящие вопросы: Какова величина магнитного потока, пронизывающего контур катушки? Чему равна ЭДС индукции, приходящаяся на один виток? Какова ЭДС индукции в катушке?

Данную задачу можно усложнить, задав закон убывания исходного потока до нуля и предположив, что плоскости витков катушки образуют тот или иной угол с направлением магнитного поля.

31.6. Электрические поля вокруг переменных магнитных потоков

Цель. Убедиться, что при изменении магнитного потока наводится электрическое поле.

Содержание. ЭДС индукции, наводимая при изменении $\Delta\Phi/\Delta t$, предполагает существование поля E.

Методические указания. Данный раздел весьма важен, если вы планируете подробно обсудить механизм электромагнитного излучения. Однако на это не требуется расходовать много классного времени, потому что о существовании электрического поля можно догадываться из принципа действия трансформатора.

Многим учащимся с трудом дается понимание того, что переменное магнитное поле порождает электрическое поле в тех точках пространства, где магнитного поля нет. Проверить это утверждение можно только экспериментально. Лучшим таким доказательством надо считать, вероятно, бетатрон, но учащиеся с ним пока

еще не знакомы. Непременно напомните классу, что трансформатор по принципу действия очень похож на кольцевой электромагнит, описанный в предшествующем разделе. Аккумулятор создает в электромагните ток, а следствием протекания тока является возникновение магнитного поля. Если зазор в кольце закрыт пробкой из железа, как это показано на рис. 74, то снаружи кольца не будет существовать почти никакого магнитного поля. Тем не менее при выключении тока в намотанной вокруг кольца катушке наводится напряжение. Там должно было существовать наведенное электрическое поле, хотя магнитного поля снаружи кольца не было.

После классного обсуждения изложенных в Учебнике моментов не забудьте отметить, как далеко вперед мы ушли от первоначальных представлений, сформулированных в разделе 31.1. Понятие о силе, действующей на движущийся заряд,

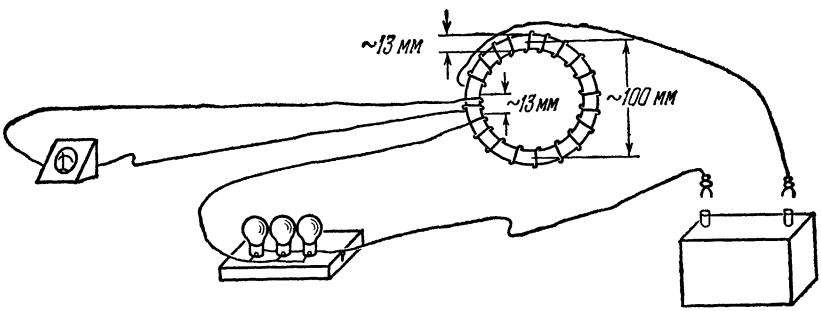


Рис. 74.

привело нас непосредственно к идее об ЭДС индукции в проводнике, движущемся в магнитном поле. Дальнейшие опыты заставили нас шаг за шагом отказаться от необходимости движения проводника в пользу всякого изменения потока, пронизывающего контур проводника. Наконец, в данном разделе мы отказываемся и от проводника в пользу весьма отвлеченного представления о переменном магнитном поле, создающем электрическое поле.

В заключительной части данного раздела приводится больше сведений, чем это может показаться с первого взгляда. То, что переменное магнитное поле образует своеобразный «магнитный ток», есть прямая подготовка к восприятию раздела 31.7, где показывается, что переменный электрический поток эквивалентен электрическому току и что он, таким образом, создает магнитное поле подобно реальному электрическому току.

31.7. Магнитные поля вокруг переменных электрических потоков

Ц е л ь. Заложить фундамент под понимание механизма действия электромагнитного излучения.

Содержание. Переменный электрический ток порождает магнитное поле.

Методические указания. Общее представление об этом материале необходимо для понимания природы электромагнитного излучения, рассматриваемого ниже.

Даже лучшим учащимся с трудом дается количественный анализ наведенных магнитных полей, если не затратить на изложение этих представлений значительную долю времени. Главное назначение расчета, приведенного на стр. 155 в тек-

сте, набранном мелким шрифтом, состоит в том, чтобы показать учащимся, что изложенного до сих пор материала вполне достаточно для количественного рассмотрения этих представлений.

Не исключено, что у вас не хватит времени для объяснения этого количественного материала посредственным учащимся.

31.8. Механизм электромагнитного излучения

Цель. Показать, что, отправляясь от изложенных до сих пор начал электричества и магнетизма, можно предсказать, что электрическое поле создает магнитное поле и наоборот, причем такая взаимная генерация приводит к их распространению в пространстве в виде электромагнитного излучения.

Содержание. а) Весьма своеобразная конфигурация переменных электрического и магнитного полей способна перемещаться в пространстве в виде электромагнитной волны, в которой одно поле проталкивает вперед другое.

б) Такая волна всегда распространяется со «скоростью света» $c=3\cdot10^8$ м/с.

в) Электрическое поле перпендикулярно к магнитному, а магнитное — электрическому, причем оба они перпендикулярны к направлению распространения.

Методические указания. Механизм электромагнитных волн представляет собой кульминационный момент разделов, посвященных наведенным электрическому и магнитному полям. Однако при изучении этих разделов можно ограничиться описательным рассмотрением. Вероятно, классное время можно с большой пользой израсходовать на изучение явлений, иллюстрируемых рис. 31.19.

31.9. Доказательства существования электромагнитного излучения. Электромагнитный спектр

Цель. Дать представление об огромном многообразии электромагнитных волн.

Содержание. Электромагнитное излучение порождается ускоренным движением электрических зарядов. В разных физических ситуациях образуются волны с разными частотами f (или длинами волн λ). Для всех электромагнитных волн произведение $f\lambda$ равно $3\cdot10^8$ м/с.

Методические указания. Это важный раздел, и даже если вы торопились и опустили значительную часть материала по электричеству и магнетизму, все же какое-то классное время надо уделить обсуждению электромагнитных волн и электромагнитного спектра. Прежде всего, учащимся надо знать ради усвоения дальнейшего материала, что движущиеся с ускорением заряды порождают электромагнитные волны даже в том случае, когда у них имеется только смутное представление о том, что такое электромагнитная волна.

Более того, в тот или иной момент времени вам нужно подчеркнуть, что волновая модель света которая рассматривалась в части II курса, подразумевает электромагнитные волны. Скорость света, его действие и происхождение можно понять в свете электромагнитных явлений.

Механизм генерирования электромагнитных волн довольно прост (по сравнению с механизмом распространения). Непременно подчеркните простоту классического критерия, позволяющего установить, распространяется ли электромагнитная волна: во всех случаях, когда заряд движется с ускорением, генерируется

электромагнитное излучение. (Интенсивность испускания лучистой энергии пропорциональна квадрату ускорения.)

Многие учащиеся, стремясь понять механизм распространения, упускают из виду этот весьма простой признак генерирования электромагнитных волн. Но если на него обратить их внимание (и, пожалуй, привести перечисляемые ниже доступные пониманию примеры), то учащиеся сумеют воспользоваться этим механизмом генерирования как ключом к овладению материалом о строении атома (и пониманию необходимости квантовой механики).

Механизм генерирования различных электромагнитных волн. Показ того, что движущиеся с ускорением заряды испускают электромагнитное излучение, целесообразно сопроводить обсуждением примеров, которые охватывают весьма широкий диапазон длин волн (или частот).

На длинноволновом, низкочастотном краю спектра частота слишком мала, чтобы можно было раскрыть картину действия этого механизма. В радиоантеннах переменное электрическое поле разгоняет заряды сначала в одном направлении, а затем в другом. Излучение радиоволн зависит от такого ускорения; их частота равна числу циклов разгона. Этот механизм обычно дает частоты приблизительно от 10^4 до $3 \cdot 10^{11}$ колебаний в секунду, что соответствует длинам волн от $3 \cdot 10^4$ до 10^{-3} м.

На высокочастотном же краю, связанном с инфракрасным, видимым и фиолетовым светом, обычным источником излучения являются ускоряемые заряды в атомах. Эти электромагнитные излучения генерируются также высокоэнергетическими электронами, претерпевающими центростремительное ускорение в современном ускорителе частиц. Расход энергии (вследствие излучения электромагнитных волн) относится к числу самых важных факторов, подлежащих учету при проектировании ускорителей электронов, разгоняемых до энергий выше приблизительно 10^8 эВ.

Из-за того, что излучение изменяется в зависимости от ускорения по закону обратной пропорциональности массе (в действительности пропорционально m^{-2}), электроны испускают гораздо больше излучения, чем более массивные заряжеиные частицы, например протоны, в электрических полях.

Излучения еще более высоких частот вплоть до самых высоких, которые удается производить, генерируются при торможении заряженных частиц. Подобный механизм торможения создает не только обычные рентгеновские лучи (с частотами выше $3 \cdot 10^{16}$ колебаний в секунду), но и γ-излучение с максимально достижимыми частотами и с максимальной энергией.

К настоящему времени ряд ускорителей разгоняет электроны до 10^9 эВ, которые при торможении испускают γ-лучи с частотами приблизительно $2 \cdot 10^{23}$ колебаний в секунду. Космические же лучи генерируют γ-излучение даже еще более высоких частот.

Электромагнитная природа световых волн. Непременно подчеркните в классе, что свет есть не что иное, как электромагнитная волна. Объясните, что при достатке времени можно было бы вернуться к характеристикам света и проанализировать их. Например, электрические поля заставляют заряды двигаться в металле. Когда световая волна падает на металл, поверхностные заряды в металле ускоряются и посылают обратно отраженную волну. Когда свет взаимодействует с веществом, именно заряды в веществе должны теоретически реагировать с такими электромагнитными волнами.

Укажите также, что знание электромагнитной природы света позволяет нам использовать его (ультрафиолетовое излучение, рентгеновские и γ-лучи) для исследования, где находятся заряженные частицы в веществе и действие каких сил они там испытывают. На этом пути электромагнитные волны позволяют зондировать структуру вещества.

Электромагнитный спектр. Учащиеся должны осознать то, сколь огромен диапазон явлений, с которыми связаны электромагнитные волны.

Пользуясь формулой $f\lambda=c=3\cdot10^8$ м/с, вы можете найти длину волны, соответствующую известной частоте, или частоту, соответствующую известной длине волны. Пополните эти численные данные конкретными физическими примерами, иллюстрирующими как разницу, так и сходство между разными электромагнитными волнами. Сходство очевидно:

1) распространение со скоростью $3\cdot10^8$ м/с;

2) происхождение от движущегося с ускорением заряда;

3) взаимодействие, в основе которого всегда лежит движение заряда. Отличие одной электромагнитной волны от другой заключается в длине волны и частоте, размере системы, испускающей излучение, величине и характеристиках систем, которые взаимодействуют с волной.

Отметьте, что многие явления меняются в зависимости от длины волны или частоты не гладко. Например, рассмотрите проникновение электромагнитных волн сквозь листок бумаги. При низких частотах электромагнитные волны передаются хорошо: радиочастотные и радиолокационные волны беспрепятственно проходят сквозь бумагу. При высоких частотах, например в случае инфракрасного излучения, наблюдается сильное поглощение: если солнечный свет сфокусировать на бумаге, то она загорится.

При еще более высоких частотах, в диапазоне видимого света, существуют избирательное отражение и избирательное поглощение в зависимости от конкретной частоты (что для видимого света связано с его цветом). В ультрафиолете вновь преобладает поглощение. А при еще более высоких частотах, в диапазоне крайнего ультрафиолета и рентгеновских лучей, наблюдается незначительное поглощение с прохождением большой доли лучистой энергии.

Обратите внимание учащихся и на то, что на достигнутом уровне прохождения курса (т. е. до перехода к рассмотрению фотонов и их энергии E, равной $h\nu$, в гл. 33) главным ключом к оценке эффективности волны служит ее длина. При обсуждении различных явлений не забывайте выписывать на классной доске соответствующие длины волн.

Само собой разумеется, что длина волны плавно изменяется при переходе от одного края спектра к другому. Общая картина электромагнитного взаимодействия тоже меняется гладко, хотя на некоторых участках спектра существуют свои особенности.

В случае длинных волн, при доинфракрасных частотах, электромагнитное взаимодействие зависит от свободы зарядов. Всякий металл ведет себя подобно другим металлам; ключом к электромагнитным эффектам в данном диапазоне служит то, «насколько свободны заряды».

С укорочением длины волны все более важную роль играет внутреннее строение вещества. Инфракрасное излучение легко взаимодействует с молекулами. Видимое и ультрафиолетовое излучения перемещают заряды внутри атома относительно друг друга, особенно на определенных частотах. Эти длины волн все еще

велики по сравнению с размерами атомов (приблизительно в 10^2—10^3 раз больше), так что грубое представление о том, что длина волны определяет размер объекта, с которым волна способна взаимодействовать, нуждается в уточнении. (Такое представление может не совпадать с действительностью на несколько порядков величины. Но даже несколько порядков величины не многое значат во всем электромагнитном спектре.) Когда длина волны укорачивается еще больше, начинается взаимодействие излучения с самыми внутренними электронами атома (рентгеновские лучи). При еще большем укорочении длины волны становится возможным либо взаимодействие с отдельными электронами (комптон-эффект), либо взаимодействие с участием атомного ядра и ближайшего к нему электрона (атомный

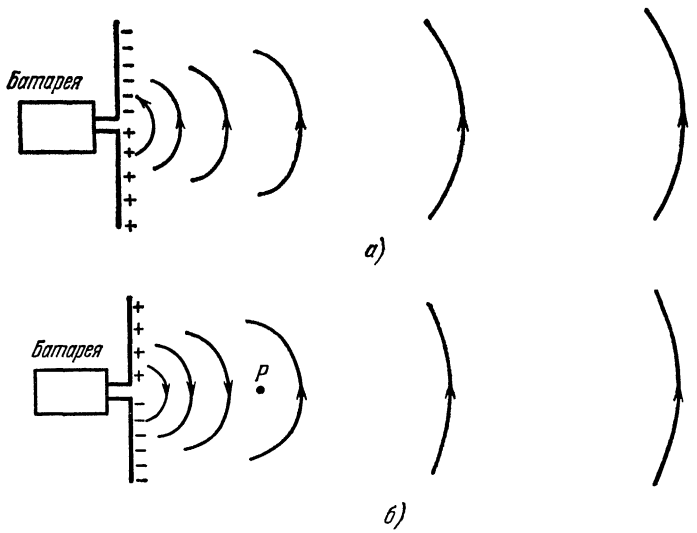


Рис. 75.

фотоэлектрический эффект). Наконец, при еще более высоких частотах взаимодействие приобретает главным образом ядерный характер. В случае рентгеновских и γ-лучей характер взаимодействия определяется зарядом ядра, а не размещением атомов (в молекулах, кристаллах, металлах и т. д.).

Антенны. В наше время учащиеся привыкли видеть телевизионные антенны на крышах большинства домов, так что весьма уместно описать основы действия простой антенны.

На достигнутом к этому времени уровне знаний вы не сможете ничего доказать, но класс в состоянии составить какое-то представление о некоторых сторонах электромагнитного излучения.

На рис. 75, *а* изображена простая и всем хорошо знакомая антенна, состоящая из двух прутков, которые присоединены у середины антенны к источнику напряжения, каковым в данном случае служит простая батарея. Батарея заряжает верхний пруток отрицательно и нижний положительно. Электрическое поле, распространяющееся по всему пространству, создается именно этими зарядами. На рисунке показано поле только в правой половине пространства, хотя оно, разу-

меется, распространяется по всем направлениям. Переменим теперь резко полярность устройства, так что верхний пруток зарядится на этот раз положительно, а нижний отрицательно (рис. 75, *б*). Нет, на рисунке не допущено ошибки! Поле за точкой *P* показано таким же, каким оно было до перемены полярности, потому что измениться успело только поле у антенны. В области за точкой *P* еще не наступило время «узнать» о перемене полярности антенны. Почему же нет? Когда электрическое поле меняло направление, перпендикулярно к плоскости страницы *генерировалось магнитное* поле. Но если магнитное поле возникло там, где его прежде не было, значит, оно *изменилось*. Этот *переменный магнитный* поток генерировал *электрическое поле*, которое оказалось как раз достаточным, чтобы восполнить изменение первоначального электрического поля в точках за *P*. Следствием всего этого является то, что точки, удаленные от антенны, могут «узнать» о перемене полярности антенны только посредством переменных электрического и перпендикулярного к нему магнитного полей, способных распространяться только со скоростью света.

Остается лишь добавить, что антенна сама должна создавать не только электрическое, но и магнитное поля. Ибо если сначала низ антенны был заряжен положительно, а позже положительно зарядился верх антенны, то это означает, что положительный заряд переместился вверх, а отрицательный вниз. В обоих случаях ток протекал вверх по антенне. Ток же, текущий вверх по антенне, должен создавать необходимое магнитное поле. Следовательно, в любом случае изменение электрического поля сопряжено с изменением магнитного поля и наоборот. Одно поле нерасторжимо связано с другим.

Возвращаясь к нашей антенне с батареей, мы видим, что при знакопеременном переключении батареи переменные электрическое и магнитное поля распространяются в пространстве, меняясь по направлениям. Они представляют собой как бы вестников, мчащихся со скоростью света и провозглашающих о том, что в данный момент времени происходит с зарядом на антенне. А следствием всего этого является колеблющаяся электромагнитная волна. Обратите внимание на то, что когда антенна расположена горизонтально, электрическое поле всегда имеет горизонтальное направление, причем такое же направление должна иметь и антенна, предназначающаяся для отбора сигнала.

Чтобы принять сигнал, проводник или антенну помещают в это поле, а электроны в проводнике или антенне перегоняются взад и вперед, создавая ток в приемнике. Если в горизонтальном электрическом поле проводник установить вертикально, то никаких электронов в нем не потечет. В Соединенных Штатах Америки электрические поля для передачи телевизионных сигналов имеют горизонтальное направление. Поэтому и все телевизионные антенны ориентированы горизонтально. Но все это условно. В Англии, например, прекрасно работает телевидение и с вертикальной ориентацией электрических полей и телевизионных антенн.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам

В табл. 14 (см. стр. 410)задачи распределены по степени трудности и по разделам, к которым они относятся. Отдельно выделены задачи, предназначающиеся для разбора на классных занятиях. Задачи, рекомендуемые для первоочередного решения, помечены значком #.

ТАБЛИЦА 14

Разделы	Со звездочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
31.1, 31.2	1, 2		3#		3#
31.3	4—7		8		
31.4	9—12	13	14, 16#, 17	15#	15#, 16#
31.5	18		19, 20, 22	21	21
31.6	23			24	24
31.7	25—27				
31.8			28		28
31.9	29	31#	30#		30#, 31#

Краткие ответы

1*. Положительные заряды окажутся в точке Q, а отрицательные в точке P.

2*. Сила действия на положительные заряды имеет направление по перпендикуляру к плоскости страницы вверх: сила действия на отрицательные заряды имеет противоположное направление.

4*. Индукционного тока при движении магнита не возникнет до тех пор, пока вся рамка находится в области однородного поля.

5*. а) Когда плоскость рамки параллельна магнитному полю; б) когда плоскость рамки перпендикулярна к магнитному полю.

6*. Потому что поток сквозь рамку не меняется.

7*. $\Phi_B = 10^{-2}$ Н·м/А.

9*. Да. Сила, с которой вы тянете рамку, пропорциональна току, который уменьшится, если увеличить ее сопротивление.

10*. При большой скорости, потому что в этом случае усилие, требующееся для вытаскивания катушки из магнитного поля, станет больше.

11*. $\mathcal{E} = 10^{-4}$ В.

12*. $\mathcal{E} = 0{,}5$ В.

18*. Нет; сила действия магнитного поля на заряды в движущейся рамке, которая пропорциональна скорости движения рамки, будет возрастать, пока она точно не уравновесит приложенную силу, после чего рамка станет двигаться с постоянной скоростью.

23*. Нет; линии представляют собой замкнутые контуры, потому что нет зарядов, на которых они могли бы начинаться или заканчиваться.

25*. Скоростью, с которой заряд притекает на ту или другую пластину, которая в свою очередь определяет скорость изменения электрического потока в пространстве между пластинами.

26*. а) Да; при постоянстве тока; б) нет; нельзя изменять магнитный поток в пределах той или иной области с постоянной скоростью до бесконечности.

27*. а) Отрицательные заряды на верхней пластине, а положительные на нижней. б) Электрические поля направлены вверх.

29*. а) $3 \cdot 10^8$ м/с; б) $3 \cdot 10^8$ м/с; в) $3 \cdot 10^8$ м/с.

Ответы с указаниями и решениями

3. а) Поскольку скорость $\boldsymbol{v}$ имеет направление влево, а поле $\boldsymbol{B}$ — вниз, сила, действующая на все положительные заряды в проводе, направлена на читателя (по вертикали к плоскости страницы). Так как весь провод находится в области однородного магнитного поля, сила имеет повсюду одинаковую величину. Положительные заряды между P и Q проталкиваются к P, тогда как положительные заряды между R и S испытывают действие толкающего усилия к S той же самой величины, благодаря чему нет результирующего тока. Заряды между Q и R, а также заряды между S и P испытывают действие толкающего усилия перпендикулярно к проводу и тока не создают.

б) Когда RS попадает в область более слабого поля, сила действия на положительные заряды со стороны такой области все еще имеет направление к S, но по величине она меньше усилия, толкающего положительные заряды от Q к P. Следовательно, положительные заряды способны двигаться от Q к P, от S к R, создавая ток по часовой стрелке.

8. Как известно из раздела 30.11, индукция магнитного поля B внутри соленоида, по которому течет ток I, равна $B=2\pi KNI$, где N есть число витков, приходящееся на единицу длины. Площадь поперечного сечения соленоида диаметром d равна $\pi d^2/4$. Следовательно,

$$\Phi_B = BA = (2\pi KNI)(\pi d^2/4) = \pi^2 KNId^2/2.$$

Подставляя числовые данные, найдем

$$\Phi_B = (3{,}14)^2 \cdot (2\cdot 10^{-7}\ \text{Н/А}^2)\cdot(1\cdot 10^3\ \text{м}^{-1})\cdot 1\ \text{А}\cdot(4\cdot 10^{-2}\ \text{м})^2/2 = 1{,}6\cdot 10^{-6}\ \text{Н·м/А}.$$

13. а) Индуцируемая в рамке ЭДС найдется в виде

$$\mathscr{E} = vB_\perp l = (2\ \text{м/с})\cdot(0{,}5\ \text{Н/(А·м)})\cdot 0{,}1\ \text{м} = 0{,}1\ \text{Дж/(А·с)} = 0{,}1\ \text{В}.$$

б) $I=\mathscr{E}/R=0{,}1\text{В}/0{,}05\ \text{Ом}=2\text{А}$. в) $F_B=B_\perp Il=(0{,}5\ \text{Н/(А·м)}\cdot 2\text{А})\cdot 0{,}1\,\text{м}=0{,}1\ \text{Н}$.

14. а) Приведем катушку во вращение с помощью внешней механической силы (рис. 76); подключим вместо батареи внешнюю цепь; проверим полярность, чтобы быть уверенными в том, что ток течет в одном направлении (эта проверка дает по сути дела ответ на второй вопрос в задаче).

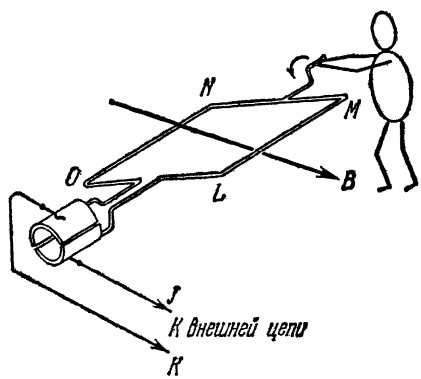


Рис. 76.

Когда плоскость катушки параллельна полю (см. рис. 76), правая ее половина движется вверх, а левая вниз, причем поток, пронизывающий катушку, меняется со временем, проходя в данный момент через мгновенное нулевое значение. Следовательно, в рамке наводится ЭДС. Направление индукционного тока можно найти, рассмотрев силу действия магнитного поля на движущийся положительный заряд. По правилу правой руки положительный заряд на участке LM испытывает действие усилия, толкающего его от L к M, а положительный заряд на участке NO от N к O. Поэтому ток течет из K через внешнюю цепь к J.

Если рамка продолжает поворачиваться, то поток, пронизывающий ее, меняется дальше, пока рамка не займет перпендикулярное к полю положение. В этот момент поток достигает своего максимального значения, а дальнейшее вращение рамки приведет к обратному изменению потока. Если до этого поток возрастал, то теперь он станет убывать (см. рис. 31.10). Следовательно, ток потечет через рамку в обратном направлении, проходя через мгновенное нулевое значение при перемене направления. С точки зрения направления действия магнитного поля на положительный заряд скорость заряда параллельна полю, так что при перпендикулярном к полю положении рамки сила действия магнитного поля на нее равна нулю. Обратите внимание на то, что коммутатор переключает концы внешней цепи и рамки как раз в этой точке. Следовательно, ток во внешней цепи сохраняет свое прежнее направление. Подобные рассуждения о последующих положениях рамки можно продолжить и дальше.

б) Как это следует из вышеизложенного, плоскость проволочной рамки должна быть перпендикулярна к магнитной индукции $\boldsymbol{B}$ в тот момент, когда коммутатор переключает концы, потому что как раз в этот момент ЭДС и ток равны нулю.

15. Эта задача об ЭДС индукции относится к разряду трудных, потому что касается движения по окружности. Данная задача подчеркивает важность понятия о потоке. По-видимому, ее лучше решить в классе, чем задавать на дом.

а) Направление тока можно найти, определив направление действия магнитного поля на положительный заряд. Воспользуйтесь правилом правой руки. Возьмите сторону BC и рассмотрите вращение рамки вокруг оси P_1.

Расположите большой палец по направлению $\boldsymbol{v}$, от себя по перпендикуляру к плоскости страницы, направив указательный палец вдоль поля. Открытая ладонь укажет направление действия магнитного поля на положительный заряд, т. е. от B к C. Вдоль AB или DC никакая сила не действует. Индукционный ток течет в рамке по направлению часовой стрелки.

При вращении вокруг оси P_2 сила, действующая на BC, имеет то же направление. Кроме того, появляется сила, действующая на AD. В данном случае AD движется к наблюдателю. Большой палец направлен перпендикулярно к плоскости страницы к наблюдателю. Остальные пальцы указывают направление магнитного поля. Ладонь обращена вверх. Сила, действующая на положительный заряд, имеет направление от D к A. Все это приводит к тому, что индукционный ток направлен по часовой стрелке.

б) Скорость вращения рамки определяет скорость, с которой перпендикулярная к плоскости рамки компонента магнитного поля меняется во времени. Следовательно, когда рамка находится в плоскости рисунка, скорость изменения потока должна быть одинаковой при вращении вокруг обеих осей, поскольку площадь самой рамки не меняется. Отсюда следует вывод, что ток одинаков в обоих случаях.

в) ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения потока, которая в свою очередь пропорциональна площади рамки. Следовательно, ЭДС индукции сама пропорциональна площади рамки.

г) Максимальная ЭДС индукции наводится в рамке в том случае, когда плоскость рамки параллельна полю, как это имеет место на рис. 31.22, потому что в данном положении поток меняется с наибольшей скоростью. Чтобы вычислить максимальную ЭДС индукции, вспомним (см. вопрос. п. а) задачи) о том, что единственной стороной, в которой наводится ЭДС индукции, является BC. ЭДС индукции $\mathcal{E}$ в проводнике длиной l, движущемся перпендикулярно к полю B со скоростью v, равна произведению $\mathcal{E}=vBl$. За один полный оборот с частотой f сторона BC покрывает расстояние $2\pi\cdot$(длина AB) за время $T=1/f$. Поэтому ее скорость движения найдется в виде

$$v=2\pi\cdot(\text{длина } AB)/T=2\pi f\cdot(\text{длина } AB).$$

Отсюда ЭДС индукции в BC, когда рамка параллельна полю, будет

$$\mathcal{E}=2\pi fB\cdot(\text{длина } AB)\cdot(\text{длина } BC)=$$
$$=2\pi\,(120/2\pi\ \text{с}^{-1})\cdot(1{,}5\ \text{Н/(А}\cdot\text{м)})\cdot(0{,}1\ \text{м})\cdot(0{,}04\ \text{м})=0{,}72\ \text{Н}\cdot\text{м/(А}\cdot\text{с)}=$$
$$=0{,}72\ \text{Дж/Кл}=0{,}72\ \text{В}.$$

16. а) 1. Чтобы вычислить ЭДС индукции по изменению потока, воспользуемся соотношением $\mathcal{E}=\Delta\Phi_B/\Delta t$. (В этом уравнении мы пренебрегли знаком минус, поскольку нам неизвестно, направо или налево движется AB, так что мы ограничимся отысканием только абсолютных значений.) Величина потока изменяется из-за изменения площади $\Delta A=lv\Delta t$, где v есть скорость движения подвижной проволоки AB, а l — длина этой проволоки. Отсюда

$$\mathcal{E}=\Delta\Phi_B/\Delta t=B\Delta A/\Delta t=Blv\,\Delta t/\Delta t=Bvl=$$
$$=(40\ \text{Н/(А}\cdot\text{м)})\cdot(0{,}2\ \text{м/с})\cdot(0{,}02\ \text{м})=0{,}16\ \text{В}.$$

2. Хотя в разделе 31.4 и подчеркивается важность формулы, связывающей поток с ЭДС индукции, некоторые учащиеся захотят решить данную задачу путем рассмотрения действующих сил. Сила действия F на элементарный заряд q, движущийся со скоростью $\boldsymbol{v}$ перпендикулярно к индукции магнитного поля $\boldsymbol{B}$, равна $F=qvB$. ЭДС есть энергия, приходящаяся на заряд, которую нужно затратить, чтобы переместить заряд из A в B. Поскольку работа равна силе, умноженной на расстояние, работа, затраченная на перемещение заряда на пути l, равна

$$\mathcal{E}=(F/q)\,l=vBl.$$

Таким образом, нами получено то же самое выражение, что и при рассмотрении изменения потока. Поэтому опять $\mathcal{E}=0{,}16$ В.

б) Индуцированное напряжение зависит от скорости изменения потока во времени. В нашем примере поток меняется из-за изменения площади. Поскольку скорость изменения площади зависит от скорости движения AB, а не от самой площади, наведенное напряжение равно 0,16 В (как и в п. а) задачи), хотя сторона длиной 15 см укоротилась до 5 см и площадь стала иной.

в) По закону сохранения энергии поступающая в рамку энергия сообщается зарядам, которые движутся по пути с разностью потенциалов, выражаемой ЭДС. Полная энергия, переданная рамке, равна произведению ЭДС на полный заряд, а скорость, с которой энергия передается, равна произведению ЭДС на скорость потока заряда, т. е. произведению ЭДС на ток. Взяв значение $\mathcal{E}$, найденное в п. а), получим

$$\mathcal{E}I = 0{,}16 \text{ В} \cdot 2\text{А} = 0{,}32 \text{ Дж/с} = 0{,}32 \text{ Вт}.$$

г) Эта сила равна по величине и противоположна по направлению силе магнитного поля на проволоку:

$$F = lIB = (2 \cdot 10^{-2} \text{ м}) \cdot (2 \text{ А}) \cdot (40 \text{ Н/(А} \cdot \text{м)}) = 1{,}6 \text{ Н}.$$

С другой стороны, скорость подачи энергии, т. е. мощность, равна произведению приложенной силы на скорость движения проволоки:

$$Fv = \text{мощность, т. е.}$$

$$F = \text{мощность}/v = 0{,}32 \text{ Вт}/(0{,}2 \text{ м/с}) = 1{,}6 \text{ Дж/м} = 1{,}6 \text{ Н}.$$

17. Эту задачу можно рассмотреть на разных уровнях в зависимости от наличия времени, успеваемости и заинтересованности класса.

Проще всего ее решить следующим образом. Поскольку проволока движется, в ней наводится ЭДС индукции, которая создает ток в цепи. На проволоку с током действует магнитная сила. Правило правой руки говорит, что эта сила противоположна направлению движения проволоки. Если внешняя сила прекратит свое действие, то проволока станет двигаться с замедлением, так как ЭДС индукции убывает, а пропорционально ей убывают магнитная сила и ускорение проволоки.

Чтобы вычислить изменение скорости движения проволоки, начнем с ЭДС индукции $\mathcal{E} = Blv$. Она создает ток $I = \mathcal{E}/R = Blv/R$. Сила магнитного действия на проволоку равна

$$F = BIl = B\,(Blv/R)\,l = (B^2l^2/R)\,v.$$

Поскольку эта сила противодействует движению, векторно можно записать $\boldsymbol{F} = -(B^2l^2/R)\,\boldsymbol{v}$. Наконец,

$$m\,\Delta\boldsymbol{v} = \boldsymbol{F}\,\Delta t = -(B^2l^2/R)\,\boldsymbol{v}\,\Delta t.$$

Таким образом,

$$\Delta\boldsymbol{v} = -(B^2l^2/mR)\,\boldsymbol{v}\,\Delta t = -[(0{,}5)^2 \cdot (0{,}1)^2/(0{,}2 \cdot 0{,}5)] \cdot v\,\Delta t = (-0{,}25\ \text{с}^{-1})\,v\,\Delta t.$$

Изменение скорости пропорционально промежутку времени, на протяжении которого мы наблюдаем за проволокой, а также самой скорости.

Точное решение полученного уравнения требует интегрирования, но нетрудно провести приближенный числовой расчет. Пусть $\Delta t = 1$ с, тогда $\Delta v = -0{,}25\,v$. Мы сможем найти скорость к концу каждой секунды путем вычитания четверти предыдущей скорости. Для первых пяти секунд движения это даст следующие данные:

Время, с	0		1		2		3		4		5
v, м/с	2		1,5		1,13		0,85		0,64		0,48
$-\Delta v$, м/с		0,50		0,37		0,28		0,21		0,16	

Эти значения нанесены в виде точек на рис. 77. Чтобы найти путь, пройденный проволокой, возьмем площадь под кривой изменения скорости, которую определим приблизительно, соединив точки отрезками прямой. Площадь пяти трапеций дает путь в 5,36 м.

Учащиеся, проходящие курс высшей математики, могут проинтегрировать уравнение для v. Они получат

$$v = v_i e^{-0,25t}.$$

Кривая на рис. 77 и выражает это уравнение. Пройденный путь будет

$$s = \int_0^t v\,dt = \int_0^t v_i e^{-0,25t}\,dt = (v_i/0,25)\,(1 - e^{-0,25t}).$$

Для пути, пройденного за 5 с, этот интеграл дает 5,72 м.

Точность числового расчета можно повысить, если вычислять значения Δv для меньших промежутков времени.

Согласно точному расчету проволока будет продолжать двигаться бесконечно долго, но, поскольку площадь под кривой изменения скорости конечна, она пройдет путь всего 8 м.

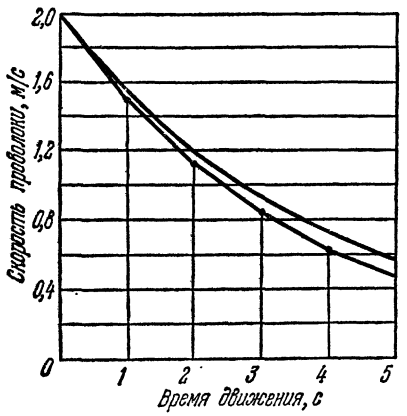


Рис. 77.

19. а) Если мы воспользуемся правилом правой руки применительно к участку петли в точке K, то убедимся, что положительные заряды движутся по направлению к нам и обходят петлю в порядке LKJ. Ток входит в амперметр в точке P и стрелка отклонится в сторону P.

Когда петлю вставляют обратно, все происходит наоборот, так что ток утекает от нас по направлению к K, а стрелка отклонится в сторону Q.

б) Если петлю вставить обратно в положение, показанное на рис. 31.24, *б*, то ток потечет от нас в направлении к K в порядке LKJ. Стрелка же отклонится в сторону P.

в) При повороте петли из положения а) на 90° ее плоскость станет параллельной магнитному полю и поток не станет ее пронизывать. Это равноценно вытаскиванию петли из магнитного поля. Стрелка отклонится в сторону P. Дальнейший ее поворот еще на 90° в том же самом направлении поставит петлю в положение б), что эквивалентно ее вставлению обратно, рассмотренному нами в п б.). Стрелка же отклонится опять в сторону P.

20. Это неколичественная задача, но она трудна, потому что требует от учащихся рассмотрения потока сквозь спутник в магнитном поле Земли, а им трудно представить картину токов в сферической оболочке.

а) Поток сквозь спутник не меняется в единственном случае, когда он движется по круговой орбите постоянной магнитной широты. Такой орбитой может быть только экваториальная орбита. (Центр Земли должен лежать в плоскости орбиты.) Итак, в металлической оболочке спутника никаких токов наводиться не будет только при его движении по экваториальной орбите. (Точнее говоря, эти утверждения относятся только к магнитному экватору, который не совпадает с географическим экватором.) При движении же спутника по другим орбитам индукция магнитного поля B станет меняться как по величине, так и по направлению, что означает переменность магнитного потока и наведение в металлической оболочке спутника индукционных токов.

б) Токи создают магнитное поле, и следовательно, сам спутник станет действовать подобно небольшому магниту. Он станет испытывать силу магнитного взаимодействия с Землей, так что действующая на него сила не обязательно должна

быть только гравитационной. Поэтому спутник сойдет с той траектории, по которой он двигался бы в чисто гравитационном поле. Частично эффект взаимодействия сведется к рассеянию спутником энергии в виде теплоты, выделяющейся при прохождении наведенных токов. Как это ни парадоксально, но при потере энергии спутник движется с ускорением (см. раздел 24.5). Оценить величину этих сил взаимодействия очень трудно.

21. а) С приближением магнита к петле индукция создаваемого им в петле магнитного поля возрастает. Следовательно, магнитный поток, пронизывающий петлю, изменяется, а это влечет за собой наведение тока в петле. По закону Ленца

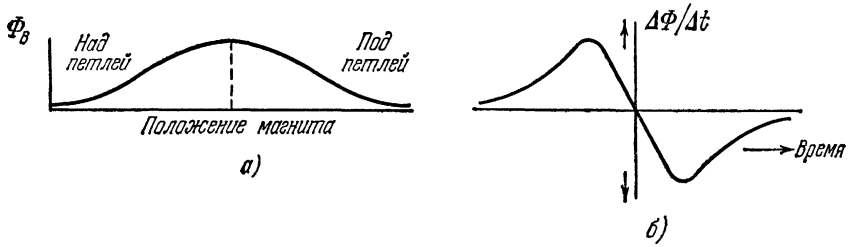


Рис. 78.

наведенный ток имеет такое направление, при котором он должен противодействовать изменению порождающего его магнитного потока. Таким образом, индукционный ток должен уменьшать индукцию магнитного поля в петле. Это значит что индукционный ток должен сам создавать магнитное поле, которое имеет внутри петли направление вверх по вертикали, к ее плоскости. Загнув наши пальцы вверх внутри петли, убедимся, что, как показывает большой палец, ток в петле течет против часовой стрелки. При таком направлении индукционный ток противодействует изменению магнитного потока.

Чтобы найти величину ЭДС индукции, наведенной в петле изменением потока, нам придется определить скорость изменения потока $\Delta\Phi_B/\Delta t$. Поэтому давайте изобразим изменение потока Φ_B, создаваемого магнитом, в функции положения магнита (рис. 78, *а*). Поток равен нулю, когда магнит находится далеко от петли над ней, приобретает максимальное значение, когда магнит находится в центре петли, и затем опять убывает до нуля, когда магнит удаляется от петли по направлению вниз.

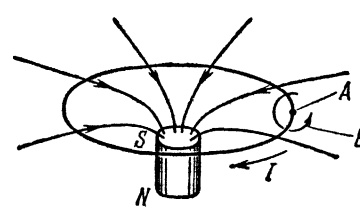


Рис. 79.

Если магнит опускается с постоянной скоростью, то скорость изменения магнитного потока выглядит так, как это показано на рис. 78, *б*. Это есть ЭДС индукции в петле, наведенной благодаря изменению потока. Заметьте, что она имеет направление против часовой стрелки, если смотреть сверху, когда магнит приближается к петле. Она равна нулю, когда магнит проходит через центр петли, потому что в данном положении поток от магнита, пронизывающий петлю, не изменяется. ЭДС индукции в петле имеет направление по часовой стрелке, когда магнит продолжает свое движение под петлей, потому что в данном случае поток с направлением вниз не возрастает, а убывает. Эту перемену направления можно понять также из рис. 79. В системе отсчета, в которой магнит неподвижен, петлю поднимают поля, которые имеют теперь иное направление, чем прежде.

Изложенные выше рассуждения касались главным образом ЭДС индукции. Если петля обладает довольно большим сопротивлением, то ток в петле станет следовать за изменением ЭДС, как это делает ток I_0 на рис. 80. Так будет гласить наиболее вероятный ответ учащихся. С другой стороны, если проволочная петля изготовлена из почти идеального проводника, индукционный ток вместо того, чтобы следовать за ЭДС индукции, наведенной опускающимся магнитом, станет

возрастать до максимума и начнет убывать до нуля только тогда, когда магнит пройдет через петлю. Ток перестает следовать за ЭДС индукции, наведенной опускающимся магнитом, из-за того, что индукционный ток сам создает пронизывающий петлю магнитный поток, изменение которого способствуют поддержанию тока в петле. В случае петли с большим сопротивлением ток слаб, так что создаваемым им магнитным потоком можно пренебречь по сравнению с потоком, порождаемым опускающимся магнитом. Поэтому полный индукционный ток следует за потоком Φ_B, а не за ЭДС индукции, равной скорости изменения создаваемого магнитом потока $\Delta\Phi_B/\Delta t$. Такое поведение приблизительно характеризуется

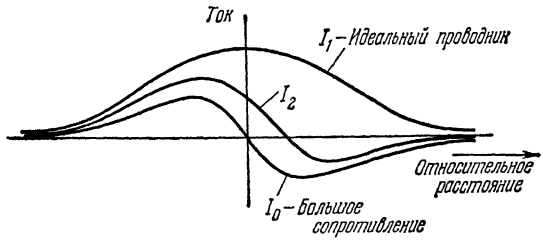


Рис. 80.

кривой изменения тока I_1 на рис. 80. Для петли из обычного проводника ток занимает промежуточное положение между двумя крайними случаями и характеризуется кривой изменения тока I_2.

б) Нет. ЭДС индукции создает ток, который в свою очередь порождает магнитное поле, воздействующее на магнит. Поэтому магнит движется с неравномерным ускорением.

Если петля обладает большим сопротивлением (кривая I_0 на рис. 80), энергия непрерывно преобразуется в петле в теплоту. Эта энергия берется за счет кинетической энергии магнита. Сила действия на магнит всегда носит характер тормозящей (задерживающей) силы. Если же петля не обладает сопротивлением, то рассеяния энергии не может происходить. На первых порах действует задерживающая сила, но как только магнит пройдет через петлю, она станет отталкивать его, что заставит магнит двигаться с ускорением. Эти утверждения можно проверить в общем виде посредством прямого распространения законов, определяющих направление действия сил, на два случая с токами I_0 и I_1.

22. Пока рамка находится над магнитным полем, она свободно падает с постоянным ускорением.

Когда же нижняя сторона рамки достигает магнитного поля, то, пока рамка остается в этом поле, магнитный поток, пронизывающий рамку, станет возрастать. Этот переменный поток наведет ЭДС, которая создаст ток в направлении, показанном на рис. 81, *а* (индукция B направлена от читателя). Магнитная сила F, действующая на нижнюю сторону рамки, уменьшает ускорение последней.

С выходом нижней стороны петли за пределы магнитного поля рамка падает свободно с ускорением силы тяжести до тех пор, пока верхняя сторона рамки не попадет в магнитное поле. На протяжении некоторого времени магнитный поток, пронизывающий рамку, остается постоянным, как это можно видеть из рис. 81, *б*.

Как только верхняя сторона рамки достигнет магнитного поля, пронизывающий рамку магнитный поток станет убывать. Наведенная благодаря этому ЭДС в рамке создает ток в направлении, показанном на рис. 81, *в*. Магнитная сила F опять противодействует движению и уменьшает ускорение рамки.

Как только рамка выйдет полностью из магнитного поля, она начнет снова падать свободно с постоянным ускорением.

Поскольку магнитная сила F, действующая на рамку по направлению снизу вверх, пропорциональна мгновенной скорости ее движения, она может быть как больше, так и меньше силы тяжести рамки. Если она больше силы тяжести, то рамка станет двигаться с замедлением, пока обе силы не уравняются, после чего скорость движения рамки останется постоянной. Если же магнитная сила меньше

силы тяжести, то она станет уменьшать ускорение, но сама скорость будет продолжать нарастать, стремясь к тому постоянному значению, при котором обе силы уравняются. На коротких расстояниях, свойственных данному опыту, этого значения скорость движения рамки, видимо, достичь не сможет.

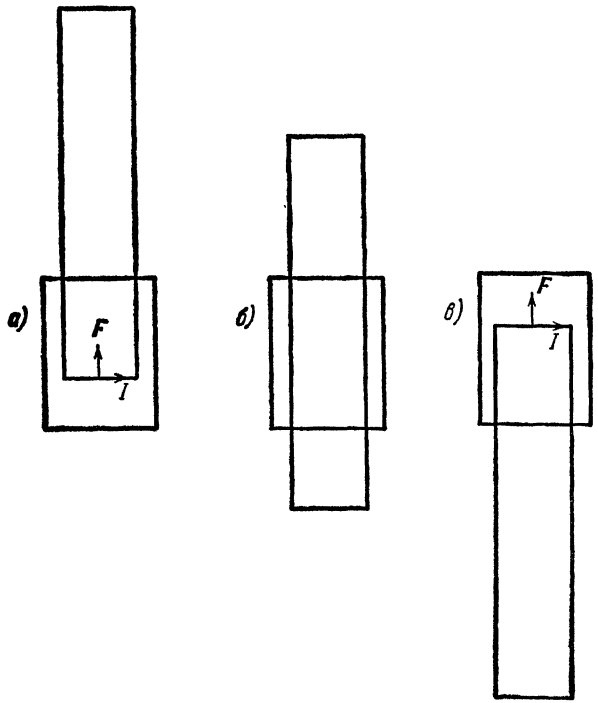


Рис. 81.

24. Эту задачу, касающуюся ЭДС индукции, можно использовать для того, чтобы подчеркнуть, что переменный магнитный поток создает электрическое поле. К тому же в ней приводятся некоторые интересные данные о современных ускорителях, применяющихся в ядерной физике.

Энергия, приобретенная электроном, равна работе, совершенной над ним. Эту работу можно вычислить в виде произведения Fd, где F — электрическая сила, а d — путь, пройденный электроном. Электрическую силу можно вычислить из ЭДС индукции:

$$\mathcal{E} = \Delta\Phi_B/\Delta t = 24 \text{ Н}\cdot\text{м}/(\text{А}\cdot\text{с}) = 24 \text{ Дж}/\text{Кл} = 24 \text{ В}.$$

Электрическое поле E находят с учетом того обстоятельства, что ЭДС индукции соответствует действию электрического поля E на пути длиной $2\pi r$. Следовательно,

$$\mathcal{E} = 2\pi r E, \text{ т. е. } E = \mathcal{E}/2\pi r.$$

Пройденный электроном путь, на протяжении которого он испытывал действие этого поля, имеет длину $d = vt$. Эквивалентное напряжение будет

$$V = Ed = \frac{\mathcal{E}vt}{2\pi r} = \frac{24 \text{ В}\cdot(3\cdot10^8 \text{ м/с})\cdot(1/240 \text{ с})}{2\cdot3{,}14\cdot0{,}5 \text{ м}} = 9{,}6\cdot10^6 \text{ В}.$$

Электрон несет на себе один элементарный заряд, так что он приобретает энергию $9{,}6\cdot10^6$ эВ. В ядерной физике принято пользоваться сокращением МэВ для 10^6 эВ. Таким образом, в задаче говорится о бетатроне на 10 МэВ.

То же самое выражение для энергии можно вывести, если учесть, что электрон при каждом обороте разгоняется под действием напряжения $\mathcal{E}$, равного 24 В, так что приобретенная им полная энергия найдется как произведение 24 эВ на полное число его оборотов.

При каждом обороте электрон проходит расстояние $2\pi r$, а весь пройденный им путь составляет vt; следовательно, электрон совершит $vt/2\pi r$ оборотов. Отсюда приобретенная им энергия выразится в виде

$$\mathcal{E}\,(1\text{ элем. зар.})\,vt/2\pi r.$$

Примечание по поводу теории относительности. Кое-кто из ваших учащихся может заинтересоваться вопросом о том, почему мы взяли скорость электрона равной $3\cdot10^8$ м/с вопреки тому, что электрон приобретает в бетатроне бо́льшую скорость. Например, некоторые учащиеся могут попытаться найти действительную конечную скорость электрона с энергией 10 МэВ по формуле $E_к=mv^2/2$. Если они это сделают, то у них получится следующая величина:

$$v=\sqrt{2E_к/m}=\sqrt{2\,(1{,}6\cdot10^{-12}\text{ Дж})/(9\cdot10^{-31}\text{ кг})}=2\cdot10^9\text{ м/с}.$$

Эта скорость в шесть раз больше скорости света. Трудность здесь состоит в том, что кинетическая энергия не равна $mv^2/2$, когда объект движется со скоростью, приближающейся к скорости света c. Правильная формула для кинетической энергии в таком случае выглядит следующим образом:

$$E_к=mc^2\left[\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}-1\right];$$

эта формула сводится к выражению $mv^2/2$ только в тех случаях, когда v много меньше c.

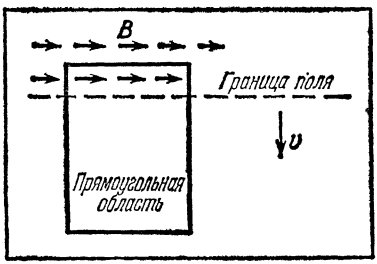


Рис. 82.

28. Проводимые ниже рассуждения развертываются в том же направлении, что и излагаемые на стр. 157 рассуждения о движущейся границе магнитного поля. Рассмотрим прямоугольную область пространства, перпендикулярную к направлению электрического поля и почти полностью лежащую впереди границы. Один край этой области находится непосредственно сзади границы и располагается параллельно ей. Поскольку электрический поток, пронизывающий данную область, меняется, вокруг края области должна существовать какая-то магнитная циркуляция. Перед границей вообще нет никакого поля. Единственным местом, где могло бы существовать магнитное поле, является пространство вдоль края непосредственно позади границы. Поскольку электрическое поле имеет направление вертикально вниз, а пространство, через которое оно проходит, становится все больше, должен существовать эквивалентный ток, текущий по направлению вертикально вниз. Направив большой палец правой руки вниз, мы убедимся в том, что позади границы наши пальцы покажут направо. Поэтому магнитное поле непосредственно позади границы направлено вправо, когда граница приближается к нам.

Теперь мы можем расширить нашу область назад, немного дальше в тыл от границы поля. На рис. 82 показано, что мы увидели бы, посмотрев вниз на нашу область. Электрическое поле имеет направление по перпендикуляру к плоскости страницы от читателя. Магнитное поле вдоль боковых краев равно нулю впереди границы и перпендикулярно к этим краям непосредственно позади границы. Следовательно, боковые края не дают вклада в магнитную циркуляцию. Единственное место, где магнитное поле могло бы дать вклад в эту циркуляцию, это вдоль заднего края. Но в таком случае магнитное поле должно иметь направление вправо. Развивая дальше эти рассуждения, мы убедимся в том, что повсюду позади движущейся границы существует магнитное поле с направлением вправо.

30. В данной задаче подчеркивается связь между ускорением и электромагнитным излучением. В ней приводятся также типичные значения длины волны и частоты для мягких (с малой энергией) рентгеновских лучей.

а) Чтобы оценить величину времени торможения, предположим, что торможение происходит с постоянным замедлением. Найдем $v_{ср}$:

$$v_{ср} = (v_н + 0)/2 = (3 \cdot 10^7 \text{ м/с})/2 = 1{,}5 \cdot 10^7 \text{ м/с}.$$

Определим отсюда время торможения:

$$t_{торм} = d/v_{ср} = 10^{-10} \text{ м}/(1{,}5 \cdot 10^7 \text{ м/с}) = 6{,}7 \cdot 10^{-18} \text{ с}.$$

б) Определим частоту f в виде $1/t_{торм}$:

$$f = 1/(6{,}7 \cdot 10^{-18} \text{ с}) = 1{,}5 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}.$$

в) Этой частоте соответствует длина волны

$$\lambda = v/f = (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})/(1{,}5 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}) = 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}.$$

(При расчете частоты мы предположили, что она равна $1/t_{торм}$. Но как будет видно из гл. 33, максимальная частота может зависеть от других явлений. Согласно квантовой механике максимальная частота зависит от энергии отдельных электронов. Если эта энергия мала, то никакого высокочастотного (коротковолнового) света не увидишь даже тогда, когда время торможения имеет очень малую величину.)

31. Приводить доводы в пользу того, что звук не относится к электромагнитным явлениям, можно бесконечно. Перечислим лишь отдельные из них:

1. Звук не распространяется через пустоту.
2. Звук распространяется не со скоростью света.
3. Двигающиеся с ускорением заряды не порождают звука. Его можно генерировать явно неэлектрическими средствами.
4. Достоверно известно, что существует электромагнитное излучение с частотами того же диапазона, что и звуковые колебания (мертвая зона в диапазоне радиолокационных волн), но отличающееся от звуковых волн.
5. Часто звук представляет собой преимущественно продольную волну, которая не подвержена поляризации. (Хотя о поляризации ничего не говорится в Учебнике, у большинства учащихся все же о ней имеется то или иное представление.)

ГЛАВА

32 ИССЛЕДОВАНИЕ АТОМА

Резерфорд предпринял попытку исследовать строение отдельных атомов на классических началах физики (законе Ньютона, законе Кулона). Эта попытка оказалась и успешной и безуспешной. Опыты Резерфорда увенчались созданием планетарной модели атома, в которой вокруг тяжелого положительного ядра по окружностям движутся один или несколько электронов, удерживаемых кулоновской силой, во многом подобно тому, как на своих орбитах планеты удерживаются гравитационным притяжением Солнца. Эта модель привела к пониманию не только результатов опытов Резерфорда по рассеянию α-частиц, но и некоторых других свойств атомов. Эта попытка оказалась «безуспешной» в том отношении, что она довольно убедительно показала неспособность классической физики объяснить явления в атомарном масштабе. Согласно классической физике атом в том виде, как его представлял себе Резерфорд, должен быть неустойчивым и очень скоро распался бы от испускания электромагнитного излучения.

Краткое содержание главы 32

Введение. Дается краткий обзор сведений, которые должны знать учащиеся, о составных частях атомов. Затем как фундамент к объяснению общего замысла опыта Резерфорда в нем рассказывается в качестве простого примера о зондировании кипы сена выстрелами из винтовки в целях определения положения и формы «спрятанных» в ней предметов по результатам изучения направления полета пуль при вхождении в кипу и их траекторий после рикошетирования.

Раздел 32.1. Если α-частицами стрелять в тонкую золотую фольгу толщиной около 400 атомов золота, то бо́льшая их часть пройдет сквозь такую фольгу без отклонений. Это свидетельствует о том, что бо́льшая часть пространства внутри атома пуста (или заполнена разряженным веществом, не препятствующим прохождению α-частиц). В виде редкого исключения α-частица отклоняется от своего первоначального пути под очень большим углом, что свидетельствует о наличии внутри атома какого-то сосредоточения массы, которое способно отклонять α-частицу. Это наблюдение побудило Резерфорда создать планетарную модель атома.

Разделы 32.2—32.4. Планетарная модель Резерфорда позволила не только описательно объяснить результаты опытов по рассеянию α-частиц, но и точно предсказать траекторию, по которой та или иная α-частица полетит, пройдя на расстоянии b от тяжелого остова, или ядра. Усреднение по всем возможным значениям b (малая величина ядра исключает возможность «лобового» соударения α-частиц с ядрами) дает ожидаемое рассеяние α-частиц. Теория согласуется с опытом и в действительности дает нам сведения о числе зарядов обоих видов в атоме и позволяет составить первые представления о величине атомного ядра.

Раздел 32.5. Модель Резерфорда поставила больше вопросов, чем сумела дать на них ответы. Бóльшая часть оставшихся без ответа вопросов была связана главным образом с тем обстоятельством, что согласно классической теории электромагнитных явлений атом должен испускать свою энергию в виде света и быстро разрушаться от распада. Однако атомы не распадаются. Испускаемый ими свет не имеет предсказываемых этой теорией частот. Здесь классическая теория бессильна. В главах 33 и 34 учащиеся ознакомятся с квантовой механикой.

План изучения главы 32

Бóльшая часть излагаемого в настоящей главе материала доступна пониманию заинтересовавшимся читателям с очень небольшим багажом знаний по физике из предшествующего курса. Важно не затенить явные качественные особенности излишне подробным разбором. С другой стороны, многие учащиеся обязательно захотят воспользоваться всеми приобретенными ими познаниями по механике и электричеству. В каждом классе нужно найти свою золотую середину между одной крайностью (чисто описательной проработкой материала) и другой крайностью, заключающейся в потере направления при количественных расчетах. Как вы справитесь с решением данной задачи, зависит от подготовленности класса и количества времени, которое удастся выделить на проработку настоящей главы.

В табл. 15 приводятся возможные варианты плана прохождения данной главы, согласующиеся с общим планом, по которому должна проходиться вся часть IV курса (см. табл. 1 на стр. 284). В данной главе не предусматривается постановки каких-либо специальных опытов.

ТАБЛИЦА 15

Глава 32	10-недельный план изучения части IV	15-недельный план изучения части IV
Разделы	В классе, часы	В классе, часы
Введение, 32.1	1	2
32.2	1	2
32.3, 32.4	2	2
32.5	1	2

Дополнительные материалы к главе 32

Лаборатория. Опытов, прямо относящихся к настоящей главе, нет.

Домашние, классные и лабораторные задания. Ознакомьтесь на стр. 431 с ответами, решениями и таблицей, в которой задачи расклассифицированы по степени их предположительной трудности.

Методические указания по демонстрационным опытам. С учетом теперешней доступности радиоактивных источников α-частиц у вас может возникнуть соблазн поставить демонстрационный опыт с рассеянием α-частиц. *Не пытайтесь этого делать*, если вы не являетесь хорошим специалистом по радиоактивным излучениям и если у вас нет очень хорошего лабораторного оснащения. Любой необходимый для такого опыта источник α-частиц создает

огромную опасность. Источники α-частиц опасны в том отношении, что такие частицы не способны проникать сквозь корпус счетчика Гейгера, и потому их не так просто обнаружить, когда возможна их утечка. Зачастую такие источники «утекают» и распространяются около контейнеров, в которых их хранят, особенно тогда, когда источники упаковываются любителями. Довольствуйтесь наблюдением сцинцилляций от весьма слабых источников, например от светящихся циферблатов.

Введение

Во Введении к настоящей главе излагается необычно много материала, в связи с чем его надо проработать в классе.

Методическое указание. Прежде чем перейти к изучению этих последних трех глав, вы можете захотеть обсудить в классе все то, что вы уже знаете (из настоящего курса) о строении вещества. Если вы располагаете достаточным временем, остановитесь на атомной природе электричества, о чем у учащихся уже должны быть не малые познания.

Из частей I и III

1. Все вещество состоит из сравнительно немногочисленных элементов. (Раздел 7.7.)

2. Свет, испускаемый каждым элементом, обладает характеристическим спектром. (Раздел 7.8.)

3. Вещество состоит из атомов. (Раздел 8.1.)

4. Нам известна приблизительная величина атомов. (Разделы 8.2, 8.3, 8.4, опыт 1.6.)

5. Нам известно число атомов в моле, а отсюда и масса атома. (Разделы 8.7, 8.10.)

6. У нас есть основания судить о структуре кристаллов. (Раздел. 8.14.)

7. У нас есть неплохая модель газа. (Гл. 9, 25.)

Из части IV

1. Вещество содержит положительный и отрицательный электрические заряды. (Раздел 26.2.)

2. Положительный и отрицательный заряды можно разделить. (Раздел 26.9.)

3. Электрический заряд выступает как целочисленная совокупность природных мельчайших кирпичиков. (Раздел 27.5.)

4. Электроны, присутствующие во всяком веществе, несут на себе по одному отрицательному элементарному заряду. (Разделы 26.12, 27.9.)

5. Нам известны массы отдельного протона и отдельного электрона. (Раздел 28.1.)

6. Ньютоновская механика распространяется на некоторые виды движения атомных частиц. (Раздел 28.1.) В гл. 33 и 34 рассматриваются некоторые ограничения на приложимость ньютоновской механики.

7. Двигающиеся с ускорением заряды испускают электромагнитное излучение: то же самое относится и к атомам, но при «правильных» частотах. (Раздел 31.9.)

Хотя простое перечисление обычно приносит мало пользы, приведенный выше перечень может стать хорошим предварительным заданием перед классным обсуждением, закладывающим фундамент под предстоящее изучение данной главы, равно как и двух заключительных глав.

Аналогия между поисками контрабанды в кипах сена и изучением строения атомов проста и не потребует больших разъяснений. Можно попросить класс прочесть самостоятельно Введение к настоящей главе и решить дома задачу 1, прежде чем приступить к изучению данной главы. Задача 1 иллюстрирует два важных момента. Из опытов по рассеянию α-частиц можно извлечь количественные данные о строении атома. Сами по себе эти данные могут и не привести к однозначному выводу о таком строении, но они совершенно определенно пригодятся для проверки достоверности той или иной гипотетической модели.

В весьма реальном плане опыт с рассеянием α-частиц представляет собой просто видоизмененный вариант того, что происходит, когда мы рассматриваем обыкновенный предмет в дневном свете. Когда мы рассматриваем предмет, мы видим его и тем самым узнаем о его объеме и форме посредством визуального наблюдения света, который предмет отражает, рассеивает и не пропускает. Во многом подобно таким же образом мы «смотрим» на атомы посредством наблюдения за их воздействием на пучок α-частиц, электронов, протонов, нейтронов или электромагнитного излучения подходящих частот.

32.1. Отклонение альфа-частиц и модель атома Резерфорда

Содержание. В 1911 г. Резерфорд предложил модель атома, которая изображает атом состоящим из небольшого положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома, и нескольких электронов, обращающихся вокруг ядра подобно планетам вокруг Солнца. Резерфорд понимал, что пригодность его представлений можно проверить, наблюдая за отклонениями от своего пути быстро движущихся заряженных частиц при их прохождении сквозь тонкую фольгу из того или иного вещества.

Методические указания. Данный раздел нуждается в тщательном классном обсуждении, так как в нем описательно изложена бóльшая часть всего материала, содержащегося в настоящей главе.

На данной ступени выдвинутая Резерфордом планетарная модель не подлежит обстоятельному анализу. К ней мы еще вернемся в гл. 34. В настоящее же время нам нужна только описательная картина, на которой нарисовано тяжелое положительно заряженное ядро, окруженное легкими отрицательно заряженными электронами. Этого достаточно для рассмотрения опытов с рассеянием α-частиц. Напомните учащимся следующее. Уже в резерфордовское время было известно (это учащиеся должны знать), что все отрицательные частицы атомов одинаковы и обладают наименьшей массой из всех элементарных частиц и что положительно заряженные частицы массивны.

Нужно добиться от учащихся понимания того, что при соударении α-частицы с электроном она не может значительно отклониться от своего пути, поскольку α-частица приблизительно в 7400 раз массивнее электрона. Это можно уподобить в какой-то мере попаданию пушечного ядра в подшипниковый шарик. Чтобы значительно отклониться от своего пути, α-частице предстоит столкнуться с чем-то, что обладает по крайней мере сопоставимой с ней массой.

Учащиеся могут поинтересоваться, что случается с α-частицей, когда она пролетает около нейтрального атома. Если α-частица не проникнет во внутреннее пространство электронной орбиты, то ожидать заметного ее отклонения от своего пути не приходится. Так как атом представляет собой в целом нейтральное образование, снаружи него нет поля. Электрическая сила способна оказать

воздействие на α-частицу только тогда, когда последняя проникает внутрь электронной орбиты.

Когда усилия направляются на приобретение познаний о строении атомов, полезно изучить динамику соударения α-частицы с одиночным атомом. Трудно прийти к простым выводам, когда наблюдаемые отклонения представляют собой кумулятивный результат многих соударений. Поэтому в опытах по рассеянию пользуются очень тонкой фольгой. Чтобы проверить, достаточно ли тонка фольга и предотвращает ли она возможность многократных соударений, можно обратиться к экспериментальной зависимости доли рассеиваемых под данным углом α-частиц от толщины фольги. Эта доля будет возрастать прямо пропорционально толщине только в том случае, когда отклонения частиц от своего пути обусловлены соударениями с одиночными атомами.

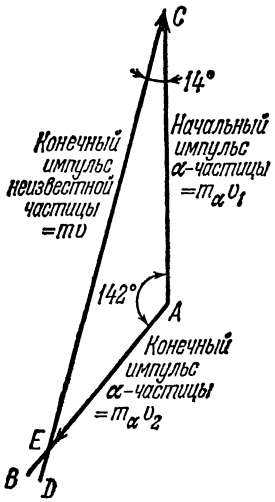


Рис. 83.

То обстоятельство, что бо́льшая часть α-частиц пролетает сквозь фольгу толщиной, равной многократному размеру атомов, без отклонений от своего пути, опровергает представление о том, будто атомы представляют собой твердые кусочки вещества, но само по себе еще не говорит о том, что атом есть по большей части пустое пространство. Масса атома могла бы быть распределена равномерно по всему его объему подобно жидкому желе. Однако в этом случае такая модель не позволила бы объяснить наблюдение, согласно которому очень большие отклонения возможны лишь в весьма редких случаях. И только тщательное изучение углового распределения отклонившихся α-частиц, рассматриваемого в последующих разделах, позволяет сделать разумные выводы о строении атомов.

Тщательный анализ соударения, изображенного на рис. 32.3, открывает отличную возможность для повторения механики. Такой анализ напомнит учащимся о том, что изучавшаяся ими механика все еще приложима в атомной и ядерной физике.

Как узнать, что изображенное на рис. 32.3 событие представляло собой в действительности упругое соударение α-частицы с атомом азота? Пусть нам известно, что налетевшая частица была α-частицей, но как распознать частицу, о которую она ударилась. Как оказывается, это можно сделать, обратившись к закону сохранения энергии. Если измерить углы между тремя треками *), то можно прибегнуть к закону сохранения количества движения, чтобы вычислить конечные скорости α-частицы и неизвестной частицы, выразив их через исходную скорость α-частицы. Затем можно выписать уравнение, выражающее закон сохранения энергии, и разрешить его относительно неизвестной массы.

На рис. 83 изображен треугольник, характеризующий конфигурацию трех треков на фотографии. Длины трех сторон треугольника должны быть пропорци-

*) Для этого в действительности потребовалась бы стереоскопическая картина, т. е. два снимка с разных мест, однако можно считать, что соударение случилось в плоскости фотографии (именно почти так и обстоит дело в действительности).

ональны соответствующим количествам движения (импульсам). Нам известно исходное направление количества движения α-частицы ($m_\alpha v_1$) по ее треку перед соударением. Произвольно построим такой вектор, как это показано на рис. 83. Все остальные импульсы и скорости надлежит выразить через этот произвольно выбранный вектор. Нам известно направление конечного полета α-частицы, так что мы проводим линию AB под углом 142° к исходному импульсу. Длина отрезка AB нам пока еще неизвестна. Отложим конечный импульс неизвестной частицы вдоль линии CD под углом 14°, как показано на рис. 83. Прямые AB и CD пересекаются в точке E. Теперь треугольник импульсов определен полностью, поскольку исходный импульс должен быть равен векторной сумме двух конечных импульсов. Измерив масштаб построения, найдем

$$m_\alpha v_2/m_\alpha v_1 = 0{,}6, \quad v_2 = 0{,}6 v_1,$$
$$mv/m_\alpha v_1 = 1{,}51, \quad v = 1{,}51 m_\alpha v_1/m.$$

Запишем закон сохранения энергии применительно к рассматриваемому случаю:

$$m_\alpha v_1^2/2 = m_\alpha v_2^2/2 + mv^2/2;$$

подставив в него только что найденные выражения для скоростей, получим

$$m_\alpha v_1^2/2 = m_\alpha (0{,}6^2 v_1^2)/2 + m (1{,}51^2 m_\alpha^2 v_1^2)/2m^2.$$

Сократив на $m_\alpha v_1^2/2$, найдем

$$1 = 0{,}36 + 2{,}28 m_\alpha/m, \quad m = (2{,}28/0{,}64)\, m_\alpha = 3{,}56 m_\alpha.$$

Поскольку масса α-частицы равна четырем атомным единицам массы, $m = 14{,}2$, т. е. приблизительно 14. Неизвестный атом есть атом азота. Поскольку измерение углов сопряжено с трудностями, от учащихся не следует ожидать большой точности. Хорошо, если масса неизвестной частицы получится у них равной 12—16 атомным единицам массы.

32.2. Траектории альфа-частиц в электрическом поле ядра

Цель. Обсудить вопрос о *траекториях* α-частиц, рассеиваемых ядром, в свете резерфордовской модели атома.

Содержание. Из закона движения Ньютона и закона Кулона можно рассчитать возможные траектории заряженной частицы в электрическом поле другой заряженной частицы. Угол отклонения θ зависит от «прицельного расстояния» b.

Методические указания. Данный раздел носит описательный характер и легко усваивается учащимися, но он весьма важен. Вашему классу должно быть понятно, что в том случае, когда известен закон силы, траекторию можно рассчитать прямым приложением закона движения Ньютона. Как выяснится, когда сила подчиняется закону Кулона, существует возможность рассчитать траекторию, но для этого нужно знать немного больше математики, чем это дает обычная средняя школа. Однако учащимся должно быть ясно, что в принципе всегда можно рассчитать траекторию повторным приложением закона Ньютона поочередно к ее отрезкам небольшой длины, беря каждый раз правильную силу, чтобы вычислить создаваемое ею изменение скорости. Полезно и интересно, если у вас найдется время провести приближенный расчет небольших отклонений, присущих большим прицельным расстояниям. Такой расчет приведен в Приложении 4 на стр. 524.

Прежде чем приступить к изложению приводимых в Учебнике рассуждений, связанных с потенциальной энергией, задайте в классе вопрос о характере траектории α-частицы, пролетающей мимо ядра. Начните с лобового соударения. Учащиеся должны понимать, что в данном случае α-частица просто затормозится, остановится и отлетит обратно по прежней траектории. Затем рассмотрите случай большого прицельного расстояния, когда действием силы можно всюду пренебрегать. Такая траектория представляет собой прямую линию. После этого перейдите к промежуточному случаю. Уже одно направление действия силы покажет учащимся, что частица должна отклониться в сторону.

Учащиеся могут спросить, почему ядро атома не приходит в движение при ударе. Разумеется, оно приходит. В действительности его количество движения $m\Delta v$ изменится при ударе ровно настолько, насколько оно изменится у α-частицы. Но поскольку масса ядра атома золота много больше массы α-частицы, его скорость изменится соответственно меньше. Обычно этим движением пренебрегают. Но если ударяемое ядро имеет небольшую массу, нам надлежит учесть его отдачу (см. рис. 32.3).

Изображенная на рис. 32.6 и 32.7 механическая модель может сильно помочь учащимся разобраться с зависимостью угла рассеяния θ от «прицельного расстояния» b. Но чтобы избежать возможного разочарования, надо отметить, что построить такую модель с достаточной точностью и довольно малым трением трудно. Поэтому она может дать лишь весьма приближенные результаты.

Если вы решили удовольствоваться грубой моделью, которую легко сделать, натяните на рамку лист каучука и приподнимите его в центре карандашом снизу так, чтобы образовался холмик. Скатывающийся с такой модели игрушечный шарик будет испытывать противодействие большой силы трения, так что он станет моделировать обратную пропорциональность силы скорее расстоянию, нежели квадрату расстояния, но такую модель легко сделать самому и к тому же она иллюстрирует многие особенности рассеяния α-частиц.

На данной ступени учащиеся должны знать следующее: 1) для α-частицы заданной энергии — шарика на вершине холмика — всякому прицельному расстоянию соответствует свой угол рассеяния; 2) чем больше прицельное расстояние, тем меньше рассеяние, и чем меньше прицельное расстояние, тем больше рассеяние.

32.3. Угловое распределение рассеяния

32.4. Дальнейшие сведения о рассеянии

Цель. Рассказать о действительных опытах с рассеянием α-частиц и показать, что они количественно объясняются резерфордовской планетарной моделью атома.

Содержание. Резерфорду удалось рассчитать, воспользовавшись законами Ньютона и Кулона, вероятность того, что α-частица при прохождении через тонкую фольгу отклонится от своего пути на тот или иной угол. Проведенные Гейгером и Марсденом опыты полностью подтвердили этот расчет, дав веские доводы в пользу справедливости выдвинутой Резерфордом модели атома. Эти опыты к тому же установили верхний предел размеров атомного ядра. Аналогичные же опыты, проведенные Чадвиком, позволили измерить электрический заряд у ядер атомов нескольких элементов.

Методические указания. Мы умеем рассчитывать орбиты, соответствующие различным прицельным расстояниям. Это дает зависимость между прицельным расстоянием и углом рассеяния, а сама зависимость определяется выбором закона силы. Чтобы конкретизировать изложение, полезно провести расчет для одного-двух простых случаев. Задача 15 и рис. 31.16 относятся к случаю резко обрывающейся силы, возникающей, например, при упругом соударении двух бильярдных шаров. Есть смысл подробно рассмотреть этот случай.

Расчет для более уместного случая действия кулоновской силы гораздо сложнее и здесь не проводится (краткий вывод дан в Приложении 4 на стр. 524). Результат сам по себе довольно прост и вы можете воспользоваться им в целях конкретизации последующего обсуждения. У Резерфорда зависимость между прицельным расстоянием b и углом рассеяния θ (см. рис. 32.11) имела следующий вид: $2\ \mathrm{tg}(\theta/2)=r_0/b$, где расстояние наибольшего сближения при лобовом соударении r_0 равно $kQ_\alpha Q_N/E_\alpha$ (на расстоянии r_0 от ядра электрическая потенциальная энергия равна исходной кинетической энергии E_α). Для небольших углов рассеяния θ зависимость между углом рассеяния и прицельным расстоянием b выражается в виде

$$\theta=kQ_\alpha Q_N/bE_\alpha.$$

Зависимость между «площадью мишени» и вероятностью рассеяния довольно проста, но, вероятно, требует подробного рассмотрения. Здесь может принести пользу простой пример, подобный рассматриваемому ниже.

Пусть у нас имеется набор одинаковых мишеней, равномерно (или случайно) распределенных по определенной площади, например $N_t=15$ мишеней на каждый квадратный метр. Если равномерно (или случайно) простреливать пулями площадь с мишенями, то какова вероятность попадания в любую мишень в пределах круга радиусом 5 см? В пределах круга радиусом 2 см?

В первом случае каждая мишень имеет эффективную площадь $\pi b^2=\pi\cdot(0{,}05)^2=$ $=0{,}008\ \text{м}^2$. Для 15 мишеней в квадратном метре это дает общую эффективную площадь мишеней, равную $N_t\cdot(\pi b^2)=15\cdot 0{,}008\ \text{м}^2=0{,}12\ \text{м}^2$. Доля выстрелов, поражающих мишени (в пределах кругов радиусом 5 см), будет просто равна отношению эффективной площади мишеней ко всей площади, т. е. в нашем случае

$$0{,}12\ \text{м}^2/1\ \text{м}^2=0{,}12.$$

Если произвести 10 000 выстрелов,то ожидаемое число попаданий составит $0{,}12\cdot 10\ 000=1200$.

Если поставить более жесткое условие, потребовав попадания в пределах круга радиусом всего 2 см, число вероятных попаданий будет меньше. В этом случае эффективная площадь каждой мишени составит $\pi b^2=\pi\,(0{,}02)^2=0{,}001\text{м}^2$. Для тех же 15 мишеней на квадратный метр это дает общую эффективную площадь мишеней

$$N_t\cdot(\pi b^2)=15\cdot 0{,}001\ \text{м}^2=0{,}015\ \text{м}^2.$$

Вероятность того, что одним выстрелом удастся поразить мишень радиусом 2 см, составит в данном случае 0,015. На 10 000 выстрелов у нас получится (в среднем) всего 150 попаданий.

Во многом аналогичная ситуация создается в опытах по рассеянию. Если у нас имеется N_a атомов на квадратный метр фольги, каждый из которых обладает

эффективной площадью мишени πb^2, то вероятность попадания в круг радиусом b составит $N_\alpha \pi b^2$. Нам известно, что если α-частица пройдет от ядра на расстоянии не свыше b, то она отклонится от своего пути на угол больше θ, который связан определенной зависимостью с прицельным расстоянием b. В случае кулоновской силы, например, прицельное расстояние связано с углом рассеяния зависимостью

$$b = r_0/2 \operatorname{tg}(\theta/2), \qquad \text{где } r_0 = kQ_\alpha Q_N/E_\alpha.$$

Тогда вероятность отклонения на угол больше θ запишется в виде

$$N_a(\pi b^2) = N_a r_0^2/(2 \operatorname{tg}(\theta/2))^2.$$

На рис. 32.15 приведен график зависимости этой вероятности от угла θ.

Зависимость вероятности рассеяния α-частицы от ее энергии содержится в приведенном выше соотношении. Эта вероятность пропорциональна r_0^2 и потому обратно пропорциональна квадрату кинетической энергии α-частицы.

Зависимость рассеяния от энергии открывает еще одну возможность проверки справедливости гипотезы, согласно которой рассеяние обусловлено действием силы, которая изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния. То обстоятельство, что такая проверка была проведена, свидетельствует о тщательности исследований, выполненных Резерфордом и его учениками.

Поскольку сила действия ядра на α-частицу зависит от ядерного заряда, в общем плане должно быть ясно, что из опыта по рассеянию можно определить величину этого заряда.

Вероятность рассеяния пропорциональна r_0^2, а r_0 изменяется пропорционально заряду ядра Q_N; таким образом, вероятность рассеяния пропорциональна квадрату ядерного заряда.

Поскольку атом в целом электрически нейтрален, число элементарных зарядов, которые несет на себе ядро, должно быть равно числу электронов, окружающих ядро. Поэтому измерения Чадвика дают число электронов в каждом атоме. Оно оказалось равным «атомному числу», которое было использовано раньше для классификации элементов по их химическим свойствам. Это находится в тесной связи с тем, что химические свойства атома обусловлены его электронной структурой.

Опыты Резерфорда по рассеянию α-частиц позволили установить только верхний предел размера ядер, потому что не наблюдалось никаких отклонений от расчетных значений, выполненных в предположении, что α-частицы не проникают в ядро. В этой связи отнюдь небезынтересно отметить то, что в дальнейшем опыты по рассеянию (а многие из них проводятся и в наше время), особенно по рассеянию весьма сильно энергичных электронов, дали довольно подробные сведения о величине ядер и распределении в них заряда. Такие эксперименты дают даже сведения о величине и распределении зарядов в самих нуклонах (нейтронах и протонах).

32.5. Трудности

Цель. Подготовить учащихся к ознакомлению с квантовой механикой в заключительных двух главах.

Содержание. Модель Резерфорда объясняет многие наблюдаемые факты. Но она не в состоянии объяснить столько же, а, быть может, даже еще больше из-

вестных фактов. Экспериментально атомы устойчивы, а согласно классической электромагнитной теории электроны в атоме Резерфорда должны излучать энергию при обращении вокруг него, причем по мере ее расходования они должны спирально приближаться к центру. В ходе такого процесса должен испускаться свет сплошного спектра, а этого тоже не наблюдается.

Методические указания. Главное в настоящем разделе заключается в том, что многие факты, связанные с атомами, остаются необъясненными и противоречат предсказаниям классической физики, т. е. физики Ньютона, Кулона и Максвелла. Однако с попыткой разрешить эти трудности нужно повременить, пока не будут систематически усвоены очередные две главы.

В предшествующих главах своего высшего развития достигла классическая электромагнитная теория, когда она провозгласила, что заряд, движущийся с ускорением, порождает электромагнитное излучение. Опыты с ускорением электронов и протонов в газоразрядных лампах, по-видимому, свидетельствуют о том, что эти атомные частицы подчиняются законам классической физики (см. раздел 28.1). Если исходить из резерфордовской модели атома, то электроны в атоме должны согласно той же самой классической теории испускать свет с поистине огромной интенсивностью. Электрическая лампа обычного размера (около 100 $см^3$), заполненная водородом, должна испускать несколько сотен ватт лучистой энергии. По тому же самому расчету потребуется не очень много времени (около 10^{-11} с) для выхода нашей «осветительной лампочки» из строя из-за того, что все атомы сократятся в объеме до величины ядра (около 10^{-15} м). Совершенно ясно, что ничего подобного случиться не может. Атомы водорода при обычных температурах никакого света не испускают и, по-видимому, обладают устойчивыми размерами около 10^{-10} м. Чтобы разрешить эти трудности, необходим довольно радикальный пересмотр всей физики.

Классическая физика адекватно объясняет то, что происходит в макроскопическом масштабе, но явно не справляется с объяснением явлений в микромире, развертывающихся в атомных масштабах.

Дополнительные задачи. А. Пулями обстреливается «фольга» толщиной 10^{-1} м и площадью 1 $м^2$. Известно, что в фольге содержится 10^5 «атомов».

а) Каков приблизительный промежуток между центрами «атомов» в нашей «фольге»?

б) Сколько атомных слоев имеется в фольге?

Из 10^6 выстреленных пуль все, кроме 10^4 пуль, не претерпели отклонения от своего пути, тогда как остальные 10^2 пуль рассеялись более или менее равномерно по всем направлениям.

в) Были ли наблюдавшиеся отклонения следствием однократных или же многократных соударений? Почему?

Ответ. а) Объем фольги равен 10^{-1} $м^3$, а объем атома равен 10^{-6} $м^3$. Это есть куб со стороной 10^{-2} м. «Атомы» должны отстоять друг от друга на расстоянии около 10^{-2} м.

б) Поскольку фольга имеет толщину 10^{-1} м, а высота каждого слоя равна 10^{-2} м, в фольге должно уложиться 10 атомных слоев ($10^{-1}/10^{-2}=10$).

в) Вероятность того, что пуля испытает одно соударение, не превосходит $10^2/10^6=10^{-4}$. Вероятность двукратного соударения не должна приблизительно превосходить $10^{-4}\cdot 10^{-4}=10^{-8}$ (в действительности такая вероятность должна составить лишь половину данного значения, но это не имеет значения). Бесспорно,

что наблюдавшиеся отклонения были по большей части следствием однократного соударения с мишенью.

Б. Пули равномерно поражают прицельную площадь в 2 м^2, на которой, как нам известно, есть 10^2 одинаковых мишеней. Из 10^5 пуль только 500 отклонилось. Некоторые из них испытали рассеяние под углом около 180° и отлетели, как оказалось, со скоростью 90 м/с, а исходная скорость у них составляла 100 м/с.

а) Какова эффективная площадь каждой мишени?

б) Если пуля имеет массу 10^{-3} кг, то что можно сказать о массе мишени?

Ответ. а) Эффективная площадь всех мишеней выражается дробью $500/10\,000 = 0{,}5 \cdot 10^{-2}$, характеризующей долю полной площади, т. е. $(0{,}5 \cdot 10^{-2}) \cdot 2$ м$^2 = 10^{-2}$ м^2. Чтобы найти эффективную площадь отдельной мишени, нужно полную эффективную площадь разделить на число всех мишеней: 10^{-2} м$^2/10^2 = 10^{-4}$ м^2.

б) Поскольку пули рикошетируют назад почти со всей своей кинетической энергией, мишени должны быть довольно массивными по сравнению с пулями.

Если потребуется количественный ответ, то его можно отыскать следующим образом. Изменение количества движения пули можно записать в виде

$$mv_2 - mv_1 = 10^{-3} \text{ кг } (-90 \text{ м/с} - 100 \text{ м/с}) = -0{,}19 \text{ кг·м/с}.$$

Упругая отдача со стороны мишени направлена вперед и выражается количеством движения, равным 0,19 кг·м/с.

Теряемая пулей кинетическая энергия равна

$$mv_1^2/2 - mv_2^2/2 = 10^{-3} \text{ кг } (100^2 \text{ м}^2/\text{с}^2 - 90^2 \text{ м}^2/\text{с}^2)/2 = 0{,}95 \text{ Дж}.$$

Если соударение пули с мишенью носит упругий характер, то равное количество энергии приобретет мишень. Если же оно неупругое, то приобретенное мишенью количество энергии будет меньше 0,95 Дж. Поскольку $m_м v_м = 0{,}19$ кг·м/с,

$$m_м v_м^2/2 = m_м^2 v_м^2/2m_м = (0{,}19)^2/2m_м \leqslant 0{,}95.$$

Следовательно,

$$m_м \geqslant (0{,}19)\,(0{,}19)/(2 \cdot 0{,}95) = 0{,}019 \text{ кг}.$$

Если нам неизвестно, что соударения носят упругий характер, то можно сделать вывод только о том, что мишени массивнее пуль не меньше, чем в 19 раз.

В. В одном опыте α-частицы пролетают через камеру Вильсона, заполненную газообразным гелием (ядрами атомов гелия являются α-частицы). Пусть α-частицы летят со скоростью 10^7 м/с. Помните, что потенциал конфигурации, состоящей из двух α-частиц, равен (если расстояние r выражено в метрах) $U = k2 \cdot 2/r = (9 \cdot 10^{-28}/r)$ Дж и что масса α-частицы составляет $6 \cdot 10^{-27}$ кг. Пусть соударение α-частицы носит лобовой характер.

а) Каковы скорости α-частицы и ядра после удара на расстоянии максимального сближения?

б) Какова полная кинетическая энергия в момент такого удара?

в) Чему равно расстояние максимального сближения?

г) Что будет видно в камере Вильсона?

Ответ. а) На расстоянии максимального сближения две скорости одинаковы. Воспользовавшись законом сохранения количества движения, запишем

$$m_\alpha \cdot 10^7 \text{ м/с} = m_\alpha v + m_\alpha v, \text{ т. е. } v = (10^7/2 \text{ м})/\text{с}.$$

б) $E_к = 2(m_\alpha v^2/2) = 6 \cdot 10^{-27}\,(10^7/2)^2 = 1{,}5 \cdot 10^{-13}$ Дж.

в) Полная энергия будет $m_\alpha v_0^2/2 = 6\cdot 10^{-27}(10^7)^2/2 = 3\cdot 10^{-13}$ Дж. Следовательно,

$$1{,}5\cdot 10^{-13}\ \text{Дж} = U = (9\cdot 10^{-28}/r)\ \text{Дж},$$

т. е. $r = 6\cdot 10^{-15}$ м.

г) Трек не испытавшей отклонения α-частицы.

Г. В 1 м^3 газа при нормальных температуре и давлении содержится около $3\cdot 10^{25}$ молекул. Молекулы можно представлять себе в виде небольших твердых шаров с поперечным сечением (πr^2), равным приблизительно 10^{-19} м^2.

а) Как далеко друг от друга находятся молекулы в газе?

б) Какой будет толщина слоя газа площадью 1 м^2, заключающего в себе 10^{19} молекул?

в) Какой путь (приближенно) покрывает молекула между соударениями?

Ответ. а) Объем, занимаемый молекулой, приближенно можно считать равным 1 м^3/($3\cdot 10^{25}$) = $30\cdot 10^{-27}$ м^3. Это есть куб со стороной $3\cdot 10^{-9}$ м, т. е. с гранями площадью по $(3\cdot 10^{-9})^2 \approx 10^{-17}$ м^2.

б) В слое газа толщиной $3\cdot 10^{-9}$ м(!) на одну молекулу приходится в среднем 10^{-17} м^2 площади поверхности. Чтобы на каждые 10^{-17} м^2 площади поверхности приходилось по одной молекуле, толщину слоя надо увеличить в 100 раз, доведя ее до $3\cdot 10^{-7}$ м.

в) Если на 10^{-19} м^2 поверхности приходится одна молекула, то площадь мишени (10^{-19} м^2 на каждую молекулу) равна площади поверхности. Если такой слой прострелить пулей, то приходящееся на нее среднее число соударений составит единицу, так как площадь мишеней равна площади всей поверхности. Отсюда делается вывод, что молекула пролетает между соударениями расстояние, равное $3\cdot 10^{-7}$ м. При более точном подсчете пришлось бы учесть другие эффекты (как пули, так и мишени имеют конечные размеры, а пули и мишени движутся), но это не привело бы к изменению порядка найденной нами величины.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам

В табл. 16 задачи распределены по степени их предположительной трудности и по разделам, к которым они относятся. Отдельно выделены задачи, предназначающиеся для разбора их в классе. Задачи, рекомендуемые для первоочередного решения, отмечены значком #.

ТАБЛИЦА 16

Разделы	Со звездочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
32.1	4, 5	2	1,3		1
32.2, 32.3	6,9—12	7,13,16	8,14	15	
32.4, 32.5	17—19,28	21,23#,27	20,22,25#	24,26	20,25#

Краткие ответы

4*. Большое число частиц, пролетающих сквозь фольгу без отклонений от своего пути, по сравнению с небольшим числом частиц, рассеянных под тем или иным углом, свидетельствует о малой вероятности даже однократного соударения;

таким образом, вероятность того, что α-частица претерпит при прохождении сквозь фольгу двукратное соударение, должна быть много, много меньше.

5*. Атом должен представлять собой по большей части пустое пространство, внутри которого находится что-то такое, что способно воздействовать на α-частицу с большой силой.

6*. Это есть угол между направлением первоначального движения частицы и направлением ее полета после отклонения от своего пути после соударения.

9*. Измерить b непосредственно нельзя, потому что нам неизвестно ни где находятся оба ядра, ни точные траектории налетающих α-частиц.

10*. N_θ пропорционально квадрату прицельного расстояния.

11*. Это есть кулоновское поле, т. е. поле, в котором сила обратно пропорциональна квадрату расстояния.

12*. В интервале углов от 90 до 180°.

17*. Приблизительно в 6 раз.

18*. $r_0 = 7 \cdot 10^{-15}$ м.

19*. Закон сохранения энергии.

28*. По третьему закону Кеплера R^3/T^2 есть величина постоянная, вследствие чего отношение частот равно $\sqrt{8} \approx 2{,}8$.

Ответы с указаниями и решениями

1. Данная задача должна заложить основу под рассмотрение в классе вопроса о том, как по «рассеянию» частиц от невидимой мишени можно судить о некоторых ее свойствах.

а) Гладкая пластинка, прикрывающая всю прицельную площадь, заставит все «пули» отражаться зеркально при условии, что они упруго взаимодействуют с пластинкой. Мы не можем определить точно ни строение пластинки, ни ее толщину. Пожалуй, мы сумели бы узнать о ней больше, если бы стали обстреливать ее пулями различной величины и с разными скоростями. Пули с очень высокими скоростями могут и не отражаться зеркально, а очень маленькие пули, пожалуй, станут прошивать пластинку.

Еще одна возможность создается тогда, когда в мишени размещено несколько пластинок, располагающихся параллельно друг другу, но лежащих в разных плоскостях. Такое устройство годилось бы для пуль с определенным направлением удара пуль, но не для всех направлений. Если направление падения менять, то некоторые пули будут пробивать мишень либо прямо, либо после ряда отражений.

б) Шероховатая пластинка, прикрывающая всю прицельную площадь, приведет к диффузному рассеянию. Пластинку нужно сделать из материала, упруго отражающего пули, а неровности должны располагаться довольно хаотично, с одной стороны, и быть крупнее пуль,— с другой. (Можно подумать и о более сложных устройствах, обеспечивающих диффузность отражения.)

в) Если бо́льшая часть пуль пробивает мишень без заметного изменения направления полета или скорости, то мишень должна представлять собой более или менее пустое пространство. Поскольку какая-то часть пуль застрянет в мишени, небольшая доля последней должна состоять из чего-то такого, что способно задержать или разрушить пули. Несколько комков засохшей грязи или оконной замазки способны задержать пули, если такие комки имеют достаточный поперечник. Сосчитав, сколько пуль прошьет мишень и сколько в ней застрянет, можно определить площадь полного поперечного сечения комков грязи, но не их число или форму. Форму комков грязи можно было бы определить в том случае, если бы у нас имелась возможность вести весьма прицельный «огонь», чего нельзя добиться при бомбардировке атомных мишеней атомными пулями. В нашем примере «комки грязи» следует так или иначе закрепить в мишени, чтобы они выскакивали от отдачи из площади мишени, за чем можно было бы наблюдать визуально, если бы они были видимыми.

г) Достаточно толстая и мягкая стенка должна, разумеется, прикрывать всю прицельную площадь, чтобы задерживать пули. Такой опыт не позволит определить, из чего же сделана такая стенка — из грязи, снега, полузатвердевшей патоки или чего-то еще. Ничего не узнаем мы и о форме или размере стенки.

д) «Зеркало», вогнутое по направлению удара пуль, смогло бы сфокусировать пули. Чтобы собрать все частицы пучка в один фокус, зеркалу нужно придать параболическую форму. Как и в первом из рассмотренных в данной задаче примеров, зеркало нужно сделать из материала, способного упруго отражать пули. В этой связи надо, пожалуй, заметить, что у нас нет возможности поставить такой опыт с бомбардировкой атомных мишеней атомными пулями; в таком опыте мы могли бы наблюдать только перемену направления движения частиц.

2. 200 страниц, т. е. 100 листов, книги имеют полную толщину 0,8 см. Следовательно, каждый лист имеет толщину $8 \cdot 10^{-3}$ см, или $8 \cdot 10^{-5}$ м. Поскольку один листок золотой фольги имеет толщину 10^{-7} м, в стопке таких листков, по высоте равной толщине одного листа книги, уложится 800 листков нашей фольги.

3. а) Объем фольги равен ее площади, умноженной на толщину. Поскольку масса фольги равна объему, умноженному на плотность, получим

$$\text{масса} = \text{объем} \cdot \text{плотность} = \text{площадь} \cdot \text{толщина} \cdot \text{плотность},$$

т. е.

$$\text{толщина} = \frac{\text{масса}}{\text{площадь} \cdot \text{плотность}} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}}{1 \text{ м}^2 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

б) Объем одного «кубика», занимаемого атомом, равен массе атома, деленной на плотность серебра. Следовательно, длина «кубика» равна корню кубическому из найденного объема:

$$\text{длина ребра} = \left(\frac{\text{масса}}{\text{плотность}}\right)^{1/3} = \left(\frac{1{,}8 \cdot 10^{-25} \text{ кг}}{10^4 \text{ кг/м}^3}\right)^{1/3} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

в) Толщина фольги выразится через число атомных «кубиков» следующим образом:

$$(5 \cdot 10^{-7} \text{ м})/(3 \cdot 10^{-10} \text{ м}) = 2 \cdot 10^3.$$

7. Данная задача показывает, что вероятность рассеяния под тем или иным углом зависит только от эффективного поперечного сечения поверхности мишени. А так как все ядра имеют одинаковый радиус, вероятность рассеяния в данном случае зависит только от числа всех ядер, приходящихся на единичное поперечное сечение поверхности мишени, т. е. от ее толщины.

а) Если толщину мишени удвоить, то удвоится число ядер, приходящееся на поперечное сечение поверхности единичной площади, и, следовательно, в том же самом интервале углов рассеяния должно рассеяться вдвое больше α-частиц, т. е. 8 из 10^4.

б) Эта часть задачи позволяет повторить материал о том, почему в опытах по рассеянию α-частиц приходится пользоваться очень тонкой фольгой. В первоначальном опыте на углы, превосходящие 5°, отклонялись каждый 4 α-частицы из 10^4. При столь малой вероятности отклонения преобладают шансы на то, что рассеяние под тем или иным углом, большим 5°, обусловлено однократными соударениями. Следовательно, среднее число соударений, испытываемых α-частицей при прохождении столь тонкой фольги, когда угол рассеяния θ превосходит 5°, равно $4 \cdot 10^{-4}$. Что случиться, если уложить стопкой друг на друга 10^3 листов этой фольги? В таком случае возникает ряд трудностей. Первая из них заключается в том, что α-частицы окажутся не в состоянии прошивать стопку, теряя свою кинетическую энергию при соударениях с электронами в фольге и застревая внутри стопки. Предположим, что при той толщине фольги и той энергии α-частиц, которые выбраны для этого опыта, ничего подобного не происходит и что частицы прошивают стопку без большого изменения своей энергии. Но и в этом случае трудности остаются.

При прохождении стопки из 10^3 листов фольги α-частица испытает, если угол рассеяния превосходит 5°, в среднем 0,4 соударения ($4 \cdot 10^{-4}$ соударений на фольгу $\cdot 10^3$ листов). Это не означает, однако, что 4 α-частицы из каждого их десятка отклонятся от своего пути на углы, превосходящие 5°. Среднее число соударений достаточно большое, чтобы можно было пренебречь вероятностью того, что та

или иная α-частица не претерпит больше одного соударения. Если некоторые α-частицы испытают больше одного соударения, то доля α-частиц, соударяющихся по крайней мере один раз, должна быть уже меньше 4 из 10 (в действительности эта доля равна $1-e^{-0,4}=0,33$). Более того, некоторые частицы, соударяющиеся с ядрами при углах рассеяния, превосходящих 5°, по несколько раз, могут рассеяться в конце концов на углы меньше 5°. По-видимому, это приведет к уменьшению доли частиц, отклонившихся на углы более 5°, до уровня ниже 0,4. Однако нельзя забывать и о тенденции к увеличению числа частиц, отклонившихся на углы больше 5°. Отклонение под углом 5° может быть следствием ряда соударений, каждое из которых приводило к отклонению на углы меньше 5°. Из грубой оценки можно убедиться в том, что такой эффект играет важную роль в нашем примере: частица может отклониться на угол 5° благодаря двум соударениям, при каждом из которых она отклонялась на угол 2,5°. Вероятность подобного события значительна. Для малых углов N_θ пропорционально $1/\theta^2$, таким образом, среднее число соударений, приводящих к отклонениям на углы больше 2,5°, равно $4\cdot 0,4=1,6$. Если среднее число таких соударений равно 1,6, то вероятность двух или нескольких подобных столкновений должна быть ощутимой (фактическая вероятность равна $1-e^{-1,6}-1,6e^{-1,6}=0,48$). По-видимому, ясно, что в нашем опыте многократные соударения дают такой же и даже, быть может, больший вклад в общее число отклонений, нежели однократные соударения. Вот почему в опытах

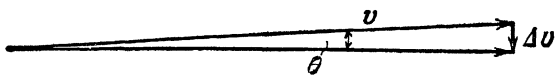


Рис. 84.

по рассеянию обычно пользуются очень тонкой фольгой: когда фольга имеет незначительную толщину, многократными соударениями можно пренебречь.

8. а) В данном случае скорости связаны друг с другом так, как это показано на рис. 84. Поскольку угол θ очень мал, его значение в радианах можно выразить просто отношением $\Delta v/v$; таким образом,

$$\Delta v=(1,6\cdot 10^7\ \text{м/с})\cdot(5\cdot 10^{-2})=8\cdot 10^5\ \text{м/с}.$$

б) Из раздела 32.1 нам известно, что атомы золота имеют диаметр $2,5\cdot 10^{-10}$ м. Следовательно,

$$\Delta t=(2,5\cdot 10^{-10}\ \text{м})/(1,6\cdot 10^7\ \text{м/с})\approx 1,6\cdot 10^{-17}\ \text{с}.$$

в) $a=\Delta v/\Delta t=(8\cdot 10^5\ \text{м/с})/(1,6\cdot 10^{-17}\ \text{с})=5\cdot 10^{22}\ \text{м/с}^2$ перпендикулярно к начальной скорости. Ускорение такой величины может создать только чрезвычайно большое усилие по сравнению с силами, с которыми мы можем оказать воздействие на α-частицу в лабораторных условиях. Несмотря на сделанные нами при решении данной задачи допущения, все-таки получается, что даже для рассеяния под небольшими углами α-частица должна очень сильно приблизиться к заряженному ядру.

13. Как видно из условия задачи, конус прикрывает собой круг радиусом 2 см. Стальные шарики распределяются равномерно по всей площади, а поскольку площадь круга пропорциональна квадрату его радиуса, число шариков; ударяющихся о конус и рассеивающихся до того, как они достигнут отверстия, найдется в виде

$$(2\ \text{см})^2\cdot 1000/(5\ \text{см})^2=160.$$

14. а) Шарики, которые ударяются о площадку в центре конуса, отскакивают назад, а шарики, которые попадают на наклонную поверхность конуса, рассеиваются вбок. Как видно из условия задачи, площадка имеет форму круга радиусом 1 см, а наклонная поверхность имеет в основании кольцо с наружным диаметром 2 см. Следовательно, число шариков, отскочивших назад, составит

$$(1\ \text{см})^2\cdot 1000/(5\ \text{см})^2=40.$$

Число же шариков, рассеявшихся вбок, найдем аналогично:

$$[(2\text{ см})^2-(1\text{ см})^2]\cdot 1000/(5\text{ см})^2=120.$$

б) График изменения угла рассеяния θ в зависимости от прицельного расстояния b, отсчитанного от центра отверстия, приведен на рис. 85, *а*.

в) График изменения числа шариков N_θ, которые рассеялись под углами больше θ, в зависимости от угла θ приведен на рис. 85, *б*.

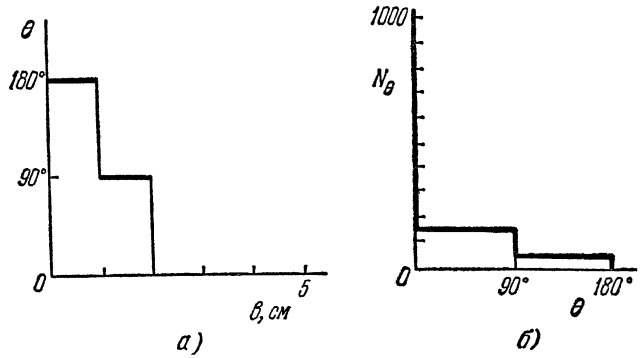


Рис. 85.

15. а) Когда частица достигнет сферы, ее количество движения внезапно изменится. Сделаем два следующих допущения: 1) частица соударяется со сферой упруго, потому что сила не только обрывается (т. е. действует почти мгновенно), но и остается одинаковой и когда частица подлетает к сфере и когда она отлетает от нее; 2) масса частицы весьма мала по сравнению с массой сферической мишени. Последнее допущение предполагает, что при соударении сферической мишени передается пренебрежимо малое количество кинетической энергии. Следовательно, первое допущение требует, чтобы кинетическая энергия частицы после соударения оставалась (почти) такой же, как и до соударения. Таким образом, количество

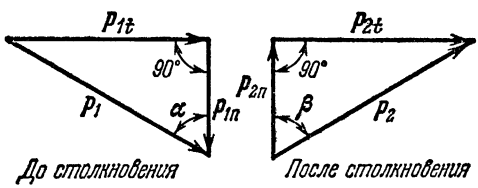


Рис. 86.

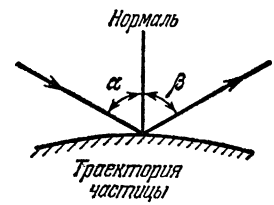


Рис. 87.

движения частицы остается *по величине* после соударения таким же, как и до соударения: $p_1=p_2$.

Первое допущение требует также, чтобы сила действия на частицу зависела только от положения последней относительно сферы. В частности, *направление* действия силы должно зависеть только от положения, но не от скорости частицы (трение отсутствует). В силу симметрии сила должна иметь направление по нормали к поверхности сферической мишени. Следовательно, касательная составляющая количества движения частицы при соударении не должна меняться: $p_{1t}=p_{2t}$.

Построим теперь треугольник, характеризующий количество движения частицы, вместе с его нормальной и касательной составляющими до соударения. Построим и соответствующий треугольник для ситуации после соударения (рис. 86). Поскольку $p_1=p_2$ и $p_{1t}=p_{2t}$, два прямоугольных треугольника равны между собой (один есть зеркальное отражение другого). Следовательно, $\alpha=\beta$ (рис. 87).

Изобразим теперь поперечное сечение сферы плоскостью, проходящей через ее центр и прямолинейную траекторию падающей частицы (рис. 88). Здесь C — центр сферы, b — прицельное расстояние, θ — угол рассеяния, равный $180°-2\alpha$, т. е. $\theta/2=90°-\alpha=\gamma$. Можно построить несколько траекторий для разных

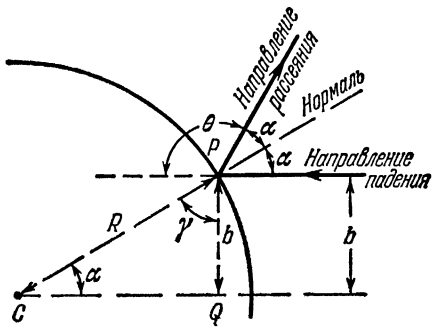


Рис. 88.

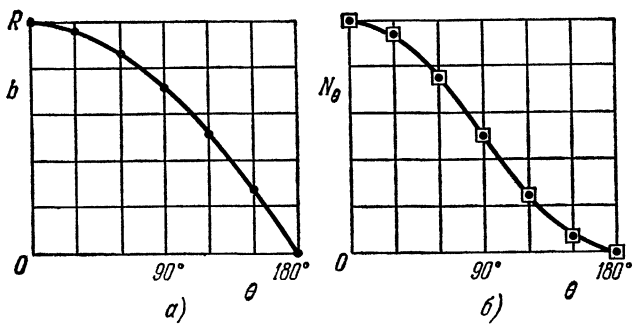


Рис. 89.

значений угла α и измерить соответствующее прицельное расстояние. Другая возможность состоит в том, чтобы определить отношение b/R по таблице косинусов. Из треугольника CPQ следует, что

$$b/R=\cos\gamma=\cos(\theta/2).$$

Найденные значения b/R, приведены во второй колонке табл. 17 и использованы

ТАБЛИЦА 17

$\theta°$	b/R	$(b/R)^2$	$\theta°$	b/R	$(b/R)^2$
9	1,000	1,000	120	0,500	0,250
30	0,966	0,933	150	0,259	0,067
60	0,866	0,750	180	0,000	0,000
90	0,707	0,500			

при построении графика изменения прицельного расстояния b в зависимости от угла рассеяния θ (рис. 89, $а$).

б) Когда на единичную площадь пучка приходится n мишеней, вероятность рассеяния под углом, превосходящим θ, выражается произведением $n\pi b^2$. Поэтому число рассеивающих соударений N_θ при угле рассеяния, превосходящем θ, пропорционально b^2, т. е. $(b/R)^2$. Вычисленные значения квадрата этого отношения приведены в третьей колонке табл. 17 и были использованы для построения графика изменения числа N_θ в зависимости от θ (рис. 89, *б*). На этом графике нанесены также точки, взятые с рис. 32.16. Эти точки хорошо укладываются на полученную нами кривую, если их умножить на какой-то коэффициент, выбранный таким образом, чтобы обеспечить соответствие при том или ином значении угла рассеяния, скажем при $\theta=0°$.

в) Ответ на вопрос п. а) задачи нами был найден безотносительно к энергии. Рассеяние не зависит от энергии, пока остаются в силе сделанные нами допущения.

16. Поскольку график рис. 32.15 построен в небольшом масштабе, ответить на поставленный вопрос можно только приближенно: отношение $15°/22{,}5°= =1{,}2/0{,}6=2$.

20. В этой задаче раскрывается связь между угловым распределением рассеянных частиц и атомным номером рассеивающего ядра. Обратите внимание на то, что экспериментальные условия, изложенные в задаче (одинаковые счетчики, одинаковая геометрия, одинаковые числа атомов на пути пучка и т. д.), обеспечивают то, что неодинаковость экспериментальных результатов может быть следствием только неодинаковости ядер в материале мишени.

а) Графики зависимости, построенные по экспериментальным результатам (здесь они не приводятся), выявляют одинаковую угловую зависимость для всех мишеней. Чтобы составить количественную оценку, проще провести численное сопоставление скоростей счета.

б) Вероятность рассеяния в пределах одинаковой ширины его углов должна быть пропорциональной квадрату заряда ядра (см. раздел 32.4). Нами были вычислены отношения чисел сосчитанных частиц для мишеней 2 и 3 к их числу для мишени 1. Результаты этого расчета приведены в табл. 18. Обратите внимание на

ТАБЛИЦА 18

$\theta°$	Мишень 2: мишень 1	Мишень 3: мишень 1
30	12,9	36,8
60	12,9	36,9
90	12,9	36,8
120	12,9	36,5
150	13,4	38,0
	Среднее 13,0	Среднее 37,0

то, что значения этих отношений получились одинаковыми для всех углов, как этого и следовало ожидать из теории. Поскольку отношения чисел сосчитанных частиц должны быть равны квадратам отношений ядерных зарядов, запишем

$$(q_2/q_1)^2=13{,}0, \quad q_2/q_1=3{,}60;$$
$$(q_3/q_1)^2=37{,}0, \quad q_3/q_1=6{,}08.$$

Предположив, что ядерный заряд атомов алюминия равен 13 элем. зар., найдем

$$q_2=q_1\cdot 3{,}60=13\cdot 3{,}60=46{,}8 \text{ элем. зар.};$$
$$q_3=q_1\cdot 6{,}08=13\cdot 6{,}08=79{,}0 \text{ элем. зар.}$$

Вероятно, мишень 2 была из серебра ($Z=47$), мишень 3 из золота ($Z=79$). Точность

приведенных нами экспериментальных данных не столь высока, чтобы гарантировать правильность наших выводов, но ошибка в определении атомного номера явно не должна быть больше единицы. В действительности приведенные нами данные представляют собой результаты экспериментов с алюминием, серебром и золотом.

21. Данная задача иллюстрирует огромную величину электрических сил по сравнению с силами гравитационного протяжения.

а) При любом расстоянии между α-частицей и ядром атома золота действующая между ними сила взаимного тяготения много меньше кулоновской силы. Количественное сопоставление этих двух сил проводится в п. б) задачи.

б) По закону Кулона электрическая сила, действующая между двумя заряженными телами, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, т. е. $F_e = kq_1q_2/r^2$, тогда как гравитационная сила по закону Ньютона равна $F_g = Gm_1m_2/r^2$. Отношение F_e/F_g при *любом* заданном расстоянии выражается в виде

$$F_e/F_g = kq_1q_2/Gm_1m_2.$$

Подставив в это выражение соответствующие значения для золота и гелия, получим, что при любом заданном расстоянии

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{[2{,}3\cdot 10^{-28}\ \text{Н}\cdot\text{м}^2/(\text{элем. зар.})^2]\cdot(79\ \text{элем. зар.})\cdot(2\ \text{элем. зар.})}{(6{,}7\cdot 10^{-11}\ \text{Н}\cdot\text{м}^2/\text{кг}^2)\cdot(3{,}3\cdot 10^{-25}\ \text{кг})\cdot(6{,}6\cdot 10^{-27}\ \text{кг})} = 2{,}5\cdot 10^{35}.$$

22. а) и б) Потенциальная энергия при минимальном расстоянии r_0 будет $U = kq_1q_2/r_0$. В случае лобового соударения (прицельное расстояние равно нулю) α-частицы остановятся на расстоянии максимального сближения r_0 от ядра атома золота, при котором $U(r_0)$ будет равна исходной кинетической энергии системы. Разрешив приведенное выражение относительно r_0, получим

$$r_0 = \frac{kq_1q_2}{E_к} = \frac{[2{,}3\cdot 10^{-28}\ \text{Н}\cdot\text{м}^2/(\text{элем. зар.})^2]\cdot(79\ \text{элем. зар.})\cdot(2\ \text{элем. зар.})}{10^{-12}\ \text{Дж}} =$$

$$= 3{,}6\cdot 10^{-14}\ \text{м}.$$

в) В случае протона $q_2 = 1$ элем. зар.; следовательно, r_0 равно половине значения, найденного выше, т. е. $1{,}8\cdot 10^{-14}$ м.

Поскольку нейтрон не несет на себе никакого заряда, кулоновский барьер не оказывает на него отталкивающего действия, так что нейтрон при любой энергии способен сблизиться с ядром до любого расстояния. В действительности же существуют близкодействующие ядерные силы, которые начинают играть важную роль, когда расстояние между ними становится величиной порядка ядерного радиуса. Эти силы действуют и на заряженные частицы, если те бомбардируют ядро с такой энергией, которой достаточно для преодоления кулоновского поля.

23. Эта простая задача показывает, что расстояние наибольшего сближения (в случае кулоновского рассеяния) зависит только от кинетической энергии и зарядов бомбардирующих частиц и рассеивающего ядра. По аналогии с рассуждениями, проводившимися на стр. 182, расстояние наибольшего сближения r_0 определяется той точкой, в которой бомбардирующая частица вынуждена остановиться при лобовом подлете к ядру. В этой точке потенциальная энергия частицы равна ее исходной кинетической энергии; таким образом,

$$kq_1q_2/r_0 = E_к.$$

Поскольку обе частицы — протон и дейтрон — обладают одинаковым зарядом и одинаковой кинетической энергией, расстояние наибольшего сближения в этих двух случаях должно быть одинаковым.

Эту задачу можно расширить, попросив учащихся рассмотреть случай, когда две частицы обладают одинаковой скоростью, а не одинаковой кинетической энергией. В таком случае кинетическая энергия дейтрона $mv^2/2$ (он в два раза массивнее протона) равна удвоенной кинетической энергии протона, так что расстояние наибольшего сближения должно быть в случае дейтрона в два раза меньше, чем для протона.

24. а) Найдем скорость электрона v_e' и скорость α-частицы v_α' после соударения, воспользовавшись законами сохранения энергии и количества движения. Как известно (из части III курса),

$$v_e' = \frac{2m_\alpha}{m_\alpha + m_e} v_\alpha, \quad v_\alpha' = \frac{m_\alpha - m_e}{m_\alpha + m_e} v_\alpha.$$

Поскольку масса α-частицы m_α гораздо больше массы электрона m_e, расчет показывает, что скорость α-частицы после соударения станет лишь немного меньше ее скорости до соударения, как этого и следовало ожидать. Приобретенная же электроном скорость выражается с достаточной степенью точности следующим образом:

$$v_e = 2v_\alpha.$$

Простота этого соотношения может побудить некоторых учащихся к поискам более наглядного объяснения. Приведем одно такое объяснение. Предположим, что наблюдатель движется вместе с α-частицей с той же скоростью v_α и в том же направлении, скажем, на север. Что он видит? Сначала α-частица находится по отношению к нашему наблюдателю в покое. Когда же электрон ударится в лоб о неподвижную и гораздо более массивную α-частицу, он отразится обратно, на север, почти с той же самой скоростью v_α. А как будет двигаться после соударения тот же электрон относительно наблюдателя в лаборатории? Электрон движется на север со скоростью v_α относительно движущегося наблюдателя, который в свою очередь движется в том же направлении и с той же скоростью. Значит, скорость электрона относительно лаборатории должна составить $2v_\alpha$.

Чтобы найти кинетическую энергию, потерянную α-частицей, вычислим кинетическую энергию, приобретенную электроном:

$$E_e = m_e (v_e')^2/2 = (m_e/m_\alpha)\, m_\alpha (2v_\alpha)^2/2 = (4m_e/m_\alpha)(m_\alpha v_\alpha)^2/2 = (4m_e/m_\alpha)\, E_\alpha =$$
$$= (4/7200)\, E_\alpha = E_\alpha/1800.$$

Энергия, утраченная α-частицей, равна по закону сохранения энергии тому ее количеству, которое приобрел электрон.

б) Чтобы α-частица потеряла 1/100 своей энергии, нужны 18 лобовых соударений. Интересно отметить, что 1% приблизительно равен энергии, теряемой α-частицей из полониевого источника при прохождении ею золотой фольги толщиной 10^{-7} м, что эквивалентно 400 атомам. Энергия ею теряется в подобном случае благодаря соударениям с атомными электронами. Не все соударения относятся к лобовым, так что фактическое число соударений должно быть в действительности больше вычисленного здесь нами числа.

25. При соударении α-частицы с тяжелым ядром она передает ему лишь небольшую долю своей исходной кинетической энергии. Чтобы определить фактическое количество передаваемой таким образом энергии, распространим законы сохранения количества движения и энергии на такое взаимодействие.

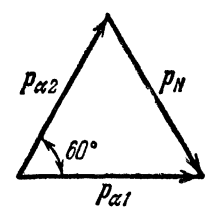


Рис. 90.

а) Полное количество движения в нашей системе, состоящей из α-частицы и ядра, не изменяется. Поскольку ядро находилось сначала в покое, количество движения системы в начальный момент состояло из количества движения α-частицы $p_{\alpha 1}$. После соударения α-частица обладает количеством движения $p_{\alpha 2}$, а ядро— количеством движения p_N. Векторная сумма этих двух конечных количеств движения должна быть равна начальному количеству движения:

$$p_{\alpha_2} + p_N = p_{\alpha_1}.$$

Построим векторный треугольник, показывающий, что сложение векторов $p_{\alpha 2}$ и p_N дает вектор $p_{\alpha 1}$ (рис. 90). Нам известен угол между векторами $p_{\alpha 2}$ и $p_{\alpha 1}$: он просто равен углу рассеяния, соответствующему 60° в нашем примере.

Если предположить, что конечная кинетическая энергия α-частицы почти равна начальной кинетической энергии, то величина конечного количества движения α-частицы $p_{\alpha 2}$ должна быть почти равна величине начального движения $p_{\alpha 1}$. При этом предположении треугольник становится почти равнобедренным, так что $p_N \approx p_{\alpha 1}$. Найдем теперь численный ответ:

$$p_{\alpha 1} = m_\alpha v_{\alpha 1} = (6{,}62 \cdot 10^{-27} \text{ кг}) \cdot (10^7 \text{ м/с}) = 6{,}6 \cdot 10^{-20} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

Несколько меньше этого будет количество движения p_N, переданное атому золота.

б) Вычислим скорость ядра по количеству его движения. Из приближенного равенства $m_N v_N \approx m_\alpha v_{\alpha 1}$ находим

$$v_N = (m_\alpha / m_N)\, v_{\alpha 1} = (4 \text{ а. е. м.}/197 \text{ а. е. м.})\, v_{\alpha 1} = 0{,}02 \cdot 10^7 = 2 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

Как уже отмечалось, фактическая скорость должна быть немного меньше. Вектор скорости v_N имеет то же самое направление, что и вектор p_N, показанный на рис. 90.

в) Теперь можно вычислить и кинетическую энергию E_N, приобретенную ядром:

$$E_N = m_N v_N^2/2 = m_N [(m_\alpha/m_N)\, v_{\alpha 1}]^2/2 =$$

$$= (m_\alpha/m_N)\,(m_\alpha v_{\alpha 1}^2/2) = (m_\alpha/m_N)\, E_{\alpha 1} = 0{,}02 E_{\alpha 1}.$$

По закону сохранения количества энергии конечная кинетическая энергия α-частицы будет

$$E_{\alpha 2} = E_{\alpha 1} - E_N = E_{\alpha 1}\,(1 - 0{,}02) = 0{,}98 E_{\alpha 1}.$$

г) Теперь можно проверить точность нашего приближения:

$$p_{\alpha 1}/p_{\alpha 2} = v_{\alpha 2}/v_{\alpha 1} = \sqrt{E_{\alpha 2}/E_{\alpha 1}} = \sqrt{0{,}98} = 0{,}99.$$

Наши ответы на вопросы пп. а) — в) в настоящей задаче верны с точностью около 1%. И хотя эта потеря энергии незначительна, она довольно велика по сравнению с энергией, теряемой при соударении с электроном (см. задачу 24). Почему же мы тогда утверждаем, что потеря энергии α-частицей при прохождении ею вещества объясняется главным образом соударением с электронами? Довольно

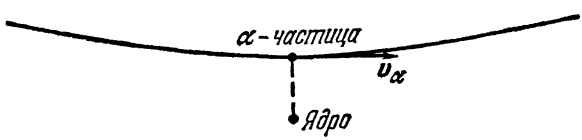


Рис. 91.

явный ответ гласит, что соударения с ядрами происходят крайне редко. Предположим, что α-частица из полониевого источника прошивает золотую фольгу толщиной 10^7 м. Вероятность соударения, при котором она отклонится на угол больше 60°, составляет при этом всего лишь 1/50 000.

26 а) Закон сохранения энергии требует, чтобы сумма кинетической и потенциальной энергий оставалась постоянной:

$$mv^2/2 + kq_\alpha q_N/r = E.$$

Когда α-частица находится далеко от ядра и движется со скоростью v_0, радиус r столь велик, что потенциальной энергией можно пренебречь и считать, что полная энергия будет

$$E = mv_0^2/2 = (6{,}62 \cdot 10^{-27}) \cdot 10^7/2 = 3{,}31 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.$$

Если $r=1{,}65\cdot10^{-13}$ м, то потенциальная энергия составит

$$k\frac{q_\alpha q_N}{r}=[2{,}31\cdot10^{-28}\text{ Дж}\cdot\text{м}/(\text{элем. зар.})^2]\frac{(2\text{ элем. зар.})\cdot(79\text{ элем. зар.})}{1{,}65\cdot10^{-13}\text{ м}}=$$

$$=2{,}21\cdot10^{-13}\text{ Дж}.$$

Отсюда кинетическая энергия на расстоянии максимального сближения будет

$$E_к=mv^2/2=(3{,}31-2{,}21)\cdot10^{-13}\text{ Дж}=1{,}1\cdot10^{-13}\text{ Дж}.$$

Таким образом,

$$v=\sqrt{2E_к/m}=\sqrt{2(1{,}1\cdot10^{-13})/(6{,}62\cdot10^{-27})}=5{,}8\cdot10^6\text{ м/с}.$$

б) На расстоянии максимального сближения составляющая скорости по направлению к ядру равна нулю (рис. 91).

27. а) Средняя сила взаимодействия между электроном и протоном будет

$$F=kq_1q_2/r^2=(2{,}3\cdot10^{-28})\cdot(1\cdot1)/(5\cdot10^{-11})^2=9\cdot10^{-8}\approx10^{-7}\text{ Н}.$$

б) Пластины установки в опыте Милликена воздействовали с силой около 10^{-14} Н на всякий элементарный заряд, когда три 90-вольтовых батареи были соединены последовательно с ними. Чтобы увеличить силу до 10^{-7} Н, нам понадобилось бы в 10^7 раз больше 90-вольтовых батарей.

Ясно, что ионизация в газе имеет иной механизм, потому что ионизация начинается задолго до создания столь высокого напряжения. Более эффективный процесс предполагает использование соударений с заряженными частицами, когда необходимое электрическое поле создается близко находящимся ($\sim10^{-10}$ м) единственным элементарным зарядом, а не огромным их множеством, находящимся на гораздо большем удалении ($\sim10^{-3}$ м).

ГЛАВА

33 ФОТОНЫ И ВОЛНЫ ВЕЩЕСТВА

Глава 33 знакомит учащихся с двумя фундаментальными фактами, которые важны для дальнейшего понимания строения атомов и вещества: 1) свет обнаруживает одновременно и волновые и корпускулярные свойства; 2) частицы вещества обнаруживают и волновые и корпускулярные свойства.

Краткое содержание главы 33

Разделы 33.1—33.3. В разделе 33.1 описан опыт с пучком света, направленным на взвешенные масляные капли. Тот способ, каким электрические заряды выбиваются из капель, заставляет предполагать, что свет состоит скорее всего из частиц. Но если свет падает в виде частиц, то как понять явления интерференции и дифракции, которые столь типичны для волн. Ответ состоит в том, что свет, представляя собой хаотичный пучок летящих частиц, создает по мере прибытия все большего числа таких частиц картину, определяемую волновой природой света.

Излагаются некоторые опыты, связанные с вероятностью, которые показывают, как накопление случайных событий приводит к созданию правильной картины. Наконец, описан классический опыт Тэйлора. Этот опыт показывает, что отдельные частицы света, т. е. фотоны, обнаруживают волновое поведение, хотя по близости нет других фотонов, с которыми они могли бы «интерферировать».

Разделы 33.4—33.7. В этих разделах говорится дальше о свойствах фотонов. Описывается фотоэлектрический эффект. Далее показывается, что каждый фотон заданной длины волны несет определенную энергию, пропорциональную частоте связанной с фотоном волны ν, которая равна $h\nu$, где h есть постоянная Планка. Описывается эффект Комптона. Фотон ударяет об электрон и отлетает после соударения с меньшей частотой. Анализ этого процесса показывает, что каждый фотон заданной длины волны несет на себе еще и определенное количество движения (импульс), равное $h\nu/c$, или h/λ. Связь между энергией и количеством движения для фотона иная, чем для медленной частицы. Показывается, что наши представления о фотонах совместимы с нашими понятиями об электромагнитных волнах.

Разделы 33.8—33.11. Поскольку в предшествующих разделах было показано, что свет обладает и волновыми и корпускулярными свойствами, в заключительных разделах главы уже излагается гипотеза де Бройля. По представлениям де Бройля частицы вещества могут при определенных условиях обладать волновыми свойствами, причем частице следует приписать длину волны, равную h/p. Эта умозрительная догадка получила подтверждение на целом ряде изящных экспериментов, которые здесь описываются. Пучки электронов, нейтронов и атомов гелия создают интерференционные картины при отражении или прохождении через правильные решетки атомов или иных препятствий. Волновая природа части-

цы приобретает важность тогда, когда частица движется среди предметов или ударяется о предметы,промежутки между которыми и их величина сравнимы с длиной волны частицы. При этих обстоятельствах законы ньютоновской механики, которые успешно применялись для решения задач, связанных с крупными частицами, явно не годятся. Это делает необходимым выработку новых законов, позволяющих характеризовать волноподобное поведение очень маленьких частиц. Эта новая механика называется волновой или квантовой. Волновая механика отождествляется с ньютоновской, когда длина волны много короче других расстояний, фигурирующих в задаче.

Глава заканчивается рассмотрением примеров сходства и различия волнокорпускулярной природы света и вещества.

План изучения главы 33

В табл. 19 приводятся возможные варианты плана прохождения этой главы, согласующиеся с общим планом, по которому должна проходиться вся часть IV

ТАБЛИЦА 19

Глава 33	10-недельный план изучения части IV			15-недельный план изучения части IV		
Разделы	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты
33.1,[33.2, 33.3]	1	0	—	2	0	—
33.4—33.7	2	1	IV. 14	3	1	IV. 14
33.8,33.9,[33.10,33.11]	2	0	—	3	0	—

курса (см. табл. 1 на стр. 284). Разделы, на которых не целесообразно задерживаться или которые допускают сокращенное прохождение, заключены в квадратные скобки.

Дополнительные материалы к главе 33

Лаборатория. Опыт IV.14 (*Неупорядоченность радиоактивного распада*) подлежит постановке при проработке настоящей главы. Рекомендации в отношении того, как проводить данный опыт, приведены на стр. 515.

Домашние, классные и лабораторные задания. Ознакомьтесь с ответами, решениями и таблицей, которая классифицирует задачи по степени их предположительной трудности, на стр. 462.

33.1. Зернистость света

Цель. Описать некоторые экспериментальные наблюдения, не легко поддающиеся пониманию с позиции волновой теории, и подвести фундамент под необходимость возврата к корпускулярной теории.

Содержание. Пучок рентгеновских лучей выбивает электроны из мельчайших частиц вещества. Как и следовало ожидать, среднее число выбиваемых электронов пропорционально интенсивности излучения, но отдельные события развертываются во времени хаотично, что находится в полном противоречии с предска-

заниями, которые вытекают из волновой модели. Однако это можно объяснить, предположив, что пучок рентгеновских лучей представляет собой поток *частиц*. Таким путем учащиеся знакомятся с одним из самых загадочных наблюдений современной физики: в некоторых ситуациях свет ведет себя подобно корпускулам, хотя, как нам это уже известно, в других случаях он ведет себя как волна.

Методические указания. В настоящем разделе впервые приводятся общие доводы в пользу квантовой природы света. Их нужно обстоятельно разобрать.

Учащиеся, знакомые с опытом Милликена с масляными каплями, не должны встретить трудностей с уяснением описанного в данном разделе опыта. Однако его истолкование нельзя считать самоочевидным. Главная трудность здесь заключается в том, что масляные капли теряют электроны под действием рентгеновских лучей, ведущих себя подобно волнам. Не плохо рассчитать такой процесс хотя бы самым упрощенным способом. Разумно предположить, что для выбивания электрона с любой капли требуется одинаковое количество энергии. Пучок электромагнитного излучения, ведущий себя подобно волне, сообщает ежесекундно каждой капле одинаковое количество энергии (P Дж/с). Следовательно, чтобы убрать один электрон из капли, нужна определенная энергия (E Дж), для чего веществу приходится поглощать излучение в течение промежутка времени, равного E/P с. Этот промежуток времени должен быть приблизительно одинаков для всех капель. В качестве примера вычислим время, требующееся волновому возмущению от электрической лампочки на 100 Вт для того, чтобы вырвать электрон из атома, отстоящего от источника освещения на расстоянии 1 м. Предположим, что для отрыва электрона от атома требуется $2 \cdot 10^{-19}$ Дж энергии и что атом имеет радиус 10^{-10} м. Представим себе сферу радиусом 1 м с центром в нашей лампочке. Площадь поверхности этой сферы, через которую распространяется свет, равна $4\pi r^2 = 4\pi$ м^2. Атом занимает лишь крохотную часть этой площади, равную приблизительно $2{,}5 \cdot 10^{-21}$. Следовательно, на его долю лучистой энергии приходится 100 Вт$\cdot(2{,}5 \cdot 10^{-21}) = 2{,}5 \cdot 10^{-19}$ Дж/с. Таким образом, атому для поглощения того количества энергии, которое ему необходимо для испускания электрона, потребуется время, равное $(2 \cdot 10^{-19})$ Дж/$(2{,}5 \cdot 10^{-19}$ Дж/с), т. е. 0,8 с. Проведя такой расчет, можно отметить, что при аналогичных условиях наблюдается отрыв электронов за время, равное 10^{-8} с (см. подпись к рис. 33.2).

В качестве весьма уместной иллюстрации данного явления можно сослаться на поджаривание кукурузных зерен. Если их насыпать на горячую сковородку и начать встряхивать, то первые несколько минут ничего не произойдет, но затем на сковородке подпрыгнет сначала одно зерно, а потом начнут подскакивать сразу все зерна. Они начнут подскакивать не строго в одно и то же время из-за разной скорости теплоподвода к ним, но во всяком случае вам придется выждать то или иное время до первого подскока. Вас не мало удивит, если какое-то зерно подскочит сразу же, как только вы начнете насыпать зерна на сковородку! Однако этого не случится, потому что подпрыгивание зерен кукурузы представляет собой многоквантовый процесс. Не меньшее удивление способен вызвать фотоэлектрический процесс, если пучок рентгеновских лучей рассматривать как волну.

Фотонная модель света, к которой приходится теперь обращаться, чтобы понять это удивительное явление, предполагает такие же рассуждения, что и при объяснении рассеяния в разделах 32.1—32.4. Частота событий, а также и то, что они происходят хаотично во времени и очень вскоре после начала — все это на-

ходит такое же объяснение, как и в предшествующем случае, хотя теперь у нас имеется падающая «частица» (фотон), поглощаемая атомом, что приводит к освобождению электрона. (Разумеется, сам процесс выбивания электрона носит гораздо более сложный характер, чем простое рассеяние.)

Фотоэлектрический эффект подробнее рассматривается в разделе 33.4. Обсуждение деталей этого процесса отложите до проработки этого раздела. Не завязните в тонкостях анализа того, что именно предсказывает классическая модель, потому что бо́льшая часть точного объяснения выходит за рамки того, что положено знать даже самому успевающему классу. В свете приводимых в разделах 33.4 и 33.5 новых данных о недостаточности классической волновой теории учащиеся сами придут к выводу о необходимости новой теории.

На стр. 189 высказывается предположение, чтобы учащиеся сами выяснили, почему *магнитное* поле не играет никакой роли при выбивании электрона. Строить рассуждения при этом вычислении можно было бы следующим образом. В плоской электромагнитной волне E и B связаны соотношением $B=E/c$ (см. стр. 158). Электрическое поле действует на электрон, движущийся со скоростью v, с силой $F_E=E$. Магнитное же поле действует на такой электрон с силой $F_B=Bv=(E/c)\,v=E_Ev/c$. Следовательно, сила F_B в v/c раз меньше F_E. Скорости движения электронов в атомах много меньше c, так что магнитное поле сообразно этому по своей эффективности во многом уступает электрическому полю.

33.2. Упорядоченность в случайности

Ц е л ь. Показать, как отдельные случайные события, когда наблюдения ведутся за достаточно большим множеством таких событий, выливаются в правильную и поддающуюся предсказанию закономерность. В обоснование этого подчеркивается, что нам надлежит уяснить, почему фотоны, взятые по отдельности, ведут себя случайным образом, но при изучении их многочисленной совокупности, по-видимому, подчиняются регулярным схемам (интерференция, дифракция), подсказываемым волновой теорией.

С о д е р ж а н и е. Изложен опыт, иллюстрирующий статистическое поведение последовательности случайных событий. Вместо отдельных зерен света предлагается взять набор помеченных карточек. При отдельной попытке нельзя предсказать, какая карточка будет вытащена. Но после многократных подобных попыток выявляется правильная картина среднего числа выемки карточек того или иного класса, которую можно предсказать по исходному распределению численности карточек того или иного класса в исходной колоде.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Общее представление о вероятности играет важную роль в деле обстоятельного понимания интерференционных картин, образуемых фотонами, но им можно пожертвовать, если вы испытываете большой недостаток времени. Вероятность привлекательна сама по себе, но не забывайте об опасности погрязнуть в ней.

Наглядность описанного в Учебнике опыта делает его заслуживающим самостоятельного проведения. Если решено провести его, то учащиеся могут взять набор из трех карточек, обозначенных буквой L, одной, обозначенной буквой C, и шести, обозначенных буквой R. Все учащиеся должны вытаскивать карточки, записывать результаты, перетасовывать карточки, снова вытаскивать и т. д., на что уйдет около 10 мин. Затем все результаты можно свести в единую таблицу.

В результатах отдельных учащихся выявятся случайные флуктуации, типичные в подобных случаях, но данные для всего класса в целом должны дать картину, более близкую к среднему значению 3 : 1 : 6.

Вряд ли вам захочется тратить много времени на проведение такого эксперимента, тем более, что для получения близких к действительной пропорции результатов потребуется очень много испытаний — гораздо больше, чем у вас найдется для этого времени. Но как только выявится главная тенденция, просто скажите учащимся, что они уже знакомы с подобной ситуацией. Все они прибегают к жеребьевке с помощью подбрасываемой монеты, когда нужно остановить выбор на одном из двух возможных вариантов, считая при этом подобную жеребьевку справедливой. Если монетку подбрасывать много раз, то герб выпадает примерно столько же раз, что и решка.

33.3. Зернистость и интерференция света

Цель. Установить, дадут ли отдельные фотоны такую же интерференционную картину, что и сильный свет.

Содержание. Наши познания об интерференционных явлениях были приобретены с помощью пучков света, которые заключали в себе множество фотонов, одновременно проходивших через прибор или опытную установку. Представляет ли собой интерференция следствие взаимодействия фотонов друг с другом или же это есть свойство отдельных фотонов? Ответ на этот вопрос дает излагаемый в данном разделе опыт Тэйлора, в котором он фотографировал дифракцию света вокруг тени от иголки. Даже в том случае, когда интенсивность света была столь слабой, что в пространстве между лампой и фотографической пластинкой единовременно находилось по одному фотону, при длительной экспозиции возникала такая же дифракционная картина, как и при интенсивном освещении.

Методические указания. Этот раздел не следует обсуждать в классе, его целесообразнее проработать как задание для внеклассного чтения.

При проработке остальной части настоящей главы предполагается, что учащиеся хорошо усвоили волновые представления и свойства волны. Не исключено, что вам придется повторить отдельные темы по мере надобности из гл. 16—18. Немного времени может понадобиться на напоминание учащимся о явлениях дифракции и интерференции и их объяснение посредством сложения волновых амплитуд. Пробным камнем при этом может быть их реакция на рис. 33.11, *в* и *г*. Если они сразу же подумают о волне, чтобы объяснить этот рисунок, то можно будет обойтись без подобного повторения.

Что важно в этом новом опытном наблюдении для нашего изучения фотонов и световых волн? Если бы вывод из этого опыта был просто противоположен, то мы все еще могли довольствоваться корпускулярными свойствами света, как об этом свидетельствуют выводы из опыта, изложенного в разделе 33.1. Но этот новый экспериментальный факт несколько необычен и, по-видимому, даже немного парадоксален. Как может отдельный фотон интерферировать сам с собой? Чтобы возникли интерференционные полосы, необходимо, чтобы свет распространялся когерентно и одновременно через обе щели в двухщелевой экспериментальной установке, тогда как отдельные фотоны прибывают в конце концов к конкретному месту только по отдельности, а интерференционная картина представляет собой результат статистического накопления. Способна ли частица двигаться одновременно через обе щели? Ясно, что такая частица, какой мы ее представляли себе

в части III, не может. С другой стороны, можно ли установить, через какую именно щель в действительности пролетел фотон? Если прикрыть одну щель, чтобы фотон проходил через другую, то тогда картина интерференции исчезнет, а останется только картина дифракции, присущая одной щели. В действительности можно показать, что всякое дополнительное приспособление, предназначающееся для обнаружения прохождения фотона через одну из щелей, приведет к исчезновению когерентности и тем самым интерференционной картины. Ясно, что налицо парадоксальная ситуация. Очевидно лишь только то, что в свете этого нового экспериментального наблюдения никакой подробной анализ с позиций классических волн или классических свойств не раскроет нам истинной картины происходящего. Нужна какая-то новая теория, которая не походила бы на все то, с чем мы до сих пор имели дело. Отдельные фотоны, каждый из которых представляет собой в известном смысле частицу, обладают волновыми свойствами. Аналогичная ситуация с корпускулами вещества встретится нам в последующих разделах настоящей главы. Эта двойственная природа вещества и света — один из тех важных фактов, который призвана объяснить всякая настоящая теория современной физики и который труднее всего поддается пониманию. В некоторых случаях свет ведет себя подобно волнам. Это относится, например, к пучку света, проходящего через пару щелей, если за ним наблюдать по создаваемому им нагреванию термопары. В других случаях свет можно уподобить корпускулам. Примером тому служит хотя бы пучок рентгеновских лучей, выбивающих заряд из кусочка вещества в опыте Милликена.

Одно из самых плодотворных объяснений этого «парадокса» заключается в следующем. Свет есть свет. Это не волна и не корпускула. Наши представления о волнах и корпускулах есть плод идеализации возможных вариантов поведения. Нет никаких оснований полагать, что свет должен однозначно подпасть под ту или иную из этих двух категорий. В действительности надо довольствоваться тем, что вообще существует та или иная аналогия. Мы пытаемся все наблюдаемые нами новые явления подогнать под какую-то известную нам категорию, чтобы как-то описать и объяснить их. Однако нельзя возводить в правило придание подобным усилиям, направленным на классификацию, независимого существования. Ведь наша конечная цель состоит в том, чтобы стройно описать вещи такими, какими они есть на самом деле.

33.4. Фотоэлектрический эффект

Цель. Ознакомившись с целым рядом проявлений фотоэлектрического эффекта, изучить некоторые свойства фотонов.

Содержание. а) Когда моноэнергетические фотоны (фотоны с одинаковой энергией) поглощаются в камере Вильсона, все выбиваемые электроны обладают одинаковой энергией.

б) Выбивание электронов с поверхности того или иного металла обнаруживает существенную и резкую зависимость от длины волны падающего света; она должна быть короче определенного критического значения, называемого фотоэлектрическим порогом. Действительное пороговое значение такой длины волны зависит от природы поверхности.

Оба этих опыта показывают, что фотоны, образующие поток монохроматического света или рентгеновские лучи, обладают единственной энергией, а не просто энергией, распределенной около надлежащего среднего значения. Второй опыт

также показывает, что эта характеристическая энергия зависит от длины волны, причем чем короче волна, тем больше энергия.

Методические указания. Прорабатывайте этот раздел тщательно, но кратко. Изложение очередного раздела ведется непосредственно на базе рассматриваемого раздела, а речь в нем идет о той же самой опытной установке, но используемой для постановки более сложных опытов.

Демонстрационный опыт. *Фотоэлектрический эффект.* Показывается, что ультрафиолетовый свет выбивает электроны из цинка, а видимый свет этого сделать не в состоянии. При помощи электроскопа с прикрепленной к нему сверху пластинкой из цинка или оцинкованного железа можно убедиться в том, что ультрафиолетовый свет ртутной лампы выбивает из цинка электроны.

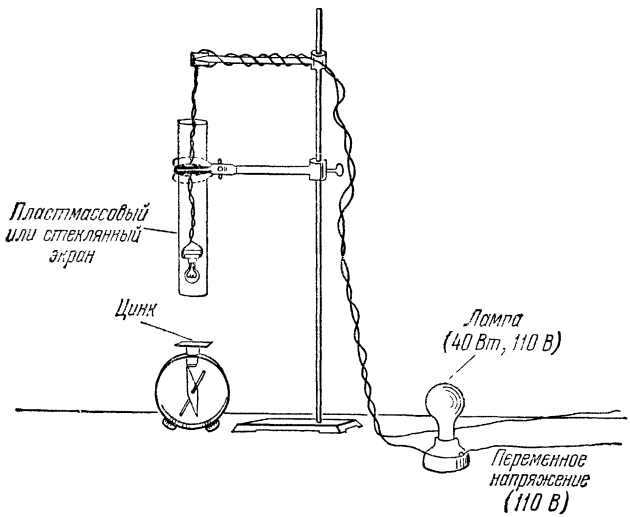


Рис. 92.

Ртутную лампу нужно соединить последовательно с обыкновенной 40-ваттной лампой накаливания на 110 В (рис. 92), чтобы ограничить ток в цепи при подсоединении к сети переменного тока напряжением 110 В. Баллон ртутной лампы изготовлен из специального стекла, пропускающего близкий к ультрафиолетовому свет ртутной лампы. В целях защиты глаз от вредного действия ультрафиолетового света баллон ртутной лампы всюду, кроме одного конца, прикрывают трубкой из обычного стекла или пластмассовым экраном (рис. 92). Цинковую пластинку электроскопа необходимо очистить до блеска стальной щеткой для удаления с поверхности окислов и других загрязнений.

Зарядив электроскоп отрицательно, подведите его близко к лампе накаливания на 100 Вт и покажите, что он не разряжается. Теперь поставьте электроскоп под ртутную лампу. Отрицательно заряженный электроскоп теперь быстро разрядится. Если в процессе его разряжения между ртутной лампой и электроскопом ввести кусок обыкновенного стекла или пластмассы, то разряжение приостановится, потому что стекло действует как фильтр, поглощающий ультрафиолетовый свет.

Теперь повторите опыт с положительно заряженным электроскопом. Когда цинк освещается лампой накаливания, никакого разряжения не наблюдается. Когда же на него падает ультрафиолетовый свет, разряжение протекает гораздо медленнее, чем в случае, когда он был заряжен отрицательно.

Эта особенность поведения объясняется действием совершенно иного механизма. Когда электроскоп заряжен отрицательно, выбиваемые из цинка электроны далеко отводятся прочь от него. Когда же электроскоп заряжен положительно, электроны быстро притягиваются обратно к пластинке и не дают вклада в разряжение.

Поскольку они обладают кинетической энергией всего около 1 эВ, они не могут улететь. Медленное разряжение положительно заряженной пластинки есть следствие ионизации воздуха ультрафиолетовым светом. Ионизация воздуха происходит, разумеется, и тогда, когда электроскоп заряжен отрицательно, но ее вклад в полное разрежение в таком случае ничтожен.

Близкий ультрафиолет от ртутной лампы не способен выбивать электроны из меди или алюминия.

На фотографии капелек воды в камере Вильсона (рис. 33.6) отлично видна пространственная хаотичность процесса поглощения. То обстоятельство, что образующиеся капельки имеют одинаковую величину, т. е. что все выбитые электроны имеют одинаковую энергию, требует некоего правдоподобного объяснения. Но в пространные рассуждения по этому поводу пока пускаться не следует. Мы подбираем целую связку ключей к разгадке непонятных явлений, весь смысл которых убедительно говорит в пользу фотонной гипотезы Эйнштейна.

33.5. Объяснение фотоэлектрического эффекта Эйнштейном

Цель. Установить, что энергия фотона пропорциональна частоте.

Содержание. Описан опыт, в котором кинетическая энергия фотоэлектронов измеряется в функции длины волны (частоты) выбивших их фотонов. Оказывается, что максимальная кинетическая энергия электрона E связана с частотой соотношением

$$E = B - h\nu.$$

Величина B представляет собой количество энергии, требующейся для выбивания электрона из его атома или отрыва его с поверхности куска материала, составной частью которого является выбиваемый электрон. Величина $h\nu$ трактуется как энергия фотона. Когда $h\nu$ превосходит B, фотон способен не только вытянуть электрон из атома или с металлической поверхности, но и сообщить ему кинетическую энергию. Такое объяснение фотоэлектрического эффекта Эйнштейн предложил в 1905 г.

Методические указания. Здесь мы достигли наивысшей точки в количественной трактовке, излагаемой в первой части настоящей главы. Формулу Эйнштейна нужно понять не только саму по себе, поскольку она важна для усвоения гл. 34.

Вся проблема фотоэлектрического эффекта становится доступной простому пониманию, когда это явление получает надлежащее истолкование. Это особенно верно в отношении *распределения* энергии фотоэлектронов, выбиваемых с металлической поверхности, если его сопоставить с постоянством энергии электронов, наблюдающимся в камере Вильсона. В освещении материала настоящего раздела

вам надлежит поэтому поскорее прийти к выводу, чтобы затем уяснить различные промежуточные этапы в свете фотонной картины.

Фотоэлектрический эффект с металлической поверхности представляет собой довольно сложное явление, заставляющее постоянно напоминать учащимся о том, какая именно функциональная зависимость исследуется в той или иной части опыта.

1. Фотоэлектрический ток (скорость выбивания электронов) пропорционален при прочих нормальных условиях *интенсивности* света. В настоящем разделе ничего не говорится об опытной проверке этой зависимости, поскольку она не добавляет ничего нового к тому, что нам уже известно о свете. Того же самого нужно ожидать и от классической волновой модели, то же самое можно считать промежуточным следствием фотонной гипотезы.

2. При постоянной интенсивности света полный фотоэлектрический ток резко прекращается с переходом через порог длин волн в сторону более длинных волн. Последствия данного наблюдения были рассмотрены в предыдущем разделе.

3. При постоянной интенсивности света и заданной длине волны выбиваемые электроны обладают неодинаковой энергией с определенным ее распределением (рис. 33.8). Как отмечалось в Учебнике, эта усложняющая особенность обусловлена тем, что мишень представляет собой твердое тело, способное поглощать какую-то долю кинетической энергии электрона, когда тот покидает поверхность этого тела. Таким образом, распределение энергии при данных обстоятельствах дает нам некоторые сведения о материале этого твердого тела. Однако проще всего поддается истолкованию только максимальная энергия электрона, по которой к тому же можно судить и о свойствах энергии фотонов.

4. При постоянной интенсивности света *максимальная кинетическая энергия* выбиваемых электронов характеризуется простой линейной зависимостью от *частоты* света. Более того, такой линейной зависимости свойствен один и тот же наклон для всех исследуемых материалов; таким образом, этот *наклон* есть характеристика самих фотонов. Истолкование этих результатов заключается в том, что в случае света частотой ν ($\nu\lambda=c$, где c есть скорость света) фотоны обладают энергией $h\nu$, где h — универсальная постоянная (с размерностью энергии, помноженной на время). Таким образом, нами найдена связь, которую мы искали: связь между волновыми характеристиками пучка света и той единственной, характеристической энергией, которую несут на себе фотоны этого пучка.

33.6. Механика фотона. Количество движения фотона

Цель. Определить порядок величин энергий и частот, фигурирующих в фотоэлектрическом эффекте, показав при этом, что фотоны несут не только энергию, но и количество движения.

Содержание. Находится численное значение h, т. е. наклона линейного графика на рис. 33.9, и вычисляется энергия, которую несет фотон видимого красного света. Выражения для энергии упрощаются, когда энергия характеризуется в электрон-вольтах (эВ).

Подробный анализ корпускулярной модели и электромагнитной волновой теории света ведется посредством рассмотрения соударений фотонов, обладающих высокой энергией, с отдельными электронами, видимыми в камере Вильсона. Количество движения, приобретаемое электроном отдачи, представляет собой в век-

торном отношении просто взятое с обратным знаком изменение количества движения фотона, отклонившегося при соударении.

Методические указания. В данном разделе конкретно показывается необходимость учета количества движения, которое несет излучение, особенно фотоны, а также того, как обеспечивается соблюдение закона сохранения количества движения, впервые введенного в ньютоновской механике. Связь между количеством движения и длиной волны в последующем обобщается посредством распространения на движение всякой частицы.

В предшествующем разделе были установлены качественные особенности коренных перемен в наших представлениях о свете. Теперь необходимо приобрести некоторое знакомство с численными значениями связанных с этим пересмотром величин. Заключительную главу учащиеся усвоят намного легче, если они приобретут навыки по обращению с зависимостями, рассматриваемыми в настоящем разделе, и составят представление о величинах порядка электрон-вольта. Даже в том случае, когда вам еще не удалось прорешать многие задачи, предназначающиеся для домашних, классных и лабораторных занятий, целесообразно разобрать задачи 10 и 13, скажем, в классе.

Нам известно из пройденного материала, что свет оказывает давление, т. е. обладает тем или иным количеством движения. Отсюда вытекает логическая необходимость, что фотоны тоже должны обладать каким-то количеством движения. В данном разделе приводятся экспериментальные наблюдения, подтверждающие такой вывод. Это оживляет всю фотонную концепцию: фотоны на самом деле ведут себя как частицы.

Учащиеся могут заинтересоваться вопросом о том, когда налицо эффект Комптона и когда фотоэлектрический эффект. Грубо говоря, в случае фотонов с низкой энергией (но достаточной для того, чтобы фотоэлектрический процесс продолжался) вероятность протекания фотоэлектрического процесса много больше вероятности комптоновского рассеяния. В случае же фотонов с высокой энергией вероятность фотоэлектрического процесса быстро убывает с энергией и становится меньше вероятности комптоновского рассеяния. Следовательно, если рассматривать фотоны со сравнительной низкой энергией, то больше вероятность фотоэлектрического процесса. Если же речь идет о фотонах более высокой энергии, то больше вероятность комптоновского рассеяния.

Приведем один веский довод, который может принести вам пользу, когда вы пытаетесь уяснить себе общую картину. Поглощение фотона (ведущее к фотоэлектрическому выбиванию электрона) представляет собой весьма маловероятное событие. Комптоновское же *рассеяние*, при котором фотон поглощается, а затем переизлучается, представляет собой последовательность двух таких событий, каждое из которых характеризуется приблизительно той же степенью вероятности, что и поглощение фотона. Следовательно, вероятность такого двухстадийного процесса гораздо меньше вероятности простого поглощения фотона. Комптоновское рассеяние возможно при энергиях, при которых ставились наши прежние опыты. Но если опытная установка не сконструирована специально для обнаружения этого рассеяния, то гораздо более вероятный процесс *поглощения* фотонов полностью замаскирует комптоновское рассеяние. Как отмечается в Учебнике, обстановка в этом отношении все больше меняется, когда мы переходим к фотонам со все более высокими энергиями. Атомная связь электрона становится все более слабой, так что фотону электрон представляется почти полностью свободным, а свободный

электрон *не способен поглотить* фотон. Свободный электрон может только рассеять электрон. Таким образом, с повышением энергии фотонов рассеяние становится все более вероятным процессом. (Для нас это означает нечто похожее на поиски иголок, когда сена вокруг останется все меньше и меньше).

Упомянутое выше утверждение, что свободный электрон не способен поглотить фотон, сразу же станет понятным учащимся, когда они найдут графическое решение задачи 15 применительно к рассматриваемому в ней процессу. Электрон с количеством движения $p=h\nu/c$ обладает кинетической энергией $p^2/2m$, тогда как фотон с таким же количеством движения имеет кинетическую энергию $h\nu=pc$. Возьмем численные значения: $h\nu=1{,}2\cdot 10^4$ эВ; $p^2/2m=3{,}4$ эВ. Следовательно, электрон *не в состоянии* вместить *одновременно* и энергию и количество движения, которые несет фотон. При фотоэлектрическом поглощении остальная часть системы (атом или твердое тело) поглощает бо́льшую долю количества движения, так что электрону приходится заботиться лишь о соблюдении закона сохранения энергии. При энергиях же, при которых в действительности наблюдается эффект Комптона, приходится пользоваться релятивистской механикой, но результат получается такой же.

Поскольку крайне малая величина светового давления сильно затрудняет обнаружение его действия, для показа наличия у света количества движения обычно прибегают к опыту с эффектом Комптона. Так называемые «двигатели светового давления», часто выставляемые в витринах ювелирных магазинов, в действительности работают благодаря нагреванию остаточного газа в эвакуированном баллоне.

В рассматриваемом разделе вводится понятие об электрон-вольте как «природной» единице энергии, облегчающей рассмотрение фотоэлектрического эффекта. Когда пользуются видимым светом, энергия фотонов оказывается равной нескольким электрон-вольтам. Это не следует рассматривать как простое совпадение. Вольт был выбран в качестве «практической» единицы разности электрических потенциалов, потому что он имеет подходящую величину, когда речь идет о выражении напряжения химических батарей: батарея для карманного фонарика — 1,5 В; свинцовый элемент автомобильного аккумулятора — 2 В. Эти напряжения создаются благодаря химическим реакциям, сопряженным с обменом одним-двумя наружными электронами между атомами или молекулами. Поэтому нет ничего удивительного в том, что энергии получаются одинаковыми. Почему же мы *видим* свет, это, разумеется, совершенно другой вопрос. Однако отнюдь не исключено, что свету, чтобы стать видимым, приходится создавать в наших глазах электрохимическую реакцию, во многом напоминающую реакцию того же рода, что и в химических батареях.

Выражение $p=h\nu/c$ легко запоминается, но в остальной части главы уместнее пользоваться выражением $p=h/\lambda$.

33.7. Фотоны и электромагнитные волны

Ц е л ь. Показать, как согласуются волновая и корпускулярная модели света

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. В данном разделе содержится описательный материал, изучение которого может ограничиться внеклассным чтением.

Длинные радиоволны состоят из потоков фотонов, обладающих столь ничтожной энергией, что для их обнаружения обычными приборами нужны фотоны в

чрезвычайно огромных количествах. То, что удается наблюдать, представляет собой усредненный эффект, а такой эффект волновая модель описывает правильно. Именно к такого рода экспериментам и относились опыты, позволяющие создать волновую модель. Обычно зернистость света наблюдать не удается, хотя специальные опыты подтверждают, что она присуща даже очень длинным волнам.

С другой стороны, при крайне высоких энергиях, когда отдельные фотоны легко обнаружимы, обычно не хватает достаточно тонкого прибора, чтобы исследовать их волновую природу.

Бóльшую часть особенностей таких фотонов объясняет корпускулярная модель. Наша фундаментальная теория должна охватывать оба крайних случая, а ни волновая теория, ни корпускулярная модель сделать это надлежащим образом не в состоянии.

Именно при проработке данного раздела уместно обобщить новые сведения, приобретенные учащимися. Примирение довольно сложной и таинственной новой картины фотонов с волновой моделью необходимо для сохранения уверенности! Задача 12 поможет вам в этом деле.

Однако было бы целесообразнее не заходить здесь слишком далеко и не перечислять все поставленные опыты с точным анализом всех полученных сведений. Важно не упускать из виду главное: свет ведет себя иногда как волны, а иногда как корпускулы, но истинная картина сложнее и той и другой моделей. Однако не потеряйте чувства меры. В данном случае создалось такое положение, как со всемирным тяготением. Да, гравитация существует. Нам известно, в чем это проявляется и как рассчитать ее проявления во всех случаях. То же самое относится и к свету. Изучите факты экспериментально. Создайте простую (!) теорию, которая позволяет описать их. Научитесь предвидеть, как свет проявляет себя при всяких обстоятельствах. А все это нами уже сделано.

33.8. Волны вещества

Цель. Изложить экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что частицы (электроны, атомы гелия, нейтроны) обладают волновыми свойствами.

Содержание. Данный раздел состоит из следующей последовательности излагаемых в нем идей:

1. Умозрительное заключение де Бройля, согласно которому частицы обладают волновыми свойствами, причем длина соответствующей волны λ должна быть связана с количеством движения частицы p соотношением $\lambda=h/p$. Это — то же самое соотношение, которое справедливо для света с той же самой постоянной h(постоянная Планка).

2. Подробные числовые данные и объяснения опытов по дифракции (рис. 33.11) и интерференции (рис. 33.12) света и электронов. Хотя длины волн для света и электронов не одинаковы, получающиеся картины обнаруживают весьма большое сходство, если не считать масштаба. Таким образом, гипотеза де Бройля подвергалась проверке и была в случае электронов подтверждена качественно и количественно.

3. Опыты с кристаллическим спектроскопом показывают, что атомы гелия и нейтроны также обнаруживают интерференционные свойства, характерные для волн де Бройля.

Методические указания. Данный раздел весьма важен для изучения настоящей и заключительной глав и заслуживает тщательной проработки.

В остальной части настоящей главы излагается вторая половина основ современной физики. То, что вещество, фактически *всякая* частица, обладает волновыми свойствами, труднее поддается пониманию, нежели корпускулярное поведение света, поскольку представление о частице вещества глубоко укоренилось в нашем повседневном практическом понимании мира. В этом представлении нет ничего ошибочного, но существуют обстоятельства, при которых, как нетрудно в этом убедиться, ньютоновская механика уже оказывается несостоятельной, а вместо конкретных ньютоновских орбит, к которым они сводятся в повседневной практике, проявляются вероятностные и волновые эффекты. Нужно устранить чувство, будто частицы не могут обладать волновыми характеристиками, указав на симметрию, которую привносят в нашу картину физического мира эти новые познания.

Аппаратура, требующаяся для создания подходящего пучка электронов и исследования волновых свойств, весьма сложна и далеко не дешева. Логически связанная последовательность рассуждений, просматривающаяся в графическом материале Учебника, вытекает из сопоставления результатов волновых оптических опытов с результатами аналогичных электроннолучевых экспериментов. В этих результатах видно большое сходство, вынуждающее нас сделать вывод, что частицы вещества при своем движении обнаруживают волноподобные характеристики. Бо́льшая часть учащихся удовольствуется этим доказательством. Примечания к иллюстрациям вместе с некоторыми сведениями об особенностях процессов в каждом случае должны принести определенную пользу. Проработка данного раздела должна *убедить* учащихся в том, что частицы (всякие) при некоторых обстоятельствах обнаруживают волноподобные свойства. При проработке последующей части курса они станут следить за тем, как эта волновая природа частиц позволяет нам понять некоторые оставшиеся до сих пор загадочными особенности атомной физики.

Как и в случае с фотонными явлениями, рассмотренными в предшествующих разделах, вся картина волн вещества предстает более убедительной и доказательной, нежели любая другая небольшая часть курса. Уклоняйтесь от обсуждения второстепенных подробностей, но убеждайте учащихся подождать, пока на основе всех доводов в целом не удастся составить окончательное суждение.

Изображенный на рис. 33.11 опыт касается дифракции в области тени от края экрана. Физическая сторона явления в данном случае не сложнее, чем при дифракции на щели. «Ожидаемое» распределение освещенности на экране может показаться на первый взгляд удивительным, но оно есть следствие тщательного анализа. Волны проявляют тенденцию к некоторому огибанию вокруг края экрана (подобно тому, как это наблюдается в волновой кювете), так что освещенность на экране не обрывается резко до нуля. Интерференция порождает периодическое изменение освещенности, которое постепенно ослабевая с удалением от края тени, полностью исчезает. Однако расчет освещенности на экране сопряжен с гораздо большими трудностями, нежели в случае со щелью. Но нам проводить такой расчет не требуется. На рис. 33.11, *в* иллюстрируется экспериментальная дифракционная картина, созданная светом, поведение которого в более простых случаях нам понятно; эта картина полностью согласуется с тем, что предсказывается рис. 33.11, *б*. Чтобы воспроизвести в лабораторных условиях картину, подобную показанной на рис. 33.11, *в*, потребуется лишь незначительно больше усилий, чем при дифракционных опытах части II. С таким же линейным источником света,

бритвенным лезвием в качестве края и экраном из отшлифованного стекла создать видимую дифракционную картину не составляет большого труда.

Главный момент в рассматриваемом сейчас опыте заключается в очень большом сходстве рис. 33.11, *в* с рис. 33.11, *г*. В данной ситуации электроны ведут себя подобно свету. Обратите внимание на почти тождественное изменение освещенности, достигнутое надлежащим выбором фотографического увеличения. Весь масштаб электронного опыта приходится поэтому менять. Край должен быть гораздо тоньше, что заставляет бритвенное лезвие заменить совершенным краем кристалла, увеличив вместе с тем расстояние от края до экрана. Меняя *энергию* электронов, можно показать, что масштаб картины на рис. 33.11, *г* меняется в точном соответствии с предвидением де Бройля.

На рис. 33.12 иллюстрируется результат опыта по интерференции волн вещества. Как и в опыте с дифракцией таких волн, очень короткая длина электронных волн вынуждает к использованию гораздо более сложного лабораторного

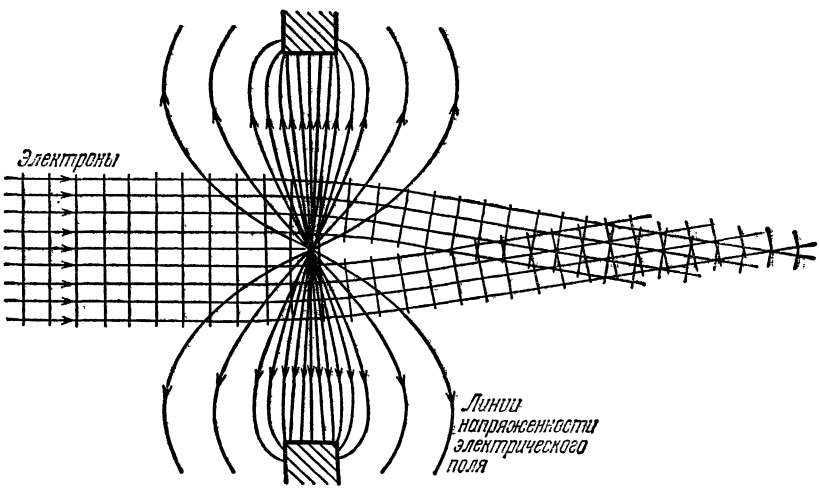


Рис. 93.

оборудования, нежели в интерференционных опытах части II. Длина волны электронов равна $0{,}086 \cdot 10^{-10}$ м, т. е. приблизительно в 10^5 раз короче длин волн видимого света.

То обстоятельство, что после прохождения света через бипризму возникают интерференционные полосы, учащиеся должны воспринять без лишних рассуждений. Показанное на рис. 33.12 устройство воспроизводит знакомые условия, ведущие к возникновению интерференции: от одного и того же источника создаются два пакета волн, которые затем пересекаются. Экран, помещенный на их пути, должен показать темные полосы там, где волны погашают друг друга, и светлые полосы там, где амплитуды волн складываются. Во всяком случае экспериментально мы видим световые интерференционные полосы (рис. 33.11, *а*).

Может возникнуть необходимость обоснования аналогии действия показанной на рис. 33.12,*б* электрической части опытной установки на электронные волны с действием бипризмы на свет. Более подробная картина линий напряженности элек-

трического поля вокруг нити доказывает это (рис. 93). Электроны несут на себе отрицательный заряд и потому испытывают действие силы в направлении к нити. На схеме показаны траектории частиц, а пакеты волн, которые мы теперь связываем с этими траекториями, изгибаются так, чтобы оставаться на траекториях. Таким образом, если судить по ходу лучей, то наше устройство должно действовать подобно собирающей цилиндрической линзе. Неожиданный результат заключается в том, что мы видим интерференционные полосы, доказывающие присущность электронам волновой характеристики. Этот опыт трудно объяснить с той или иной «корпускулярной» позиции. Изменение энергии электронов выразится в изменении промежутка между интерференционными полосами, так что наблюдаемое явление следует объяснить особенностью электронов, а не экспериментальной установки. Даже самые заядлые скептики из числа ваших учащихся должны будут признать убеждающую доказательность опыта.

Приводимые на рис. 33.12 фотографии обнаруживают изменение освещенности интерференционных полос. Предположительно это объясняется *дифракцией* всего пучка под действием ограничивающего отверстия, каковым в каждом случае служит половина бипризмы, через которую проходит пучок. Наложение дифракционной картины на ряд интерференционных полос дает точно такое же явление, с каким мы встретились в разделе 19.7 (двухщелевая интерференция). Промежуток между дифракционными полосами зависит от отношения λ/d, где d есть диаметр отверстия, тогда как промежуток между интерференционными полосами зависит от угла бипризмы (расстояние между изображениями предмета на рис. 33.12, *а* зависит от величины угла бипризмы). То обстятельство, что на электронной фотографии имеется меньше *полос*, заставляет считать с учетом иной масштабности всей установки, обусловленной разной длиной волн электронов и видимого света, электронную «бипризму» гораздо более узкой, чем в случае видимого света.

В задачах 20 и 21 этот опыт анализируется гораздо подробнее. Наиболее способные из ваших учащихся извлекут пользу из попытки самостоятельного решения этих задач, а классное обсуждение задачи 20 позволит проверить, в какой степени учащиеся фактически усвоили материал о волнах вещества.

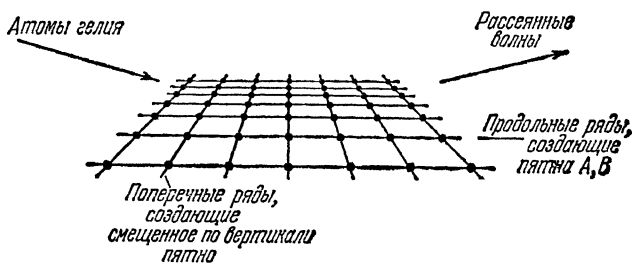


Рис. 94.

Назначение рис. 33.13—33.18 состоит в том, чтобы показать, что наряду с электронами и другие частицы (атомы гелия, нейтроны) также обнаруживают волновые признаки. Важной частью экспериментальной установки в случае атомов гелия является *поверхность* кристалла. (Атомы гелия не способны легко проникать в объем кристалла и выходить оттуда обратно.) Эта поверхность представляет собой двумерную правильную решетку атомов, каждый из которых станет источником рассеянных волн вещества (рис. 94). Для нейтронов устройством, которое

рассеивает волну, служит весь объем кристалла, поскольку нейтроны легко проникают в любой кристалл. Таким образом, нейтрон встречает на своем пути атомы трехмерной решетки. По-видимому, в обоих случаях можно считать очевидным, что если частицы пучка ведут себя согласно ньютоновской механике, то они должны рассеиваться атомами в более или менее случайных направлениях. Если учащиеся, основываясь на знаниях, приобретенных ими при прохождении части II, согласятся с тем, что выход частиц только под весьма определенными углами служит признаком интерференции волн, то почти ничего добавлять не следует. Результаты обоих опытов (рис. 33.14 и 33.18) свидетельствуют об исключительно резком изменении рассеянной интенсивности в зависимости от угла скольжения. Из этих опытов вытекает неумолимый вывод: атомы гелия и нейтроны тоже ведут себя подобно волнам. Значит, отнюдь не исключено, что волновое представление есть фундаментальная особенность описания всего того, что движется, а ньютоновская механика представляет собой всего лишь приближение.

Учащиеся, которых устраивает изложенное выше объяснение, только отклонятся в сторону, если станут углубляться в подробный анализ используемых методов и фактического интерференционного процесса. Однако внимательное изучение подписей к рис. 33.13—33.18 может дать толчок к нелепым вопросам, в связи с чем ниже даются некоторые пояснения.

Дифракционную решетку для видимого света изготовляют нанесением на металлическую поверхность плотно располагающихся канавок и гребней (несколько тысяч линий на 1 см). Когда волна падает на решетку, возникает *интерференция* маленьких волн, рассеянных гребнями. Рассеянный свет достигает максимальной интенсивности в той точке экрана, для которой разность длин путей до каждого гребня равна целочисленному кратному длине волны λ. Максимумы интенсивности возникнут под теми же самыми углами, что и максимумы от интерференции на двух *щелях*, отстоящих друг от друга на расстоянии, равном промежутку между двумя гребнями. Однако максимумы для решетки много резче, чем в случае двух щелей. Дело обстоит так, словно на синусоидально изменяющуюся интенсивность, обусловленную интерференцией на двух щелях, накладывается очень резкая *дифракционная* картина от щели шириной, равной поперечному размеру всей решетки. Таким образом, весь свет, падающий на решетку, *сосредоточивается* на очень узких участках, угловое положение которых зависит от длины волны. Именно поэтому в спектроскопах, предназначающихся для исследования состава света, который состоит из смеси длин волн, ставится несколько решеток.

Для опыта, изображенного на рис. 33.14, роль канавок на обычной решетке, играют правильно располагающиеся ряды атомов. На рис. 33.14 поверхностный слой атомов создает центральное пятно. Это пятно отвечает условию отсутствия разности хода ко всякому рассеивающему атому и обратно. Оно располагается так, что угол падения равен углу отражения. (На самом деле широко известный закон отражения в геометрической оптике можно трактовать как следствие именно такого интерференционного эффекта.)

Результативная интерференция в A (и B) возникает от наложения волн, рассеянных в направлении к A (и B) атомами двух соседних продольных рядов. Разность хода к A (или B) от двух таких рядов равна длине волны λ. Однако для рассматриваемой решетки атомов характерна еще одна совокупность регулярно располагающихся рядов, которые показаны на рис. 94 как поперечные. Пятну, располагающемуся над центральным рефлексом, соответствует разность хода от

источника, равная длине волны λ, для последовательных *поперечных* рядов атомов. Таким образом, образующаяся на экране картина представляет собой *двумерную* совокупность светлых пятен, а не одномерные светлые полосы, как это наблюдается при интерференции от решетки с канавками.

В случае атомов гелия, которые не способны проникать в глубь кристалла, взаимодействие ограничивается только поверхностным слоем атомов. Но для *нейтронов*, которые легко проходят через рассматриваемый кристалл, требуется весьма своеобразная результативная интерференция с распространением на весь объем кристалла, чтобы добиться хотя бы какого-нибудь рассеяния. Максимальная амплитуда волны, рассеянной атомами той или иной конкретной *плоскости*, будет располагаться по направлению центрального пятна на рис. 33.14, но и она не будет очень большой, потому что отдельные атомы слабо рассеивают нейтроны. Для весьма особых углов скольжения, показанных на рис. 33.17, амплитуды волн, соответствующих центральному пятну и возникающих от всех плоскостей атомов, будут находиться в фазе. Рассеяние в этом случае есть когерентная сумма рассеяний от *всех атомов в кристалле*. Экспериментальный результат иллюстрируется на рис. 33.18. Для волн определенной длины существуют другие углы, при которых возможна результативная интерференция от всего кристалла. Как раз такой случай и иллюстрируется на рис. 33.16—33.17. Углы, под которыми пучки выходят из кристалла, дают важные сведения о его структуре и размерах.

33.9. Когда становится существенной волновая природа вещества?

Цель. Оценить количественно, когда становится существенной волновая природа вещества, и примирить с ней наши представления из повседневной практики.

Методические указания. Очень важно дать здесь учащимся передышку, чтобы они усвоили этот раздел. Если данный раздел скомкать, то многое существенное из настоящей главы будет потеряно.

Содержание. Для различных задач обычного движения подставляются соответствующие численные значения λ, h и p в формулу де Бройля $\lambda = h/p$. В этих случаях масса имеет большие значения, так что даже для обычно встречающихся небольших скоростей получаются огромные в атомарном масштабе значения количества движения p. Поэтому длина волны λ почти всегда получается столь ничтожной, что простое наблюдение волновых признаков невозможно.

Электроны, движущиеся с типичными для атомных явлений скоростями (около 10^6 м/с), имеют длины волн того же порядка величины, что и атомные размеры. Это, разумеется, нельзя считать простым совпадением (см. ниже). Таким образом, волновые свойства *электронов* важны в *атомной физике*. Фотография волн, встречающих на своем пути препятствия в волновой кювете (рис. 33.19), иллюстрирует то положение, как сравнительная величина волны и препятствия отражается на воздействии препятствия на волну.

Подобным же образом протоны и нейтроны, двигающиеся со скоростями, характерными для ядерных явлений, обладают волновыми свойствами, играющими важную роль при соударениях этих частиц с ядрами. Явления ни того, ни другого рода не допускают непосредственного легкого наблюдения. Чтобы увидеть волновые свойства, необходимы опыты большой сложности.

Методические указания. После приобщения учащихся к большому объему новых фактических сведений, изложенных в разделе 33.8, данный раздел

принесет пользу как средство усвоения этих сведений. Распространяя формулу де Бройля на знакомые ситуации, нужно довести до сознания учащихся порядок величин расстояний, энергий и т. п., с которыми приходится иметь дело в квантовой механике. Например, какова длина волны автомобиля, едущего с еле измеримой скоростью? Сколь важны волновые эффекты атомов в газе? Вскоре учащиеся убедятся, почему так трудно обнаружить волновую природу вещества.

Всякая теория волновой природы частиц должна отличаться той особенностью, что предсказываемые ею результаты в тех случаях, когда длина волны частицы λ становится очень малой по сравнению с существенными размерами, рассматриваемыми в задаче (например, с размерами рассеивающего препятствия), должны совпадать с тем, что дает классическая механика. Нам известно, что так именно и должно быть, поскольку предметы обычных размеров подчиняются ньютоновской механике. Требование, чтобы новая волновая теория согласовывалась с классической механикой, когда длиной волны λ можно пренебречь, служит весьма важным критерием пригодности всякой новой предлагаемой теории, причем в квантовой механике это требование оказалось весьма полезным прибором, позволяющим определять курс дальнейшего движения вперед.

Для тех из ваших учащихся, которые подзабыли некоторые признаки волновых явлений, рассматривавшихся в части II, и для тех из них, которым к настоящему времени захотелось увидеть нечто «реальное», полезно показать некоторые демонстрационные опыты в волновой кювете с препятствиями разных размеров. Это позволит учащимся лучше уяснить важность отношения длины волны к размеру препятствия.

Можно воспроизвести результаты, иллюстрируемые на рис. 33.19, а равно и промежуточные случаи. С волновой кюветой можно продемонстрировать и некоторые другие явления, рассматриваемые в разделе 33.8, но это довольно трудоемкая задача, на решение которой, видимо, пришлось бы израсходовать больше времени, чем это целесообразно на данной ступени.

То, что электроны с энергиями, типичными для атомных явлений — несколько электрон-вольт,— имеют длины волн, сравнимые с атомными размерами, нельзя считать случайным совпадением. В гл. 34 свойства атомов изучаются на фундаменте предположения о том, что движение электронов в атомах определяется в известном смысле полностью волновой динамикой. Размеры атомов определяют длины волн, потому что электроны заключены в атомах, а электроны с энергиями в несколько электрон-вольт имеют как раз волны такой длины. То же самое верно применительно к другим численным значениям для протонов и нейтронов, когда они взаимодействуют с ядрами.

33.10. Свет и вещество

Ц е л ь. Увязать воедино новую картину строения вещества и прежние познания о свете.

С о д е р ж а н и е. И для частиц вещества и для фотонов справедливо следующее:

а) При всяком отдельном событии энергия и количество движения сохраняются.

б) Волны определяют вероятность местоположения.

в) Когда длина волны λ мала по сравнению с другими существенными размерами, можно пользоваться ньютоновским приближением;

г) Когда длина волны λ сравнима с другими существенными размерами, ньютоновское приближение утрачивает свою состоятельность.

Несмотря на большое сходство во многих отношениях, фотоны отличаются от частиц вещества той легкостью, с которой их можно генерировать и уничтожать.

Методические указания. В данном разделе изложен легкий, описательный материал, в проработке которого можно ограничиться внеклассным чтением.

Мы достигли к настоящему времени такого уровня, когда симметрия между современными представлениями о свете и веществе может считаться доказанной. Эти две совершенно различные в классическом понимании сущности ведут себя сходным образом. Так, все результаты и следствия опыта Тэйлора с фотонами (см. раздел 33.8) распространяются равным же образом и на электроны. Изображенную на рис. 33.12 интерференционную картину рисует электронный луч даже самой малой интенсивности. Когда мы выстреливаем электроном в ту или иную экспериментальную установку, мы никогда не знаем определенно, где именно он появится на другом ее конце. Затененная картина освещенности и темные полосы, рассчитанные на основе теории вещество — волна, предсказывают только *вероятность* (в среднем) его обнаружения.

Все сказанное выше относится и к свету. Но как бы то ни было, сами фотоны — новое явление, так что не следует удивляться тому, что ведут себя они не совсем точно предсказуемым образом. В случае электронов — частиц вещества — это оказалось коренным отходом от удобно определенной ньютоновской механики, изложенной в части III. Этот отход стал и все еще остается причиной недовольства и умозрительных разнотолков со стороны философов и отдельных физиков. В настоящее время у нас имеется единственная механика — квантовая, которая предсказывает вероятностный исход всякого данного опыта, но ничего большего относительно любого отдельного испытания и его результата сказать не может.

Нижеследующие замечания предназначаются больше для сведения преподавателей, нежели для обучения учащихся. Нам повезло в том отношении, что некоторые задачи, связанные с волновыми свойствами электронов, решаются без большого труда посредством обращения к касающимся волн доводам того рода, к которому учащиеся привыкли еще при проработке части II. (Таким доводам посвящена гл. 34.) На данной ступени целесообразно свести к минимуму философские рассуждения и перейти к полезным расчетам, которые укрепят у учащихся веру в волновую теорию вещества. Эти замечания написаны в качестве руководящих указаний в отношении того, как надо отвечать на пытливые вопросы, если таковые будут заданы.

Как мы уже убедились, некоторые свойства у частиц такие же, как и у света. В некоторых случаях такое сходство нельзя не признать замечательным. Трудно продемонстрировать как корпускулярные свойства электромагнитного излучения, так и волновую природу частиц, по крайней мере с помощью обычного лабораторного оборудования. Но надо проявлять крайнюю осторожность в сопоставлениях, например, фотонов и частиц *одинаковой длины волны*. Для электронов, образовавших интерференционную картину на рис. 33.12, длина волны λ равна $8{,}6 \cdot 10^{-12}$ м. Фотон с такой длиной волны обладает энергией 20 000 эВ, а рентгеновские лучи с такой энергией обнаруживают довольно заметным образом корпускулярные свойства при атомных соударениях. Но когда и фотон и электрон имеют длину волны λ, равную $8{,}6 \cdot 10^{-12}$ м, они *различимы*. Электрическое поле отклонит электрон, но не изменит траектории фотона. Электрон несет на себе электрический заряд, а фотон электрически нейтрален. Они отличаются друг от друга. Поэтому давайте сравним фотоны с *нейтронами* ... Мы можем пойти дальше по

этому пути, сравнивая поведение фотонов с поведением всех других известных нам частиц. Всегда можно поставить тот или иной опыт, который позволит обнаружить разницу между ними. Фотон принадлежит к общности одного рода. Мы можем называть его частицей при условии, что нами в это слово не вкладывается классический смысл. Существуют частицы многих других видов, свойства которых были удостоверены на опытах, причем все они в том или ином отношении отличаются от фотонов, хотя иногда такие отличия весьма незначительны и очень трудно обнаружимы.

Одна характерная черта, которая отличает фотоны от всех других частиц, заключается в легкости их генерирования, особенно когда они обладают небольшой энергией. Сравните электрическую лампочку, в которой создается множество фотонов с волнами длиной в видимом диапазоне, с электрической цепью. В цепи наблюдается прохождение электронов. Нельзя наблюдать проявление тока, пока нет замкнутой цепи, по которой *течет* ток. Нельзя создавать электроны на одном конце проводника и уничтожать их на другом, создавая ток. Их число остается постоянным. Следовательно, если исходить из того, что мы видели в лаборатории, то в этом заключается весьма разительное отличие фотонов от электронов. Известные нам другие частицы — нейтроны, протоны, атомы гелия — имеют общую с электронами особенность: в обычных ситуациях они сохраняются.

На самом деле существуют возможности создавать электроны, нейтроны, протоны и т. п. Читатели научно-популярных журналов могли встретиться с антивеществом: антиэлектронами (называемыми позитронами), антипротонами, антинейтронами. Нельзя, генерировать например, только электрон, но пару электрон и позитрон генерировать можно, если обеспечить для этого надлежащие условия. Позитрон представляет собой совершенно отличную от электрона частицу, которая несет заряд противоположного знака. И что еще важнее: когда позитрон встречается с каким-нибудь другим электроном, оба они исчезают, оставив после себя энергию в форме фотонов. Чтобы понять это, надо знать теорию относительности Эйнштейна, но факты в действительности таковы. Для создания той или иной пары нужно определенное количество энергии, равное полной массе пары, умноженной на квадрат скорости света. Даже в случае таких легких частиц, как электроны, для создания пары электрон — позитрон требуется 10^6 эВ энергии. Таким образом, создавать частицы *не легко*. С другой стороны, фотоны образуются *в одиночном порядке*, без напарников, причем для создания фотона с длиной волны в диапазоне видимого света требуется всего лишь около 2 эВ энергии. При наличии подходящего экспериментального устройства такие фотоны создавать довольно легко. С такой задачей вполне справляется обыкновенная электрическая лампочка. Поэтому в Учебнике, когда говорится об отличительной особенности фотонов, упор делается на *легкость* их создания. Кстати сказать, античастицы не только трудно создавать, их очень легко уничтожить. Как раз поэтому их не встретишь в обычных ситуациях. Частицы, с которыми они аннигилируют, в огромном изобилии содержатся в обычном веществе.

33.11. Что же такое волны?

Методические указания. Прорабатывайте этот раздел только как домашнее задание. Мы встречались с волнами, например в волновой кювете, как со своеобразным возмущением системы. Система, или материя, обладает многими другими измеримыми свойствами. Мы знаем теперь об электромагнитных волнах и

волнах вещества, которые в обоих этих случаях распространяются в пустоте. Естественно поинтересоваться другими свойствами пустоты и задуматься над тем, не обладает ли она, быть может, свойствами, подобными свойствам хорошо известных нам носителей волн (поверхности воды). Однако необходимости в существовании таких свойств нет. Пустота обладает способностью нести электромагнитные волны и волны вещества, причем этого, как оказывается, вполне достаточно.

О взглядах наиболее передовых физиков нашего времени по этому вопросу говорится в Учебнике. Их можно охарактеризовать следующим образом. Теория света (электродинамика) представляет собой законченную в своей области математическую схему. Равным же образом теория атомных частиц (квантовая механика) есть законченная же в своей области физическая схема. Они способны предсказать результат любого планируемого опыта, а как раз это и требуется от всякой теории.

Величины, посредством которых формулируется теория, напряженность электрических полей, скажем, в электродинамике, или «вероятностные амплитуды» в квантовой механике — существуют (могут не быть равными нулю) во всем пространстве. Таковы величины, с которыми мы имеем дело — напряженность поля или вероятностная амплитуда,— а «вакуум» есть просто имя, которым мы наделяем все пустое пространство. Это — не общность в нашей теории. Его единственная способность состоит в том, что оно в состоянии поддерживать эти напряженности поля или вероятностные амплитуды. Ничего больше говорить о нем *не требуется*, чтобы пользоваться им в электродинамике или в квантовой теории частиц. Обладает или не обладает «вакуум» другими свойствами — в настоящее время неизвестно. Существуют ли волны иного рода, способные распространяться в вакууме, волны, скажем, связанные с явлениями, которые до сих пор не удалось обнаружить? Возможны ли измерения, связанные с вакуумом более активным образом, чем те, которые мы умеем проводить? Не исключено, что возможны. Ученые будущего могут открыть такие возможности. Нам же это неизвестно.

Тем не менее учащихся озадачит вопрос: «Что же такое волны?» Примеры волнового движения, с которыми они встречались, относятся только к системам со многими другими свойствами. Поэтому естественно стремление перенести все атрибуты моделей на фактически изучаемую систему. Ясно, что когда вы пользуетесь моделью, вы должны знать, где кончается сходство модели с действительной системой.

К сожалению, любой подобный ответ оставляет то или иное чувство неудовлетворенности, пока учащиеся не поймут и не научатся работать с действительной теорией электродинамики. Тогда им модели более не будут нужны и они постепенно осознают, что вопрос «Что же такое волны?» не требует ответа для того, чтобы усвоить все то, что нам известно в настоящее время о Вселенной.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам

В табл. 20 задачи распределены по степени их предположительной трудности и по разделам, к которым они относятся. Отдельно выделены задачи, предназначающиеся для разбора в классе. Задачи, рекомендуемые для обязательного решения, помечены значком #.

ТАБЛИЦА 20

Разделы	Со звездочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
33.1—33.4	1,3	2,4			
33.5—33.7	5,6	9	7,8#,10,11	12—15,16#,17	8#,10
33.8	18,19		21	20#	20#
33.9			23,25	22#,24	

Краткие ответы

1*. Время, за которое происходил бы первый скачок, всегда было бы больше при слабом освещении.

3*. а) Нет. б) Да.

5*. Точки, соответствующие частотам $6{,}8\cdot10^{14}$ и $7{,}4\cdot10^{14}$ $с^{-1}$.

6*. 1,4 эВ.

18*. $\lambda=0{,}73$ Å.

19*. $2d\sin\theta=2\lambda$.

Ответы с указаниями и решениями

2. Чтобы получить четкое изображение с высоким разрешением, нужно больше фотонов, для чего потребуется увеличить выдержку.

4. Свет более короткой длины волны гораздо эффективнее, засвечивает (портит) фотографические материалы подобно тому, как это имеет место при выбивании электронов с поверхности металлов. Белый свет состоит из смеси цветов от красного до фиолетового. Следовательно, он содержит компоненты более коротких волн, чем красный свет. Если перевести это на язык фотонов, то белый свет содержит фотоны более высокой энергии, чем красный свет. Когда подобные фотоны поглощаются, они способны вызвать такие превращения в материалах, каких не могут создать фотоны красного света.

7. а) Если $\lambda=5000$ Å, то энергия простого фотона будет $E=h\nu=(6{,}6\cdot10^{-34})\cdot(3\cdot10^{8})/(5\cdot10^{-13})=4\cdot10^{-19}$ Дж.

б) Среднее число ежесекундно попадающих фотонов N найдется как частное от деления ежесекундно поступающей на фотографическую пластинку энергии на энергию отдельного фотона. Средний промежуток времени между попаданиями двух фотонов будет

$$1/N=(4\cdot10^{-19}\text{ Дж})/(5\cdot10^{-13}\text{ Дж/с})=8\cdot10^{-7}\text{ с}.$$

в) Поскольку фотоны движутся в воздухе со скоростью $3\cdot10^{8}$ м/с, прибывая в среднем по одному через каждый промежуток времени в $8\cdot10^{-7}$ с, расстояние между каждыми двумя следующими друг за другом фотонами должно составлять в пространственном пучке

$$(3\cdot10^{8}\text{ м/с})\cdot(8\cdot10^{-7}\text{ с})=240\text{ м}.$$

г) Чтобы ответить на этот вопрос, представим себе пучок в пространстве со средним промежутком между фотонами, равным 240 м, но учтем при этом, что в силу случайной природы процесса эмиссии всякий отдельный фотон может находиться в заданный момент времени равновероятно в любой точке такого промежутка. Если затем предположить еще, что продольная протяженность фотона весьма мала, то дальше можно рассуждать следующим образом. Если на пути пучка поместить камеру длиной 1,2 м, то она займет 1/200 среднего расстояния между фотонами. Таким образом, заглянув в камеру в тот или иной момент времени, вы увидите фотон только единожды за 200 попыток.

8. Все фотоэлектрические линейные графики имеют одинаковый наклон. Если для выбивания электрона из какого-то конкретного металла требуется втрое больше энергии, чем из меди, то частота света, требующаяся для простого выби-

вания электронов из этого металла, будет в три раза выше, чем для меди. Как видно из рис. 33.9, пороговая частота для меди равна $3{,}3\cdot 10^{14}\,с^{-1}$. Пороговая частота для нашего графика составляет $10^{15}\,с^{-1}$ (рис. 95).

9. Если бы всякий фотон терял 20% своей энергии, то цвет отраженного света сместился бы по сравнению с падающим светом к длинноволновому краю.

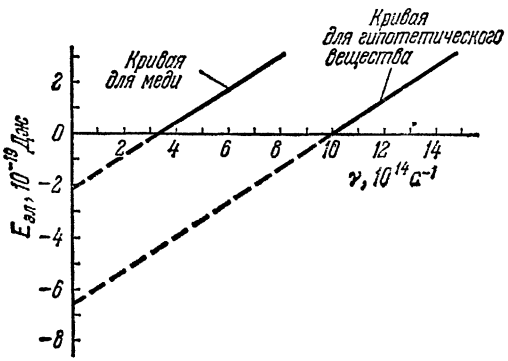


Рис. 95.

Поскольку отраженный свет имеет тот же самый цвет, то приходим к выводу, что полностью поглощаются 20% фотонов.

10. а) $\nu = c/\lambda = (3\cdot 10^{8}\,м/с)/(6{,}5\cdot 10^{-7}\,м) = 4{,}6\cdot 10^{14}\,с^{-1}$.

б) $E = h\nu = (6{,}6\cdot 10^{-34}\,Дж\cdot с)\cdot(4{,}6\cdot 10^{14}\,с^{-1}) = 3\cdot 10^{-19}\,Дж$.

в) Энергия $E = (3\cdot 10^{-19}\,Дж)\cdot 1эВ/(1{,}6\cdot 10^{-19}\,Дж) = 1{,}9$ эВ (или $E = 12\,397/\lambda = 12\,397/6500 = 1{,}9$ эВ; см. стр. 205).

г) Мы видим свет с длинами волн от 4000 Å (фиолетовый) до 7000 Å (красный). Воспользовавшись соотношением $E = h\nu = hc/\lambda$, найдем энергии фотонов фиолетового и красного света:

$$E_{7000} : E_{6500} = 6500 : 7000, \quad E_{7000} = 1{,}9\cdot 6500/7000 = 1{,}8 \text{ эВ};$$
$$E_{4000} : E_{6500} = 6500 : 4000, \quad E_{4000} = 1{,}9\cdot 6500/4000 = 3{,}1 \text{ эВ}.$$

11. Энергия фотонов с длиной волны 5000 Å равна $E = 12\,397/5000 = 2{,}5$ эВ (см. задачу 10). Часть этой энергии, равная 2 эВ, тратится на выбивание электронов из металла, тогда как остальная энергия в количестве 0,5 эВ достается самым быстрым электронам в виде кинетической энергии. Следовательно, чтобы затормозить эти электроны, нужно напряжение 0,5 В. Бóльшая часть выбиваемых электронов тратит часть этой энергии (0,5 эВ) на соударения внутри твердого тела.

12. а) $E = h\nu = hc/\lambda = (6{,}6\cdot 10^{-34})\cdot(3\cdot 10^{8})/3 = 6{,}6\cdot 10^{-26}\,Дж$.

б) Если всякий фотон несет с собой около 10^{-25} Дж энергии, то число фотонов, требующееся для того, чтобы излучаемая мощность составляла 10 кВт, найдется как $10^{4}\,Дж/10^{-25}\,Дж = 10^{29}$. Соответственно для радиовещания с мощностью 10 кВт (10 Дж/с) потребуется поток фотонов с интенсивностью $10^{29}\,с^{-1}$.

в) Когда радиоволны достигают района, отстоящего от радиовещательной станции на расстоянии 100 км, их полная энергия распределится по площади A поверхности сферы с радиусом 100 км, равной

$$A = 2\pi R^2 = 4\pi\cdot 10^{10}\ м^2.$$

На часть этой поверхности с площадью 1 м^2 поступит следующая доля полной энергии:

$$1\ м^2/(4\pi\cdot 10^{10}\ м^2).$$

На вход приемника поступает такая же доля полной мощности 10^{29} фотон/с, т.е.

$$[1/(4\pi\cdot 10^{10})]\cdot 10^{29} \approx 10^{18} \text{ фотон/с}.$$

Одно колебание при произнесении буквы «с» длится 1/4000 с, следовательно, за одно такое колебание в приемник поступит

$$(1/4000\text{ с})\cdot 10^{18}\text{ фотон/с} \approx 10^{14}\text{ фотонов.}$$

г) Нельзя заметить один фотон из 10^{14}!

13. В данной задаче требуется вычислить давление света, речь о котором велась в части II.

а) $E=h\nu=hc/\lambda=(6{,}6\cdot 10^{-34})\cdot(3\cdot 10^{8})/(5000\cdot 10^{-10})=4\cdot 10^{-19}$ Дж,

$$p=E/c=(4\cdot 10^{-19})/(3\cdot 10^{8})=1{,}3\cdot 10^{-27}\text{ кг}\cdot\text{м/с.}$$

Другое решение:

$$p=h/\lambda=(6{,}6\cdot 10^{-34})/(5000\cdot 10^{-10})=1{,}3\cdot 10^{-27}\text{ кг}\cdot\text{м/с.}$$

б) Электрическая лампа излучает в видимой области 1 Вт своей мощности (1% от 100 Вт). Один ватт есть 1 Дж/с, так что число фотонов видимого света, испускаемых ежесекундно, найдется как частное

$$(1\text{ Дж/с})/(4\cdot 10^{-19}\text{ Дж/фотон})=2{,}5\cdot 10^{18}\text{ фотон/с.}$$

в) Доля тех фотонов, которые ударяются о поверхность площадью A на расстоянии 2 м от лампы, равна доле площади поверхности сферы радиусом 2 м, которую покроет площадь A, т. е. $A/4\pi R^2=A/16\pi$. Таким образом, число фотонов, ежесекундно ударяющихся о площадь A, составит $(A/16\pi)\cdot(2{,}5\cdot 10^{18})$. Всякий фотон несет с собой количество движения, равное $1{,}3\cdot 10^{-27}$ кг·м/с, так что полное количество движения, сообщаемое ежесекундно площади A, найдется в виде произведения

$$(A/16\pi)\cdot(2{,}5\cdot 10^{18})\cdot(1{,}3\cdot 10^{-27})\text{ кг}\cdot\text{м/с}^2.$$

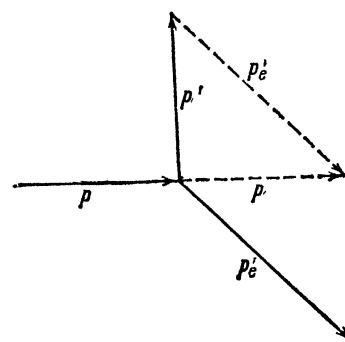


Рис. 96.

Количество движения, приобретенное тем или иным телом за определенное время, равно среднему усилию, действующему на это тело, умноженному на время: $\Delta p=F\Delta t$. Следовательно, в нашем случае $6{,}5\cdot 10^{-11}A=F\cdot 1$. Давление P есть сила, приходящаяся на единичную площадь, т. е. $P=F/A$. Таким образом,

$$P=F/A=6{,}5\cdot 10^{-11}\text{ Н/м}^2=6{,}5\cdot 10^{-11}\text{ Па.}$$

(Эту величину полезно сравнить с атмосферным давлением, равным приблизительно 10^5 Па *).

14. а) Поскольку всякий отдельный рентгеновский луч генерируется единственным электроном, максимальная энергия, которой такой луч обладает, равна кинетической энергии, отдаваемой электроном при торможении в антикатоде до полной остановки. Длина волны, соответствующая этой максимальной энергии, будет

$$\lambda=c/\nu=hc/E_{\text{макс}}.$$

б) $\lambda=(1{,}24\cdot 10^{4}\text{ эВ})\text{Å}/(2\cdot 10^{4}\text{ эВ})=0{,}62\text{ Å}.$

15. а) Обозначим количество движения фотона до его столкновения с электроном $\boldsymbol{p}$. В задаче говорится, что фотон при столкновении отскакивает под прямым углом к своей первоначальной траектории с количеством движения, равным по величине исходному. Таким образом $\boldsymbol{p'}$ выражает конечное количество движения фотона (рис. 96). Закон сохранения количества движения требует, чтобы

*) Паскаль (Па) — давление, создаваемое силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м^2. *(Прим. перев.)*

приобретенное электроном при столкновении количество движения p'_e удовлетворяло равенству $p' + p'_e = p$, как это и показано на векторной диаграмме рис. 96.

б) Модули исходного и конечного количеств движения фотона просто определить, поскольку нам известна длина волны λ:

$$p' \approx p = h/\lambda = (6{,}62 \cdot 10^{-34})/10^{-10} = 6{,}62 \cdot 10^{-24} \text{ кг·м/с.}$$

в) Воспользовавшись простым геометрическим соотношением применительно к векторной диаграмме рис. 96, найдем, что $p'_e \approx \sqrt{2}\, p$. Следовательно,

$$E'_e = p'^2_e/2m_e = \left(\sqrt{2}\, p\right)^2/2m_e = 2 \cdot (6{,}62 \cdot 10^{-24})^2/(2 \cdot 9{,}11 \cdot 10^{-31}) = 4{,}73 \cdot 10^{-17} \text{ Дж.}$$

г) По закону сохранения энергии $E = E' + E'_e$, но

$$E = h\nu = hc/\lambda = cp = (3 \cdot 10^8) \cdot (6{,}62 \cdot 10^{-24}) = 1{,}99 \cdot 10^{-15} \text{ Дж;}$$

следовательно,

$$E' = E - E_e = (1{,}99 - 0{,}05) \cdot 10^{-15} \text{ Дж} = 1{,}94 \cdot 10^{-15} \text{ Дж.}$$

Изменение энергии фотона весьма незначительно (2,4%).

д) Поскольку $E = h\nu$ и $E' = h\nu'$,

$$(\nu - \nu')/\nu = \left(E - E'\right)/E.$$

Относительное изменение частоты равно относительному изменению энергии фотона, т. е. составляет 2,4%. Это подтверждает правильность изложенного в п. а) задачи предположения о том, что изменение частоты фотона столь мало, что при вычислении p'_e им можно пренебречь.

16. а) Для одного фотона с исходным количеством движения p, отраженного от зеркала перпендикулярно, величина изменения количества движения будет $\Delta p = 2p = 2h\nu/c$.

б) Оказываемое на зеркало давление равно полному изменению количества движения за единицу времени, приходящемуся на единичную площадь. Давление $= N\Delta p = N\,(2h\nu/c)$.

в) Полная энергия в единицу времени, приходящаяся на единичную площадь, равна $E = Nh\nu$, так что давление равно $2E/c$. Следовательно, световое давление, оказываемое N фотонами за единицу времени на единичную площадь, частоты которых распределены по всему диапазону, может быть таким же, как давление N фотонов с единственной частотой ν. Для этого необходимо лишь, чтобы средняя частота немонохроматического света была равна ν.

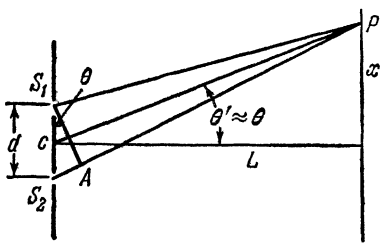


Рис. 97.

г) Давление равно $(2 \cdot 10^3)/(3 \cdot 10^8) = 0{,}7 \cdot 10^{-5}$ Па.

17. Из рис. 33.17 видим, что $\lambda = 2d \sin\theta$. Поскольку $\sin 10^\circ = 0{,}17$, длина волны $\lambda = 2 \cdot (3 \cdot 10^{-10} \text{ м}) \cdot 0{,}17 = 10^{-10} \text{ м} = 1 \text{ Å}$. Энергия фотона $E = hc/\lambda = (1{,}24 \cdot 10^4 \text{ эВ}) \text{ Å}/1 \text{ Å} = 10^4$ эВ.

20. а) Как видно из рис. 97, светлые полосы образуются во всех точках P, где длина AS_2 равна целому числу длин волн де Бройля для электронов с энергией 100 эВ, т. е. $AS_2 = n\lambda$, где $n = 0, 1, 2, 3, \ldots$ Как следует из раздела 17.4, $x = n\lambda L/d$, а промежуток между соседними полосами на экране $\Delta x = \lambda L/d$. Для электронов

$$\lambda = h/p = h/\sqrt{2mE}.$$

Отсюда

$$\Delta x = \frac{hL}{d\sqrt{2mE}} = \frac{(6{,}6\cdot 10^{-34}\ \text{Дж}\cdot\text{с})\cdot 3\ \text{м}}{(10\cdot 10^{-10}\ \text{м})\cdot\sqrt{2(9{,}1\cdot 10^{-31}\ \text{кГ})\cdot 100\ \text{эВ}\cdot(1{,}6\cdot 10^{-19}\ \text{Дж/эВ})}} =$$

$$= 0{,}36\ \text{м}.$$

б) Никакой разницы между электронами, достигающими экрана в светлых и темных местах, нет. Только на светлые полосы электронов попадает больше (как раз потому полосы и светлые), чем на темные. То обстоятельство, что размеры дифракционных щелей сопоставимы с длиной волны де Бройля для электрона, просто означает, что в поведении электронов превалирует их волновая природа. Таким образом, место, куда попадут электроны на экране, определяется сложной вероятностной картиной. Предсказать строго, куда именно попадет тот или иной электрон, нельзя. Однако масса, заряд, энергия и величина этого электрона точно такие же, как и у остальных электронов с энергией 100 эВ.

21. При анализе задачи 20 было показано, что расстояние между светлыми полосами Δx равно $hL/(d\sqrt{2mE})$, так что оно обратно пропорционально $\sqrt{E}$. Повышение энергии пучка электронов с 50 В до 5000 В приводит к увеличению E в 100 раз, а $\sqrt{E}$ — в 10 раз; таким образом Δx уменьшается в 10 раз.

22. Эта задача знакомит с некоторыми представлениями и порядками величин ядерной физики.

а) Масса нейтрона приблизительно равна массе протона и составляет $1{,}7\cdot 10^{-27}$ кг. Рассмотрим случай, когда $E = 10^4$ эВ $= 1{,}6\cdot 10^{-15}$ Дж. Тогда

$$p = \sqrt{2mE} = \sqrt{2\cdot(1{,}7\cdot 10^{-27})\cdot(1{,}6\cdot 10^{-15}\ \text{кг}\cdot\text{м/с})} = 2{,}3\cdot 10^{-21}\ \text{кг}\cdot\text{м/с}.$$

Из формулы де Бройля имеем

$$\lambda = h/p = (6{,}6\cdot 10^{-34}\ \text{Дж}\cdot\text{с})/(2{,}3\cdot 10^{-21}\ \text{кг}\cdot\text{м/с}) = 2{,}9\cdot 10^{-13}\ \text{м}.$$

Другие значения E больше соответственно в 10^2 и 10^4 раз, а поскольку длина волны λ пропорциональна p^{-1}, т. е. $E^{-1/2}$, длина волны уменьшится соответственно в 10 и 100 раз.

б) Результаты решения представлены в табл. 21.

ТАБЛИЦА 21

E, эВ	λ	λ/диаметр ядра атома золота
10^4	$2{,}85\cdot 10^{-13}$	19
10^6	$2{,}85\cdot 10^{-14}$	1,9
10^8	$2{,}85\cdot 10^{-15}$	0,19

в) 1) Когда длина волны «частицы» мала по сравнению с размерами попадающихся ей на пути препятствий, она проявляет тенденцию вести себя подобно классической частице. В данном случае нейтроны с энергией 10^8 эВ должны вести себя как раз таким образом. Поскольку ядро нельзя уподоблять бильярдному шару, потому что оно представляет собой сложное образование из нуклонов, соударяющийся с ним нейтрон может в отдельных случаях оказаться вовлеченным в движение ядра, а не отразиться от поверхности подобно бильярдному шару.

2) В другом крайнем случае, когда длина волны λ много больше размера препятствия, налетающая частица «не увидит» деталей строения рассеивающего ее предмета и во всех случаях будет вести себя как сферическая волна. Так должны вести себя нейтроны с энергией 10^4 эВ.

В обоих случаях препятствие не повлияет на бо́льшую часть нейтронов, но по разным причинам. В первом случае геометрическая площадь ядер ничтожна по сравнению с площадью мишени. Во втором случае общее влияние рассеиваю-

щего предмета на волну исчезает по мере уменьшения его величины — площади поверхности недостаточно, чтобы отбрасывать волну назад.

г) Так как нейтроны с энергией 10^8 эВ ведут себя при соударениях с ядрами атомов золота до некоторой степени подобно бильярдным шарам, они больше годятся для измерений величины ядер, нежели нейтроны двух других энергий. Подсчитав число нейтронов, приходящееся на 1 м^2 (сечение нейтронного пучка) и число нейтронов, поглощенных или отклоненных от пути пучка тонким листочком с ядрами атомов золота, можно вычислить долю 1 м^2, которую прикрывают ядра атомов золота. Затем вычислив число ядер посредством взвешивания листочка золота, найдем площадь, приходящуюся на одно ядро.

23. а) Воспользовавшись данными, приведенными на стр. 205, о том, что длина волны λ равна $1{,}24\cdot 10^4/E$, найдем, что лучи с энергией 40 000 эВ имеют длину волны $1{,}24\cdot 10^4/40\,000=0{,}31$ Å.

б) Количество движения p *всякой* частицы с этой длиной волны выражается по формуле де Бройля в виде

$$p=h/\lambda=(6{,}62\cdot 10^{-34}\ \text{Дж}\cdot\text{с})/(0{,}31\cdot 10^{-10}\ \text{м})=2{,}13\cdot 10^{-23}\ \text{кг}\cdot\text{м/с}.$$

Для электрона $m_e=9{,}11\cdot 10^{-31}$ кг; таким образом,

$$E_e=p^2/2m_e=(2{,}13\cdot 10^{-23})^2/(2\cdot 9{,}11\cdot 10^{-31})=2{,}49\cdot 10^{-16}\ \text{Дж}=1{,}56\cdot 10^3\ \text{эВ}.$$

Следовательно, электроны с этой длиной волны должны обладать энергией около 1600 эВ.

в) Теннисный мяч будет обладать тем же самым количеством движения p. Масса стандартного теннисного мяча $m_\text{м}$ равна 0,14 кг. Поскольку при постоянстве p энергия E пропорциональна $1/m$, найдем энергию теннисного мяча $E_\text{м}$ из пропорции

$$E_\text{м}:E_e=m_e:m_\text{м};$$

отсюда

$$E_\text{м}=(2{,}5\cdot 10^{-16}\ \text{Дж})\cdot(9{,}1\cdot 10^{-31})/0{,}14=1{,}6\cdot 10^{-45}\ \text{Дж}=10^{-26}\ \text{эВ}.$$

Скорость этого теннисного мяча можно узнать из количества его движения p:

$$v_\text{м}=p/m_\text{м}=(2{,}13\cdot 10^{-23})/0{,}14=1{,}5\cdot 10^{-22}\ \text{м/с}.$$

г) Если $v_\text{м}=10$ м/с, то $p=mv_\text{м}=1{,}4$ кг·м/с; следовательно,

$$\lambda=h/p=(6{,}62\cdot 10^{-34})/1{,}4=4{,}7\cdot 10^{-34}\ \text{м}=4{,}7\cdot 10^{-24}\ \text{Å}.$$

Отсюда следует вывод, что нам никогда не следует беспокоиться по поводу волновой природы теннисных мячей.

24. а) Кинетическая энергия частицы $E_\text{к}$ связана с ее количеством движения p соотношением

$$p=\sqrt{2mE_\text{к}}.$$

Поскольку $\lambda=h/p$, искомой формулой будет

$$\lambda=h/\sqrt{2mE_\text{к}}.$$

б) Кинетическая энергия электрона, накопленная им при разгоне разностью потенциалов V, выразится в виде $E_\text{к}=qV$, где q есть заряд электрона. Поскольку разность потенциалов V выражена в вольтах, длина волны λ найдется в виде

$$\lambda=h/\sqrt{2mqV}=(6{,}6\cdot 10^{-34}\ \text{Дж}\cdot\text{с})/\sqrt{2\,(9{,}1\cdot 10^{-31}\ \text{кг})\cdot(1{,}6\cdot 10^{-19}\ \text{Кл})\,V}=$$
$$=(1{,}2\cdot 10^{-9}/\sqrt{V})\ \text{м};$$

отсюда найдем длину волны в ангстремах:

$$\lambda=(12/\sqrt{V})\ \text{Å}.$$

Эта формула служит хорошим приближением, дающим длины волн электронов с энергиями до 2500 эВ, когда электрон приобретает скорость, близкую к 1/10 скорости света; если же электроны имеют энергии больше 2500 эВ, то важную роль в таких случаях играет теория относительности.

ь) Как нами только что было установлено, если длина волны λ выражена в ангстремах, то

$$V = 12^2/\lambda^2 = 144/(5900)^2 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ В}.$$

Это чрезвычайно малое значение напряжения объясняет, почему нельзя генерировать электронные волны с длиной, сравнимой с длинами волн видимого света. Всякому электронному лучу с самого начала присущ большой разброс энергии электронов по сравнению с энергией $4 \cdot 10^{-6}$ эВ. Средняя кинетическая энергия электронов «в покое» при комнатной температуре равна $2{,}5 \cdot 10^{-2}$ эВ.

25. а) На фотографическом снимке всякая молекула имеет диаметр около 2 мм. Увеличение составляет приблизительно $8 \cdot 10^4$, так что диаметр молекулы будет

$$(2 \cdot 10^{-3} \text{ м})/(8 \cdot 10^4) = 2{,}5 \cdot 10^{-8} \text{ м} = 250 \text{ Å}.$$

б) Найдем теперь отношение диаметр/длина волны:

$$(2{,}5 \cdot 10^{-8})/(5 \cdot 10^{-7}) = 1/20.$$

Эффект воздействия молекулы на видимый свет должен быть таким же, как и в случае небольшого препятствия в волновой кювете, показанном на фотографии рис. 33.19, где возмущение исчезает в пределах двух длин волн от препятствия.

в) Электроны в электронном микроскопе имеют длины волн малой величины по сравнению с размером молекулы. Например, в условиях предшествующей задачи получается, что для $V = 100$ В длина волны равна 1,2 Å. Это довольно короткая волна, достаточная для того, чтобы различить точки, отстоящие от белковой молекулы ближе чем на 1/10 ее диаметра, и выявить, что молекула имеет сферическую форму. Однако электроны с энергией 100 эВ обладают очень незначительной проникающей способностью. Чтобы обеспечить нужный уровень проникающей способности, электронные микроскопы должны работать при напряжениях от нескольких киловольт до 300 кВ при исследовании толстых предметов.

ГЛАВА

34 КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ И СТРОЕНИЕ АТОМОВ

Настоящей главой достигается наивысший подъем в проработке курса. В ней идеи из механики, физической оптики и электричества увязываются с некоторыми парадоксами, с которыми физики столкнулись на заре XX столетия. Из успехов в преодолении подобных трудностей родилась современная физика, были созданы квантовая теория и волновая механика.

Краткое содержание главы 34

Введение. Классическая теория не справилась с разрешением двух главных проблем: она не объяснила, почему атомы устойчивы и для одинаковых в химическом отношении атомов одного вида тождественны друг другу во всех отношениях.

Разделы 34.1—34.3. Описанный в разделе 34.1 опыт Франка и Герца непосредственно свидетельствует о том, что обмен энергией между атомами ртути и сталкивающимися с ними электронами происходит только определенными дискретными порциями. Простое истолкование подобных наблюдений заключается в том, что внутреннее строение атомов допускает только определенные дискретные величины полной энергии. На этом фундаменте мы строим схему энергетических уровней в атоме и исследуем фотонные спектры, которые должны возникать, когда атом переходит из одного энергетического состояния в другое. Закон сохранения энергии требует, чтобы фотоны обладали только определенными дискретными энергиями. Более того, из установленной в последней главе зависимости между энергией фотона и его частотой ($E=h\nu$) следует, что испускаемый атомом свет имеет только дискретные частоты. Эти частоты строго соответствуют частотам наблюдаемых спектральных линий.

Разделы 34.4—34.6. В этих разделах предпринимаются попытки, направленные на обстоятельное объяснение дискретных энергетических состояний посредством волновых характеристик вещества. Высказывается предположение, что электронным волнам в атоме присущи особенности стоячих волн, предполагающие дискретность частот. После рассмотрения стоячих волн в колеблющейся струне в качестве предварительного шага решается соответствующая задача о волновом движении частицы в ящике. Затем в разделе 34.6 в общих чертах излагается математическое решение задачи об электронных волнах в атоме водорода, отлично согласующееся с наблюдаемыми энергетическими уровнями. Такому количественному расчету поддаются спектры и других водородоподобных атомов, например ионизованного гелия.

Раздел 34.7. Последнее заключение, обобщающее приобретенные при прохождении данного курса познания о внутреннем мире атомов.

План изучения главы 34

В табл. 22 приводятся два варианта плана прохождения настоящей главы.

ТАБЛИЦА 22

Глава 34	10-недельный план изучения части IV			15-недельный план изучения части IV		
Разделы	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты
34.1	1	0	—	2	0	—
34.2, 34.3	1	0	—	2	0	—
34.4, 34.5	2	0	—	2	0	—
34.6, 34.7	1	1	IV. 15	1	1	IV. 15
Задачи	1	0	—	1	0	—

Дополнительные материалы к главе 34

Лаборатория. Опыт IV.15 (*Спектр водорода и постоянная Планка*) позволяет учащимся точно измерить длины волн трех видимых спектральных линий водорода. Результаты таких измерений вместе с изложенной в разделе 34.6 теорией подтверждают справедливость предсказаний волновой теории в отношении энергетических уровней водорода и позволяют определить величину постоянной Планка еще одним способом, независимым от фотоэлектрического измерения, проведенного в гл. 33.

Домашние, классные и лабораторные задания. Ознакомьтесь с ответами, решениями и таблицей, которая классифицирует задачи по степени их предположительной трудности, на стр. 482.

Введение

В этом разделе рассматриваются две трудности, с которыми столкнулись физики до создания квантовой теории. Эти проблемы, разрешаемые дальше в главе, заключаются в следующем: 1) электроны, обращающиеся вокруг ядра, не излучают энергии и не движутся по спирали к ядру, как это предсказывается классической физикой; 2) все атомы одного и того же химического вида оказываются тождественными друг другу во всех отношениях. Все они имеют, например, одинаковую величину. Классическая же теория допускает для планетных систем равновесие при радиусе любой величины, т. е. произвольный их размер. При изложении материала в разделе 34.1 дается самый общий набросок классической картины атомной системы с охватом этих моментов.

34.1. Опыты Франка и Герца. Атомные уровни энергии

Цель. Изложить экспериментальные данные, показывающие, что атом способен приобретать энергию от сталкивающегося с ним электрона только дискретными порциями, величина которых характерна для конкретного атома.

Содержание. Дается полное описание существенных частей экспериментальной установки Франка — Герца. Электроны с известной энергией проходят

через камеру с ртутным паром или атомами какого-то другого элемента. Измеряются энергии электронов после столкновений. Выясняется, что атомы приобретают энергию от электронов только определенными дискретными порциями.

Результаты этого опыта заставляют полагать, что атомы существуют только в состояниях с определенными характеристическими энергиями. Атомы обычно пребывают в своем состоянии с наименьшей энергией — «основном состоянии». При соударении с электроном, обладающим достаточной энергией, энергия атома повышается до какого-то другого из этих состояний с фиксированной энергией, переводится в «возбужденное состояние», воспринимая от электрона как раз разность энергий между основным и возбужденным состояниями.

Методические указания. Эти идеи фундаментальны в настоящей главе. Их нужно полностью проработать.

Полезно начать с краткого обзора свойств классического атома, составленного по материалам некоторых предшествующих глав. Решающее значение для интуитивного понимания картины энергетических уровней в атоме, набрасываемой в настоящем разделе, имеет *понятие о внутренней энергии* и ее роли в данном случае. Волновая картина, излагаемая в разделе 34.6, наследует многие характеристики классической картины.

Рассмотрим классическую модель водородного атома.

1. Масса протона в 1800 раз больше массы электрона. Как и в случае со спутником Земли или планет Солнечной системы, можно с хорошим приближением пренебречь движением тяжелого тела, т. е. протона, и считать его неподвижным (см. гл. 22 и раздел 24.3).

2. Между положительным протоном и отрицательным электроном действует кулоновская сила притяжения. Потенциальная энергия этой системы, когда электрон находится на расстоянии r от протона, равна $-ke^2/r$, если потенциальную энергию считать равной нулю тогда, когда электрон находится на большом удалении от протона (см. раздел 28.6).

3. Полная энергия системы запишется в подобном случае в следующей форме:

$$E = m_e v^2/2 - ke^2/r.$$

Это выражение похоже на формулу полной энергии движущейся планеты, потому что тяготение и кулоновская сила одинаково зависят от расстояния, будучи обратно пропорциональными его квадрату (см. раздел 24.4).

4. Мы можем выбрать круговую орбиту *любого* радиуса r. Скорость электрона должна удовлетворять закону Ньютона:

$$mv^2/r = ke^2/r^2, \qquad v^2 = ke^2/r.$$

5. Последнее соотношение выражает удивительно простую зависимость:

$$mv^2/2 = ke^2/2r,$$

означающую, что кинетическая энергия равна по величине просто половине потенциальной энергии. Следовательно, для круговой орбиты величина радиуса r определяет полную энергию в следующем виде:

$$E = mv^2/2 - ke^2/r = -ke^2/2r.$$

Полная энергия есть отрицательная величина благодаря нашему выбору нулевого значения потенциальной энергии. $E < 0$ означает, что для полного удаления элек-

трона из его атома нужно подвести энергию (см. раздел 24.5 о спутниках Земли и скорости их выхода за пределы земного тяготения). В силу нашего четвертого предположения радиус r может приобретать любое значение. Значит, внутренняя энергия атома E может иметь *любое* (отрицательное) значение по нашему усмотрению. Не нужно подчеркивать то, что мы ограничили данную часть рассмотрения круговыми орбитами. В случае эллиптических орбит результаты получаются более сложными, но в общих чертах такими же, как и в случае круговых орбит.

Все только что изложенные результаты либо уже известны учащимся, либо же легко выводятся из того, что им должно быть известно из курса. Еще немного времени понадобится для того, чтобы объяснить и раскрыть смысл этих результатов. Не нужно переоценивать результаты, даваемые классической моделью, поскольку, как нам известно, она не годится, и поскольку учащиеся уже смутно догадываются о необходимости привлечения волн. Однако очень важно, чтобы у учащихся была конкретная отправная точка. Атом представляет собой динамическую систему. Поэтому он обладает внутренней энергией, так или иначе связанной с движением входящих в систему частей. Однако нам еще не известны никакие подробности об этом движении.

Полезно обсудить результаты опытов Франка и Герца с классической позиции, рассмотрев только круговые траектории обращения электронов в атоме. С этой точки зрения нетрудно убедиться в том, что бомбардирующему электрону почти невозможно ударить по атому, не изменив его внутренней энергии, поскольку ему явно придется при этом внести возмущения в электронные орбиты атома. То обстоятельство, что внутренняя энергия атома не претерпевает изменения, пока энергия бомбардирующего электрона не превзойдет некоторое пороговое значение, классическая теория объяснить не в состоянии. Дело обстоит так, словно атому свойственна «жесткость». Естественное же объяснение сводится к тому, что атом может существовать только при определенных состояниях его внутренней энергии, причем для ее изменения из одного состояния в другое обязательно требуется достаточное количество энергии.

При написании Учебника его составители всячески избегали говорить о том, что современная картина атома изображает электрон движущимся по строго определенной круговой орбите. Первоначальные попытки Бора по созданию квантовой теории предусматривали совершенно определенные траектории, так называемые квантованные орбиты. Однако эту картину вытеснила волновая модель. Поэтому всякое упоминание об электронах, движущихся по круговым или эллиптическим орбитам, должно связываться с классическими взглядами. Учащимся же полезно указать, что на данном уровне прохождения курса нам пока точно неизвестно, что же именно происходит внутри атома и, как это следует из опыта Франка — Герца, что бы там ни происходило, атом способен воспринимать энергию только определенными порциями. Отсюда естественный вывод о том, что атом способен существовать лишь в состояниях с определенными энергиями. Каким-то образом, который пока еще не рассматривался, эти энергетические состояния должны быть связаны с состоянием движения электронов вокруг ядра атома.

Несколько первых задач из раздела ДКЛ предполагает учет подобных соображений. Чтобы воспрепятствовать переходу классных занятий на слишком отвлеченные позиции и помочь учащимся составить правильную картину, полезно решить следующие задачи.

Дополнительные задачи. А. Электрон с энергией 6,20 эВ соударяется с атомом ртути. С какой энергией он может отскочить от этого атома?

Ответ. Он может отскочить упруго, сохранив все 6,2 эВ. Может отскочить и не упруго, возбудив атом ртути до 4,86 эВ и сохранив 6,2—4,68=1,34 эВ энергии.

Б. Электронный луч с энергией 10 эВ пропускают через ртутный пар. Какой энергией будут обладать прошедшие через него электроны?

Ответ. 10—8,84=1,16 эВ; 10—6,67=3,33 эВ; 10—4,86=5,14 эВ. (Не забудьте, что электрон способен дважды соударяться с атомом — в этом случае у него останется 10—2(4,86)=0,28 эВ энергии.)

В. Учащиеся вправе задать следующий вопрос: «Если один электрон отскакивает от ртутного атома, оставляя его возбужденным до уровня с 4,86 эВ энергии, то не может ли другой электрон столкнуться с этим атомом ртути и возбудить его еще до уровня с 6,67 эВ, открывая тем самым возможность выхода электронов из пространства с атомами ртути, обладающих энергией 10,00—(6,67—4,86)= =8,19 эВ, что согласуется с ответом задачи Б»?

Ответ. В принципе это возможно, но практически такая возможность не реализуется. Атом ртути, возбужденный до уровня 4,86 эВ, излучает эту энергию в виде фотона света приблизительно за 10^{-8} с. Поэтому в каждый данный момент времени существует очень мало атомов, находящихся в возбужденном, а не в основном состоянии. Следовательно, электроны способны возбуждать их лишь из основного состояния.

Рассмотренные выше вопросы, предназначающиеся для классных занятий, можно повторить для электронов с другими энергиями и, скажем, с атомами цезия.

Задачи 2 и 3 из раздела ДКЛ представляют собой простые упражнения на закон сохранения энергии в процессе возбуждения атомов. Если учащиеся усвоили излагаемый в Учебнике материал, то решить задачу 2 им будет нетрудно. Для решения задачи 3 нужно вспомнить то, что о молекулярном движении и теплоте говорилось в гл. 25.

34.2. Последовательное возбуждение спектральных линий. Возбуждение и испускание

Цель. Изучить спектр испускания в опыте Франка — Герца как еще одно доказательство существования атомных энергетических уровней.

Содержание. Нами предполагается, что когда атом меняет свое энергетическое состояние, переходя на уровень с меньшей энергией, он испускает фотон. Этот фотон должен иметь такое количество энергии, чтобы соблюдался закон ее сохранения. Поскольку $E=h\nu$, это означает, что частота тоже должна иметь надлежащую величину. Таким образом, возможны лишь определенные дискретные частоты, соответствующие разностям энергий между дискретными энергетическими уровнями, до которых бомбардирующие электроны способны возбуждать атомы. Появление линий *меньшей* частоты с *повышением* энергии бомбардирующих электронов объясняется сокращением промежутков между более высокими энергетическими уровнями. Возбуждение атомов под действием иных механизмов также ведет к возникновению спектров испускания.

Методические указания. Этот материал легко усваивается учащимися. Прорабатывать его нужно вместе с разделом 34.3.

Как только учащиеся воспримут идею об атомных энергетических уровнях, излагаемая в настоящем разделе гипотеза покажется им весьма разумной приме-

нительно к свойствам фотонов. Из раздела 33.5 им известно, что электрону нужна энергия для того, чтобы покинуть металлическую поверхность, которую он приобретает посредством поглощения фотона. Теперь разумно предположить, что электрон при *испускании* фотона должен *терять* энергию. При этом надо ожидать, что частота фотона должна определяться требованием сохранения количества энергии. Подробные экспериментальные данные по спектрам испускания для атомов ртути отображены на рис. 34.4. Диаграммы энергетических уровней показывают, что последние возбуждаются при конкретной энергии бомбардирующих электронов и что частоты фотонов соответствуют ожидаемым. Превосходное соответствие частот фотонов наблюдающимся спектральным линиям должно раз и навсегда убедить учащихся в правильности представления об атомных энергетических уровнях.

Учащимся полезно напомнить об экспериментальной установке для наблюдений за некоторыми спектральными линиями. Для этого нужны линейный источник, призма или решетка для разложения света и то или иное приспособление, чтобы наблюдать за положением линий. В качестве детектора часто употребляют фотографическую пленку. При использовании линейного источника на пленке получаются вертикальные линии. На фотоснимках, приведенных в Учебнике, линии с большей длиной волны находятся справа. Нельзя забывать, что эти снимки представляют собой негативы, на которых темные линии характеризуют освещенность при рассмотрении на сером фоне.

Демонстрационный опыт. Учащимся полезно предоставить возможность наблюдать за некоторыми спектральными линиями. Если вы решили сделать это для всего класса сразу, то снабдите всех учащихся каким-нибудь подходящим простым средством для наблюдения за цветным пламенем, установленным неподалеку от классной доски. Если вместо пламени спектроскопа воспользоваться газоразрядной трубкой, то это приблизит демонстрационный опыт к материалу, излагаемому в настоящей главе. Для такого опыта годятся любые газоразрядные трубки, в том числе и наиболее распространенные в настоящее время неоновые. Трубки, наполненные газообразным водородом, не подходят, так как в подобном случае будет наблюдаться спектр молекулярного, а не атомарного водорода. Для опыта потребуется повышающий трансформатор небольшой мощности. Не следует пытаться воспроизвести эффекты, охарактеризованные на рис. 34.4, так как при невысоком напряжении возникают спектры очень слабой интенсивности.

Дополнительная задача. Электроны выходят из камеры, наполненной каким-то газом, с энергией 6 и 3 эВ. Какие частоты должны излучаться этим газом?

Ответ. Поскольку электроны сохраняют энергию 3 или 6 эВ, атомы газа должны возбуждаться до уровней 4 и 7 эВ. Газ станет испускать фотоны с энергиями 4 и 7 эВ, а также 3 эВ. Фотоны с энергией 3 эВ станут испускать атомы, возбужденные до уровня 7 эВ, оставаясь после этого все еще возбужденными до 4 эВ. Найдем частоты соответствующих фотонов:

$$\nu_1 = E_n/h = (7 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19})/(6{,}6 \cdot 10^{-34}) = 1{,}7 \cdot 10^{15}\ \text{с}^{-1};$$
$$\nu_2 = 0{,}97 \cdot 10^{15}\ \text{с}^{-1}; \qquad \nu_3 = 0{,}73 \cdot 10^{14}\ \text{с}^{-1}.$$

34.3. Спектры поглощения

Цель. Изложить экспериментальные данные о спектрах темных линий поглощения, дополняющие картину фотонов и переходов между атомными энергетическими уровнями.

Методические указания. Поглощение фотона, приводящее к возбуждению атома, представляет собой в известном смысле тот же самый процесс, что и процесс, описанный в разделе 34.2, только обращенный во времени. Фотон просто проходит сквозь атом, если его энергия не равна точно энергии, требующейся для возбуждения одного из атомных уровней. Сравнив эту картину с электронным возбуждением атома (рис. 34.3), можно проиллюстрировать мысль, проводившуюся в разделе 33.10. Одно из коренных отличий фотонов от таких частиц, как электроны, состоит в том, что фотоны поглощаются и испускаются, а частицы нет. Так, фотоны способны возбуждать атомы только в том случае, когда их энергия в *точности* равна энергии, требующейся для возбуждения атомов. Фотон пропадает полностью, сообщая свою энергию (вместе с количеством движения) атому. Возбуждение же атома электроном возможно всегда, когда его кинетическая энергия равна или превосходит нужное минимальное количество энергии. Электрон замедляется как раз на столько, на сколько это требуется для сохранения энергии, при условии, что у него есть тот или иной ее «избыток».

Обратите внимание на сведения, содержащиеся в подписи к рис. 34.5. Поскольку данная фотография коротковолновой области спектра поглощения натрия представляет собой негативное изображение, светлые линии соответствуют *отсутствию* фотонов с надлежащей длиной волны.

При обсуждении спектров поглощения учащиеся часто задают следующий вопрос: поскольку атом при переходе в возбужденное состояние поглощает энергию, а затем переходит обратно в основное состояние путем испускания фотона или серии фотонов той же самой длины волны, почему же мы все-таки видим темные линии? Не восполняет ли вновь излученный фотон тот фотон, который был поглощен атомом? Все дело в том, что испускаемый вновь фотон излучается в совершенно произвольном направлении, тогда как наша оптическая система чувствительна к свету, распространяющемуся только в одном направлении, а именно в направлении падающих фотонов. Следовательно, нам удается наблюдать повторно излучаемые фотоны лишь в самых крайних случаях. Бóльшая часть повторно излучаемых фотонов улетает в том или другом направлении, которое не совпадает с направлением оптической оси нашего регистрирующего устройства. Если бы у нас имелась возможность смотреть сразу во всех направлениях, то сосчитанные нами в этом случае фотоны создали бы такую картину, словно атом рассеивает всякий падающий на него фотон.

Демонстрационный опыт. Если у вас в распоряжении имеется довольно хороший спектроскоп, то вы можете проиллюстрировать классу спектры поглощения. С помощью зеркал направьте солнечный луч в ваш прибор. Если щель имеет незначительную ширину, то учащиеся увидят темные линии на светлом сплошном спектре. Это будут поглощенные линии. Это можно доказать, рассматривая одновременно спектр пламени натрия. Направьте его спектр с помощью другого зеркала на спектроскоп. На положенном месте появится светлая желтая линия. Кстати сказать, это является еще одним доказательством того, что желтая линия натрия создается переходом из возбужденного состояния непосредственно в основное состояние, поскольку в противном случае ее не было бы видно в спектре поглощения.

Дополнительные задачи. А. Атом какого-то элемента имеет энергетические уровни в 4 и 7 эВ над основным состоянием. Какова энергия поглощаемого этим атомом света?

Ответ. Этим атомом поглощаются фотоны с энергиями 4 и 7 эВ. Фотоны с энергией 3 эВ этим атомом *не поглощаются*, поскольку он обычно находится в основном состоянии. Разумеется, атом мог бы поглотить фотон с энергией 4 эВ и затем фотон с энергией 3 эВ, но такое событие крайне маловероятно по причинам, которые были изложены в заключительной части методических указаний к разделу 34.1.

Б. Что случится с фотоном, обладающим энергией 6 эВ, если он «ударится» о такой атом?

Ответ. Он пролетит мимо. Он не может возбудить атом до уровня 4 эВ и остаться фотоном с энергией 2 эВ. Как это стало нам известно? Если бы существовала хотя бы минимальная вероятность подобного процесса, то должен был бы поглотиться свет всех энергий, а не только немногих дискретных частот (см. рис. 34.5).

34.4. Уровни энергии атома водорода

Цель. Ознакомить с численными данными об энергетических уровнях простейшего атома, каким является атом водорода. Эти данные объясняются в следующих двух разделах на основе волновой модели.

Методические указания. Запоминать «формулы» нет необходимости, нужно помнить только о зависимости обратной пропорциональности n^2.

С этого момента речь идет об атоме водорода. Классически он представляет собой простейший атом. Как выясняется, схема энергетических уровней атома водорода поддается легкому описанию в отношении численных значений, чем он отличается от атома ртути.

Недостаток времени вынуждает нас опустить замечательную историю открытия формулы, описывающей энергетические уровни водорода. Главная заслуга здесь принадлежит Бальмеру. К 1885 г. уже были исследованы атомные спектры многих элементов, но частоты наблюдавшихся линий представлялись неподчиняющимися каким-либо простым закономерностям (подобным гармоникам основной частоты, характеризующим всевозможные колебания струны). Бальмер исследовал спектр водорода, отличающийся особенной простотой, поскольку известны были лишь 9 линий. Как он установил, длины волн этих линий выражаются (в ангстремах) формулой

$$\lambda = 3645{,}6 \cdot n^2/(n^2 - 4), \qquad \text{где } n = 3,\ 4,\ 5,\ \ldots,\ 10,\ 11.$$

Эта формула верна с точностью лучше 0,1%. Нам известно, что она дает частоты водородных линий, когда в атоме совершаются переходы из состояний с $n=3$, 4, 5, ..., 10, 11 в основное состояние ($n=2$). В 1890 г. Ридберг установил, что довольно простые формулы характеризуют длины волны других атомных спектров. В частности, он выяснил, что проще всего спектры описывать через *частоты* линий в виде

$$\nu = \nu_0 - Rc/n^2, \qquad \text{где } n = 3,\ 4,\ \ldots$$

Здесь ν_0 — постоянная, c — скорость света, а R — постоянная, называемая константой Ридберга. Этой удивительно простой формулой не пришлось воспользоваться еще целое двадцатилетие. Потребовалось понять фотоны (что было достигнуто Планком (1903) и Эйнштейном (1905)), Резерфорду создать планетарную систему электронов, обращающихся вокруг ядра атома, прежде чем Бор создал в

1913 г. модель движения электронов, которая позволила усмотреть в этом простом выражении некоторый физический смысл. *Истолкование* результатов в свете волновых свойств электрона стало пробивать себе дорогу только через десять лет с лишним, начало чему было положено де Бройлем.

34.5. Происхождение уровней энергии

Цель. Показать, как из волнового движения вытекает возможность дискретных состояний движения.

Содержание. На передний край выдвигаются волновые свойства электронов, рассмотренные в предшествующей главе, в качестве возможного объяснения дискретности наблюдаемых энергетических уровней. Уровни должны отвечать совершенно различным волновым картинам. Стоячие волны, образующиеся на колеблющейся струне и во многих других случаях, как раз обнаруживают такое поведение. Подробно излагаются практические рекомендации относительно возбуждения стоячих волн, чтобы показать их учащимся. Исследуется волновое движение частицы в ящике, чтобы проиллюстрировать сходство с водородным атомом. Наличие состояния с минимальной энергией трактуется как обнадеживающий признак, доказывающий физическую правильность такого подхода.

Методические указания. Излагаемые в данном разделе представления фундаментально важны для усвоения раздела 34.6.

Как подчеркивается в Учебнике, важно показать учащимся некоторые опыты с резиновыми трубками и веревками. Те из них, которые поймут вынужденность колебаний растянутой трубки только с естественными частотами, не потребуют больше никаких убеждений.

Связь между стоячими волнами и наблюдавшимися до настоящего этапа бегущими волнами пригодится в дальнейшем при определении длины волны λ в формуле де Бройля. То обстоятельство, что стоячую волну можно рассматривать как следствие наложения двух одинаковых бегущих волн, распространяющихся в противоположных направлениях, иногда довольно трудно воспринимается учащимися. В Учебнике говорится об экспериментальном подходе, который позволяет безотказно преодолевать подобное затруднение.

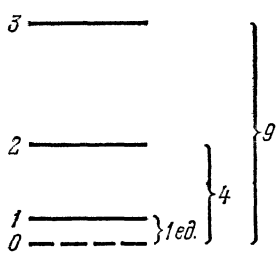


Рис. 98.

Волновая механика частицы в ящике иллюстрирует те приемы, которые используются в очередном разделе. С позиций классической теории частица у каждого края ящика должна отражаться без изменения величины скорости. Таким образом, ее количество движения должно оставаться постоянным по величине, что упрощает применение соотношения де Бройля. (В следующем разделе положение в этом отношении уже менее определенное.) Самое важное здесь заключается в том, чтобы подчеркнуть, что существует энергетическое состояние, ниже которого никакого другого состояния быть не может. Это подсказывает возможное решение озадачивающей проблемы устойчивости атомов. Здесь полезно поинтересоваться энергиями некоторых более высоких уровней. В данном случае задача решается просто, поскольку нет необходимости вычислять потенциальную энергию. К тому же это помогает внести ясность в то, что обратная пропорциональность n^2 энергетических состояний в атоме во-

дорода представляет собой весьма частный случай. В других системах, например, в системе, изображенной на рис. 98, энергетические уровни характеризуются другими схемами. Чтобы определить энергии, соответствующие показанным на рис. 34.8 волнам, следует учесть, что длины волн соответственно равны $\lambda_1=2d$, $\lambda_2=2d/2$, $\lambda_3=2d/3$, $\lambda_4=2d/4$ и т. д. Вообще $\lambda_n=2d/n$. Подстановка соотношения де Бройля $E=h^2/2m\lambda^2$ дает

$$E_n=(h^2/8md^2)\,n^2.$$

Математически это простое выражение, но оно дает совершенно иное относительное расположение энергетических уровней, нежели в случае водородного атома.

34.6. Волновая теория уровней энергии атома водорода

Цель. Изложить упрощенную волновую картину атома водорода и правдоподобно вывести выражение для энергетических уровней.

Содержание. Задача нахождения верной картины стоячих волн теперь усложняется: ставится задача о стоячей волне в трех измерениях, причем при отсутствии точно определенной границы, какая существует в случае натянутой струны или частицы в ящике. Однако ограничив рассмотрение только круговыми орбитами и предположив к тому же, что движение волны не выходит за пределы области, окружающей классическую орбиту, можно отыскать стоячую волну рассмотренными в Учебнике приемами. Вместо волны между двумя границами мы требуем теперь, чтобы волна замыкалась сама на себя, т. е. чтобы она облегала внутреннюю часть атома без обнаружимого стыка. Это определяет длину волны λ, так что согласно гипотезе де Бройля нам остается определить p и кинетическую энергию. Потенциальная энергия вычисляется по формуле kq_1q_2/r в предположении, что электрон находится на расстоянии r, при котором волна точно замыкается сама на себя. Это определяет полную энергию набора дискретных стоячих волн, которые характеризуют движение электрона вокруг протона. Выведенное для энергетических уровней выражение верно. Получается порядок уровней $E_n\sim 1/n^2$ с коэффициентом 13,6 эВ, который, как выясняется, представляет собой простое сочетание величин e, k, m и h.

Это объяснение можно проверить по сходству поведения атомов. В действительности разные атомы ведут себя согласно выведенному выше выражению. Эта простая модель позволяет объяснить даже ничтожные эффекты отдачи ядра.

Методические указания. Данный раздел представляет собой наивысшую точку в настоящей главе. Уделите достаточное время всем излагаемым в нем доводам. Однако не забывайте при этом, что ради упрощения математики доводы приводятся в приближенном и неполностью строгом виде. Точность получаемых результатов столь удивительна, что на оговорки можно не обращать внимания.

Не подчеркивайте трудностей, встречающихся при попытках нарисовать точную волновую картину. Фотографии на рис. 34.9 показывают, что в сложных ситуациях можно ожидать образования сравнительно простых стоячих волн. Если вам удалось повторить пройденный материал, как это рекомендовалось в методических указаниях к разделу 34.1, то напечатанный мелким шрифтом на стр. 248 материал учащиеся должны усвоить без больших трудностей. Небесполезно точно сформулировать этапы рассуждений с тем, чтобы побыстрее разделаться с алгеброй и вывести зависимость от $1/n^2$.

Перечислим упомянутые этапы рассуждений.

1. Закон Ньютона (которым мы пользуемся, хотя электрон и трактуется как волна) $F=ma$:

$$kq_1q_2/r^2 = +mv^2/r.$$

Это дает нам одну зависимость между двумя неизвестными величинами v и r в уравнении, которую запишем в виде

$$mv^2 = kq_1q_2/r.$$

(Правая часть равенства представляет собой взятую со знаком минус потенциальную энергию, тогда как в левой его части стоит удвоенная кинетическая энергия. Таким образом, кинетическая энергия пропорциональна потенциальной, т. е. обе они одинаковым образом зависят от n.)

2. Чтобы стала возможной картина стоячих волн, вдоль орбиты должно укладываться целое число длин волн:

$$n\lambda = 2\pi r.$$

3. Длина волны λ связана с p и, значит, v соотношением де Бройля. Это дает нам при учете второго требования еще одну зависимость между v и r. Объединив ее вместе с первой зависмостью, можно найти как v, так и r.

Если вас интересует только зависимость E от $1/n^2$, то алгебраические преобразования на данном этапе сводятся к следующему: второе и третье требования дают

$$nh/mv = 2\pi r, \qquad \text{т. е. } vr = nh/2\pi m.$$

Первое условие можно записать (умножив обе части на r^2) в виде

$$mv^2r^2 = kq_1q_2\,r.$$

Подставив вместо vr соответствующее выражение, найдем

$$mn^2\,(h/2\pi m)^2 = kq_1q_2r, \quad \text{или} \quad 1/r = 4\pi^2mkq_1q_2/h^2n^2.$$

Так как $E=-kq_1q_2/2r$, что было уже показано в методических указаниях к разделу 34.1, можно записать, что

$$E = -(kq_1q_2/2)\cdot(4\pi^2mkq_1q_2/h^2n^2) = -(2\pi kq_1q_2/nh)^2/2.$$

Таким образом, нами получен тот же результат, что и в напечатанной мелким шрифтом на стр. 249 части раздела 34.6. Правда, там алгебраические преобразования проводятся несколько иным способом. Как поясняется в Учебнике, этот очень простой результат, взятый в совокупности с фотонной гипотезой, выражает спектр водорода. Он объясняет в более фундаментальных понятиях, почему атом не может излучать непрерывно энергию и почему существует минимальная энергия ссновного состояния.

С учетом того, что проведенный здесь анализ картины с атомом водорода был вынужденно упрощенным, надо признать, что строгая правильность полученных ответов является до некоторой степени случайной. Такой же анализ дает в приложении к другим задачам (например, при определении энергетических уровней вращающейся двухатомной молекулы) только приближенные ответы. Да, в действительности ничего лучшего и нельзя было ожидать, поскольку мы пользова-

лись одномерной волновой моделью (рис. 34.10) применительно к трехмерной задаче. Однако никакого надувательства учащихся здесь не было допущено, потому что в данном случае налицо все элементы правильного анализа: 1) запись полной энергии в виде суммы кинетической и потенциальной энергий, как их дает классическая теория; 2) внесение де-бройлевской длины волны в классическое количество движения; 3) ограничение всех мыслимых волновых картин единственно возможными при простом самосогласовании, т. е. стоячими волнами. Существенная разница между более строгим решением и нашим приближением заключается в том, что на втором этапе мы заменили количество движения не отношением h/λ, а так называемым дифференциальным оператором, который позволяет получить полное трехмерное решение волнового уравнения. При надлежащем анализе пришлось бы прибегнуть к математическому аппарату, предполагающему решение дифференциальных уравнений с частными производными.

Существует по крайней мере еще одна довольно простая система, допускающая анализ на данном уровне познаний учащихся. Это так называемая жесткая двухатомная молекула, скажем, HCl. В этом случае атом хлора настолько массивнее атома водорода, что последний просто вращается вокруг первого, как это показано на рис. 99. Предположим, что атом водорода с массой m обращается вокруг атома хлора на заданном расстоянии a со скоростью v. Тогда условие самосогласования волны, связанной с атомом водорода, который движется по круговой орбите, запишется в виде $2\pi a=n\lambda$, где $n=1, 2, 3, \ldots$ Но $2\pi a=n\lambda=h/p$, где $p=nh/2\pi a$, а энергия вращения $E=p^2/2m=n^2h^2/8\pi^2ma^2$. Точное решение из волновой механики требует замены нашего n^2 произведением $n(n+1)$. Следует обратить внимание на то, что при больших значениях n оба ответа почти совпадают. Если принять $m=1{,}7\cdot10^{-27}$ кг и $a=10^{-10}$ м (в молекуле атомы почти соприкасаются друг с другом), то получится, что $E=3{,}2\cdot10^{-22}n^2$ Дж. Предположим, что при изменении n с 4 до 3 испускается фотон. Тогда энергия фотона должна составить

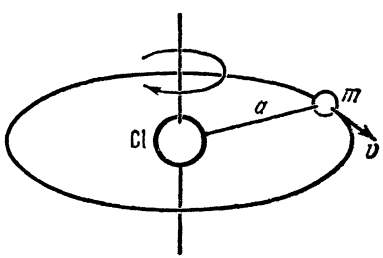


Рис. 99.

$$22{,}5\cdot10^{-22}\text{ Дж }[3{,}2\cdot10^{-22}\cdot(16-9)].$$

Его частоту найдем в виде

$$(22{,}5\cdot10^{-22})/(6{,}6\cdot10^{-34})=3{,}4\cdot10^{12}\text{ с}^{-1},$$

т. е. длина волны должна быть равной $0{,}88\cdot10^{-4}$ м. Это будет либо весьма длинноволновый инфракрасный фотон, либо весьма коротковолновый фотон в радиовещательном диапазоне. В действительности молекуле хлористого водорода присущ такой спектр. В ней переход от $n=4$ к $n=3$ фактически сопровождается испусканием фотона с длиной волны $1{,}2\cdot10^{-4}$ м.

Опыт IV.15 (*Спектр водорода и постоянная Планка*) надо ставить в связи с проработкой раздела 34.6. Он дает количественные сведения о первых трех спектральных линиях серии Бальмера для водорода. Эти данные достаточно точны,

чтобы служить экспериментальным подтверждением правильности расчета энергетических уровней атома водорода на основе волновой теории. Вместе с тем из этих спектроскопических данных можно определить постоянную Планка и сравнить найденное значение с величиной, полученной совершенно иным способом по фотоэлектрическому эффекту, как это было сделано нами в гл. 33.

34.7. Заключение

Цель. Бегло окинуть взором главные вехи на пройденном пути и заронить учащимся мысль о том, что главное в данном направлении еще впереди.

Методические указания. Проработать в порядке задания для внеклассного чтения.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам

В табл. 23 задачи распределены по степени их предположительной трудности и по разделам, к которым они относятся. Отдельно выделены задачи, предназначающиеся для разбора в классе. Особо рекомендуемые задачи отмечены значком #.

ТАБЛИЦА 23

Разделы	Со звездочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
34.1—34.3	1, 5, 6, 9	7, 8	2	3, 4	2
34.4	10—13	14	15, 16#, 17		16#
34.5, 34.6	18, 19, 23		20#, 22#	21#, 24#	20#

Краткие ответы

1*. 4,2 эВ.

5*. 6,67; 4,86 и 1,81 эВ.

6*. 1,81 эВ.

9*. Атом поглощает 4,68 эВ энергии от электрона и ничего не поглощает от фотона.

10*. —10,4 эВ.

11*. γ-линия лаймановской серии.

12*. а) 13,5 эВ; б) —0,136 эВ.

13*. а) Любую энергию от 10,2 до 12,1 эВ; б) 12,1 эВ; 10,2 эВ.

18*. Нет, потому что при единственном ограничении, чтобы $2d$ равнялось целому числу длин волн, существует бесконечное множество значений энергии, которые могла бы иметь частица.

19*. 10^{-17} Дж.

23*. Нет, потому что длину волны определяют из кинетической энергии электрона, а она не одинакова при $n=1$ и $n=3$.

Ответы с указаниями и решениями

2. Эта задача на закон сохранения энергии при электронных соударениях может проиллюстрировать и спектры испускания.

Электронные соударения. Поскольку электроны обладают большей кинетической энергией, чем это требуется для отрыва у атома одного электрона, возможен целый ряд явлений. Электрон способен возбудить дискретные состояния в процессе утраты 1,38 или 2,30 эВ своей энергии. Он может упруго отразиться без потери кинетической энергии. Если он ионизует атом, то электрон атома и бомбардирующий электрон поделят между собой остаточную кинетическую энергию.

Для отрыва электрона от атома нужно 3,87 эВ энергии, так что у них останется 0,13 эВ энергии (4—3,87=0,13).

Спектры испускания. Поскольку часть атомов находится в ионизованном состоянии, должны наблюдаться все линии спектра испускания. При встрече ионизованного атома с каким-нибудь медленным электроном, движущимся, например, с весьма небольшой кинетической энергией порядка $^3/_2\ kT$, где T есть температура паров цезия (см. раздел 25.2, при обычных температурах такая энергия остается в пределах ниже 0,1 эВ), такой электрон притянется результирующим зарядом иона. Последний может «захватить» его, благодаря чему электрон способен оказаться в любом дискретном возбужденном состоянии, испустив фотон необходимый для сохранения количества энергии величины. На рис. 100 представлена диаграмма, характеризующая все возможные фотоны, которые атом способен испустить при постепенном переходе в свое основное состояние.

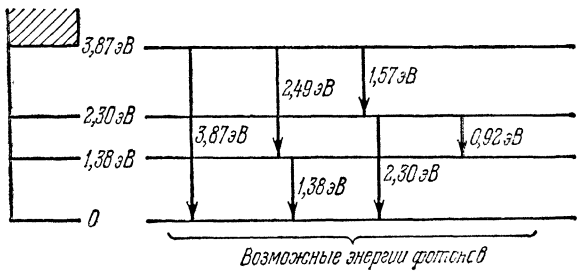


Рис. 100.

(На рис. 34.2 показаны лишь немногие энергетические уровни. Существуют многие другие уровни, разделенные небольшими промежутками, ниже энергии ионизации. Поэтому бомбардирующий электрон может потерять многие другие возможные порции энергии, испуская при этом фотоны многих других спектральных линий.)

3. Эта задача показывает, почему атомы обычно пребывают в состояниях с наинизшей энергией.

Электрон переходит в возбужденное состояние только тогда, когда кинетическая энергия отдельной газовой молекулы, равная $^3/_2\ kT$ (см. раздел 25.2), станет сопоставимой с энергией 19,8 эВ. В этом случае при соударении двух атомов их кинетическая энергия поступательного движения может пойти на возбуждение одного из них.

При такой энергии температура газа будет

$$T=\frac{2}{3}\left(\frac{E_к}{k}\right)=\frac{2\,(19{,}8\ эВ)\cdot(1{,}6\cdot 10^{-19}\ Дж/эВ)}{3\,(1{,}38\cdot 10^{-23}\ Дж/°К)}\approx 10^5\ °К.$$

Температура на поверхности Солнца составляет всего около 6000 °К, так что даже там атомы гелия находятся преимущественно в своем основном состоянии.

4. а) Неупругие соударения возможны только тогда, когда электроны подверглись разгону под действием разности потенциалов 4,9 В. Это достигается только в непосредственной близости к G_2.

б) Энергию 4,9 В электрон приобретает как раз к концу половины расстояния от G_1 до G_2. Ртутный пар может приобрести еще 4,9 эВ энергии от электронов на второй половине расстояния от G_1 до G_2. Электроны могут отдать энергию 6,7 эВ на последней трети расстояния от G_1 до G_2.

в) В данном случае электроны поступают в газ сквозь G_1 с энергией 10 эВ. Всякий электрон может потерять либо 4,9 либо же 6,7 эВ. Те электроны, которые лишились 4,9 эВ энергии, способны потерять еще 4,9 эВ. Поэтому справа от G_2 можно измерить следующие энергии электронов: 1) 10—0=10 эВ; 2) 10—4,9= =5,1 эВ; 3) 10—6,7=3,3 эВ; 4) 10—(2·4,9)=0,2 эВ.

г) В п. в) задачи электрон при вхождении в газ обладал достаточной энергией, чтобы вызвать и тот, и другой переходы. Однако в п. б) задачи всякий электрон

приобретал энергию 4,9 эВ к концу полурасстояния между G_1 и G_2, так что все такие электроны приобретали способность отдать это количество энергии, миновав G_2. Если не наблюдаются электроны с энергией 6,7 эВ, то это означает, что большинство электронов отдало 4,9 эВ энергии до достижения ими точки, в которой они могли бы приобрести 6,7 эВ, т.е. приблизительно пролетев две трети расстояния.

7. Как показано на рис. 101, возможны девять разных скачков температуры. Обратите внимание на то, что нет переходов с площадки C на площадку D. Это иллюстрирует то, что в действительности имеет место в атомах. Не все энергетические уровни в атоме связаны между собой посредством испускаемых фотонов, хотя эмиссия и возможна с энергетической точки зрения. Отсутствующие линии называются «запрещенными линиями».

8. а) $E = (1{,}24 \cdot 10^4 \text{ эВ} \cdot \text{Å})/5890 \text{ Å} = 2{,}1 \text{ эВ}$.

б) $$T = \frac{2}{3}\left(\frac{E}{k}\right) = \frac{2\,(2{,}1 \text{ эВ}) \cdot (1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/эВ})}{3\,(1{,}4 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/°К})} = 1{,}6 \cdot 10^4 \text{ °К}.$$

в) Хотя средняя кинетическая энергия молекулы в пламени газовой горелки соответствует температуре 2100 °К и эквивалентна 0,28 эВ, в пламени есть много молекул и с более высокой и с более низкой энергиями, в том числе и с энергией, в 10 раз превосходящей среднюю энергию, т.е. достаточной для возбуждения атомов натрия посредством соударений.

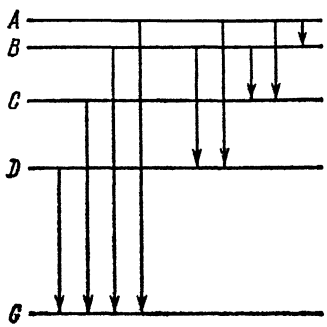


Рис. 101.

14. Из рис. 34.7, *а* видно, что энергии фотонов бальмеровской серии лежат в интервале от 1,9 (12,1—10,2) до 3,4 (13,6—10,2) эВ. Спектральные линии сгущаются к более высокому значению, которое соответствует длине волны λ, удовлетворяющей соотношению

$$\lambda = (1{,}24 \cdot 10^4 \text{ эВ} \cdot \text{Å})/3{,}4 \text{ эВ} \approx 3600 \text{ Å}.$$

15. Бальмеровская серия есть следствие изменений энергии при переходах с уровней более высокой энергии на уровень первого возбужденного состояния при 10,2 эВ. Крайняя линия этой серии отвечает переходу с 13,6 до 10,2 эВ, т.е. 3,4 эВ. Это дает длину волны

$$\lambda = (12\,400 \text{ эВ} \cdot \text{Å})/3{,}4 \text{ эВ} = 3600 \text{ Å},$$

которая находится за пределами видимой части спектра в сторону ультрафиолета.

Другой способ решения предполагает определение энергии нижней границы видимого спектра:

$$E = (12\,400 \text{ эВ} \cdot \text{Å})/4000 \text{ Å} = 3{,}1 \text{ эВ}.$$

Итак, видимы только переходы от 10,2+3,1=13,3 эВ и ниже. На рис. 34.7 видно, что в пределах этой области лежат только четыре линии. Более обстоятельно можно положить, что

$$13{,}3 \text{ эВ} \geqslant 13{,}6 \text{ эВ} - 13{,}6 \text{ эВ}/n^2_{\text{макс}},$$

т. е.

$$n^2_{\text{макс}} \leqslant 13{,}6/0{,}3 \approx 45, \text{ или } n_{\text{макс}} < 7.$$

Таким образом, видимые линии бальмеровской серии возникают при переходах со следующими изменениями n: $3 \to 2$, $4 \to 2$, $5 \to 2$ и $6 \to 2$.

16. а) Обратившись к рис. 34.7, *а*, можно убедиться в том, что лаймановская линия α появляется тогда, когда атомы водорода находятся в первом возбужденном состоянии. Бомбардирующие электроны должны в таком случае обладать

кинетической энергией, достаточной для возбуждения атома до этого состояния, т.е. 10,2 эВ.

б) Линия H_α возникает только тогда, когда атом переходит из второго возбужденного состояния в первое. Поэтому бомбардирующие электроны должны обладать энергией, достаточной для возбуждения атома во второе возбужденное состояние, т.е. 12,1 эВ.

в) Из второго возбужденного состояния атом может перейти либо в первое возбужденное состояние, либо же сразу в основное. Таким образом, в данном случае будут наблюдаться следующие три линии: лаймановская линия α, лаймановская линия β и линия H_α.

17. Эта задача на поглощение света помогает убедиться в том, почему же фотонами трудно возбуждать атомы водорода.

а) Атом надлежит перевести во второе возбужденное состояние (см. п. б) задачи 16), а для этого требуется энергия 12,1 эВ (см. рис. 34.7, *а*). Из текста, набранного мелким шрифтом на стр. 205, вычислим длину волны такого фотона в виде

$$\lambda = (1{,}24 \cdot 10^4 \text{ Å})/12{,}1 = 1{,}03 \cdot 10^2 \text{ Å}.$$

Такова энергия, и следовательно, длина волны лаймановской линии α, потому что она представляет собой ту линию, которая появляется при переходе электрона из второго возбужденного состояния непосредственно в основное состояние.

б) Самая большая длина волны соответствует тому фотону с наименьшей энергией, который атом еще способен поглотить. Такой фотон испускается при переходе в первое возбужденное состояние, для чего требуется энергия 10,2 эВ. Длина волны в этом случае найдется в виде

$$\lambda = 1{,}24 \cdot 10^4/10{,}2 = 1{,}22 \cdot 10^3 \text{ Å}.$$

Это есть как раз лаймановская линия α.

в) Энергия фотона линии H_α равна 12,1—10,2=1,9 эВ. Энергия фотона лаймановской линии α составляет 10,2 эВ. Отношение их длин волн есть величина, обратно пропорциональная отношению их частот (и энергий):

$$\frac{\lambda(H_\alpha)}{\lambda(\alpha)} = \frac{\nu(\alpha)}{\nu(H_\alpha)} = \frac{E(\alpha)}{E(H_\alpha)} = \frac{10{,}2}{1{,}9} = 5{,}4.$$

Это отношение можно также определить простым измерением энергий по длине стрелок, соответствующих этим линиям на рис. 34.7, *а*. Итак, длина волны фотона линии H_α будет

$$\lambda(H_\alpha) = 5{,}4 \cdot \lambda(\alpha) = 5{,}4 \cdot (1{,}22 \cdot 10^3 \text{ Å}) = 6{,}5 \cdot 10^3 \text{ Å}.$$

С учетом того, что длины волн обратно пропорциональны энергиям, приходим к выводу о том, что волны больших длин соответствуют переходам между высокими возбужденными состояниями и что лишь волны сравнительно коротких длин могут возникать при поглощении атомом в основном состоянии. Это положение и доказано в общем виде в настоящей задаче.

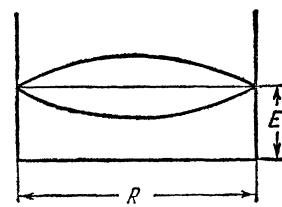


Рис. 102.

20. Данная задача поможет учащимся составить представление о порядке величины ядерной энергии по сравнению с атомной энергией (рис. 102).

а) $\lambda = 2R$; $p = h/\lambda = h/2R$.

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2}{8mR^2} = \frac{(6{,}6 \cdot 10^{-34})^2}{8 \cdot (1{,}7 \cdot 10^{-27}) \cdot (6 \cdot 10^{-15})^2} \text{ Дж} = 9 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} =$$

$$= (9 \cdot 10^{-13})/(1{,}6 \cdot 10^{-19}) \text{ эВ} \approx 5{,}5 \cdot 10^6 \text{ эВ}.$$

Это приблизительно в миллион раз больше атомных энергий. В этом заключается характерная разница между ядерными и атомными процессами. Этим же, напри-

мер, объясняется и то, почему атомные и термоядерные бомбы обладают гораздо большей мощностью, чем обыкновенные химические взрывчатые вещества.

б) Энергия E обратно пропорциональна квадрату радиуса R. Чем меньше R, тем больше E, причем энергия возрастает быстрее, чем уменьшается радиус. Чудовищные энергии, связанные с ядерными явлениями, как раз и объясняются малой величиной ядра. У нас получилось, что ядерная энергия приблизительно в 10^6 раз больше атомной. При этом надо учесть еще и то, что нейтрон в 2000 раз массивнее электрона, а этот фактор сам по себе еще уменьшает количество энергии во столько же раз.

21. Как было показано на стр. 244, выражение для энергии имеет следующий вид:

$$E = h^2/8md^2.$$

Следовательно,

$$E = \frac{44 \cdot 10^{-68}}{8 \cdot (9{,}1 \cdot 10^{-31}) \cdot 10^{-12}} = 6{,}1 \cdot 10^{-26} \text{ Дж} = 3{,}8 \cdot 10^{-7} \text{ эВ}.$$

Даже самые *большие* изменения энергии будут сопоставимы с самой наинизшей энергией, имеющей порядок 10^{-7} эВ. Такие изменения не обнаружимы при обычных температурах, соответствующих средним кинетическим энергиям порядка 10^{-2} эВ; даже при 10°К средняя кинетическая энергия атома равна приблизительно 10^{-3} эВ.

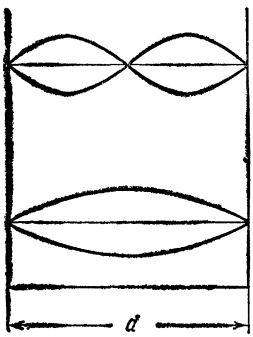


Рис. 103.

Учтите, что выражение $E=h^2/8md^2$ справедливо только для одномерного ящика. Для электрона в кристалле энергия E в три раза больше, потому что $p^2=p_x^2+p_y^2+p_z^2$. В данном случае мы интересовались, разумеется, лишь порядками величин.

22. Излученный фотон будет обладать энергией, равной $E_\Phi=E_2-E_1=3h^2/8md^2$. Поскольку $E_\Phi=h\nu_\Phi$, частота $\nu_\Phi=3h/8md^2$.

«Частота» заряженной частицы (классическая частота, с которой частица перелетает от стенки к стенке в ящике) просто равна $v_1/2d$, где v_1— классическая скорость, равная p_1/m (рис. 103). Таким образом, классическая частота частицы для основного состояния будет $p_1/2m_1d=2h/8m_1d^2$. Для первого возбужденного состояния она будет в два раза больше, потому что $p_2=2p_1$. Среднее для этих двух частот и есть просто фотонная частота. Не случайно эти частоты двух видов сопоставимы друг с другом по величине, но то, что даваемая волновой механикой частота равна арифметическому среднему двух наинизших «классических» частот, есть случайное совпадение.

24. а) Энергии для интересующих нас линий равны 10,2 эВ для α-линии и 12,1 эВ для β-линии лаймановской серии. Длины волн можно определить по формуле, выведенной на стр. 205:

$$\lambda_\alpha = 1{,}24 \cdot 10^4/10{,}2 = 1{,}22 \cdot 10^3 \text{ Å},$$

$$\lambda_\beta = 1{,}24 \cdot 10^4/12{,}1 = 1{,}03 \cdot 10^3 \text{ Å}.$$

(Эти же значения были нами найдены и при решении задачи 17.)

б) Интересующие нас длины волн представляют собой величины порядка 300 Å. В действительности первые две равны 303 и 256 Å. Обратите внимание на то, что $\lambda_\alpha/4=300$ Å; $\lambda_\beta/4=250$ Å. Таким образом, длины волн, показанные на рис. 34.11, просто равны четверти длин волн для водорода. Именно этого и следовало ожидать для однократно ионизованного гелия. Ядро гелия несет на себе два элементарных заряда, а высота энергетических уровней для водородоподобных атомов возрастает пропорционально квадрату ядерного заряда. (См. уравнение (5) на стр. 249.) Энергии, равно как и частоты фотонов, возросли в четыре раза, так что длины волн фотонов уменьшились в то же число раз.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Большая роль при изучении части IV курса отводится экспериментам. Предлагаемое в табл. 24 чередование лабораторных работ с изучением текста Учебника находится в соответствии с общим планом проработки части IV курса, рекомендованным во Введении на стр. 284.

ТАБЛИЦА 24

Номер	Опыт	Наиболее удобное время выполнения	Очередность
IV.1	Наэлектризованные тела	До изучения гл. 26	**
IV.2	Электростатическая индукция	В процессе проработки раздела 26.5	**
IV.3	Сила взаимодействия между двумя заряженными шариками	До изучения гл. 27	***
IV.4	Сложение электрических сил	После опыта IV.3	*
IV.5	Движущая сила и конечная скорость	До изучения раздела 27.4	**
IV.6	Опыт Милликена	До изучения раздела 27.5	**
IV.7	Заряд, переносимый ионами в растворе	После обсуждения раздела 28.3	**
IV.8	Заряд конденсатора	В процессе изучения гл. 29	**
IV.9	Энергия, преобразуемая электродвигателем	В процессе изучения гл. 29	*
IV.10	Магнитное поле тока	До изучения раздела 30.3	**
IV.11	Измерение индукции магнитного поля	После изучения раздела 30.4	***
IV.12	Масса электрона	После опыта IV.11 и обсуждения раздела 30.6	***
IV.13	Магнитное поле вблизи длинного прямого провода	До изучения раздела 30.9	**
IV.14	Неупорядоченность радиоактивного распада	В процессе или после изучения гл. 33	***
IV.15	Спектр водорода и постоянная Планка	В процессе проработки раздела 34.4	***

*** Необходимо
** Желательно
* Факультативно

IV.1. Наэлектризованные тела

Этот опыт не требует много времени и сложного оборудования, так что его можно провести дома. Лучше всего его поставить перед изучением гл. 26. Если ваши учащиеся уже знакомы с простым поведением положительно и отрицательно заряженных тел, то данный опыт можно провести как демонстрационный. Во всяком случае он готовит учащихся к трем следующим опытам, которые предполагают знакомство с началами электростатики.

Успешное проведение опытов IV.1—IV.4 во многом зависит от относительной влажности в лаборатории. Если она не превосходит приблизительно 50%, то опыты удадутся, если же относительная влажность выше приблизительно 80%, заряды станут стекать с изоляторов, что затруднит проведение этих лабораторных работ. Чтобы ослабить утечку при высокой влажности, храните экспериментальную установку в большом шкафу, нагреваемом электрической лампочкой, или в теплой комнате и вынимайте его непосредственно перед экспериментированием. Винилит, приобретающий отрицательный заряд при натирании сухой шерстью, и ацетилцеллюлоза, заряжающаяся положительно при натирании сухой хлопчатобумажной тканью, накапливают большие заряды и удобнее в таких опытах, чем бакелит или другие пластики, когда налицо высокая влажность. Но при загрязнении поверхности пластика сохранить заряд на натертой пластмассовой полоске уже трудно. Заряд с винилита или ацетилцеллюлозы рукой почти не снимается. Для того чтобы снять с полоски из этих материалов заряд, достаточно ее быстро провести над пламенем.

К лапке штатива можно подвесить две разные полоски. Они не должны соприкасаться друг с другом. Подвесить их нужно на достаточном удалении от металлического штатива, чтобы предотвратить их взаимодействие между собой и с наведенными в штативе зарядами.

Учащиеся могут обнаружить самостоятельно, что заряженная пластмассовая полоска всегда притягивает незаряженную, хотя на этот эффект обратить их внимание полагается к концу опыта. Подобное индукционное притяжение не легко понять, пока не будет проработан материал об индукции в Учебнике и не поставлен опыт IV.2. Объяснение же лучше, пожалуй, отложить до более позднего времени.

Ответы на вопросы

Винилитовая полоска, натертая шерстью, отталкивает другую такую же натертую винилитовую полоску и притягивает полоску из ацетилцеллюлозы, натертую хлопчатобумажной тканью. По-видимому, существуют по крайней мере два вида электрического заряда.

Если подвести ацетилцеллюлозу, натертую хлопчатобумажной тканью, к другой подобным же образом заряженной полоске, то по ее поведению можно заключить, что одноименные заряды отталкивают друг друга, а разноименные взаимно притягиваются.

Шерсть, которая зарядила винилит, имеет не такой заряд, как винилит. Поднеся шерсть к ацетилцеллюлозе, можно убедиться в том, что они взаимно отталкиваются и, видимо, заряжены одинаково. На этом этапе тот или иной учащийся может высказать предположение, что существуют заряды двух видов, которые можно поименовать a и b, p и q или же положительные и отрицательные. Исходя из этого предположения, он попытается затем объяснить все последующие наблюдения.

Почти всякий более или менее хороший изолятор при натирании заряжается в какой-то степени, так что учащиеся смогут установить характер его заряда как одинаковый или противоположный по действию на заряженную винилитовую полоску или полоску из ацетилцеллюлозы.

Из данного опыта можно сделать следующие общие заключения:

1) существуют заряды двух видов;

2) одинаковые заряды отталкиваются, а противоположные притягиваются друг к другу;

3) два нейтральных тела при потирании друг о друга приобретают от соприкосновения противоположные заряды.

Не имеет значения, какой заряд назвать положительным и какой отрицательным (или «*a*» и «*b*»).

Если учащиеся не имеют навыков в обращении с электричеством, то от них нельзя ожидать правильного ответа на вопрос о том, почему притягивается незаряженная бумага или кусок нитки. А такой вопрос надо перед ними поставить, чтобы просто довести до их сознания, что не все обстоит так просто, как это кажется с первого взгляда.

Учащихся нужно поощрить к попыткам заряжать различные вещества натиранием тем или иным материалом. Они должны прийти к выводу, что не столь просто правильно предсказать, какой заряд приобретает вещество x при натирании материалом y. И они будут правы! На самом деле в зависимости от влажности и чистоты поверхности одно и то же вещество можно зарядить положительно или отрицательно при натирании тем же самым материалом.

Разницу между изоляторами и проводниками можно уяснить, заставив учащихся попытаться заряжать металлические прутки. Заряд утекает сразу же по мере его образования; но если натертый металлический пруток держать хорошим изолятором, то он зарядится подобно пластику, но с той разницей, что заряд растечется равномерно по всему прутку, а не останется локализованным на одном месте, как это наблюдается в случае с изолятором.

Приборы и принадлежности: 1 кусок хлопчатобумажной ткани; 1 кусок шерстяной ткани; 2 полоски ацетилцеллюлозы; 2 полоски винилита; 1 штатив высотой около 90 см; 1 металлический пруток длиной около 60 см; 1 зажим; изоляционная лента.

Некоторые полезные советы о пользовании полиэтиленовой изоляцией с малым молекулярным весом. В условиях высокой влажности заряд утекает по поверхности обычно хороших изоляторов, потому что пыль и грязь на поверхности поглощают влагу, образуя тонкий проводящий поверхностный слой. Полиэтилен с малым молекулярным весом менее подвержен загрязнению, чем многие другие изоляторы, так что в условиях высокой влажности он лучше сохраняет заряд, *если его поверхность содержать в чистоте.*

Полиэтилен с малым молекулярным весом — воскообразное вещество, по внешнему виду и консистенции напоминающее парафин. Хотя по твердости и прочности он превосходит парафин, в этом отношении он уступает бакелиту и прочим распространенным пластмассовым изоляторам. Его можно расплавить в чистой ванночке при температуре 112°С и залить им после достаточного разжижения цилиндрические, плоские и иные формы. При остывании он дает усадку, что облегчает выемку отливок из форм. Нельзя пользоваться обесцветившимся от перегрева полиэтиленом.

Подобно всем изоляторам он нуждается после отливки в чистоте хранения. Загрязнившиеся отливки, обнаруживающие значительную утечку электричества,

можно очистить промывкой в мыльной воде, соскоблив после этого весь поверхностный слой ножом.

Материал легко пилится и обрезается. Отверстия глубиной приблизительно до 25 мм легко высверливаются. Более глубокие отверстия нужно сверлить медленно, чтобы избежать размягчения материала и наволакивания на сверло. Лучше всего сверлить с остановками, вынимая сверло для очистки.

IV.2. Электростатическая индукция

Понять электростатическую индукцию учащимся не легко. Пожалуй, лучше всего этот опыт поставить одновременно с прохождением соответствующего материала из Учебника или вскоре после этого. Однако наиболее одаренные учащиеся могут всерьез заинтересоваться электростатической индукцией еще до изучения этого явления. Назначение данного опыта состоит в том, чтобы ознакомить учащихся с разделением и переносом зарядов. В последней части опыта они познакомятся с поведением и пользованием электроскопом.

Если нет в наличии металлических стержней длиной около 15 см и диаметром 1 см, то можно взять другие подходящие предметы, например, ложки, столовые ножи, отрезки металлических труб и т. п. Можно воспользоваться и проволоками, но их емкость столь мала, что они слабо отклоняют подвешенную фольгу. Во всяком случае избегайте пользоваться предметами с остриями и лезвиями, потому что они способствуют возникновению коронного разряда или проскакиванию искры между такими предметами и заряжающими пластиковыми полосками. Если такие эффекты случились, то стержни надлежит разрядить и опыт повторить.

В условиях высокой влажности может потребоваться подложить под стержни прокладки из полиэтилена с малым молекулярным весом.

Знак заряда на электроскопе можно определить, поднеся поближе к прибору заряженные полоски из винилита или ацетилцеллюлозы.

К небольшим отклонениям чувствительнее всего электроскоп с листочками. Если его зарядить настолько, что листочки разойдутся более чем приблизительно на 45°, он почти не реагирует на другой не сильно заряженный предмет, когда его подводят к прибору почти вплотную.

При достаточности времени учащиеся могут попытаться провести следующий вариант опыта по индукционному разделению зарядов: зарядить два изолированных металлических стержня посредством индукции, как в первой части опыта, затем зарядить один электроскоп от одного стержня и другой от другого. Если затем выводы электроскопов соединить, то они полностью разрядятся. Чтобы установить это со всей определенностью, нужны довольно чувствительные приборы.

Учащимся можно рассказать о том, что когда к заряженным телам пристают кусочки изоляционных материалов, вроде бумаги и ниток, притяжение обусловлено прежде всего разделением заряда, как в проводнике, а не поляризацией, т. е. разведением зарядов в отдельных молекулах. Совершенный изолятор обнаружит лишь слабое притяжение вследствие поляризации. В обычных изоляторах существует достаточная проводимость, так что большее разделение заряда посредством проводимости маскирует эффекты поляризации.

Приборы и принадлежности: 2 металлических стержня длиной по 15 см; 2 химических стакана (по 200—500 мл); 1 кусок хлопчатобумажной (или шерстяной) ткани; 1 полоска ацетилцеллюлозы (или винилита); 1 штатив высотой 90 см; 1 пруток длиной 60 см; 1 подвижный зажим; нитки; алюминиевая фольга; тонкая изоляционная лента; несколько электроскопов; при проведении опыта в условиях высокой влажности 4 изолятора и 1 конденсатор (20 кВ, 500 пФ); индукционная

катушка высокого напряжения; 4 сухих элемента по 1,5 В каждый; 3 куска монтажной проволоки длиной по 15 см.

Искровая индукционная катушка высокого напряжения. В условиях высокой влажности или при необходимости обеспечить высокое зарядное напряжение можно в качестве источника заряда пользоваться искровой индукционной катушкой высокого напряжения. Не пытайтесь объяснить ее устройство и принцип действия, оставьте ее для учащихся как «черный ящик».

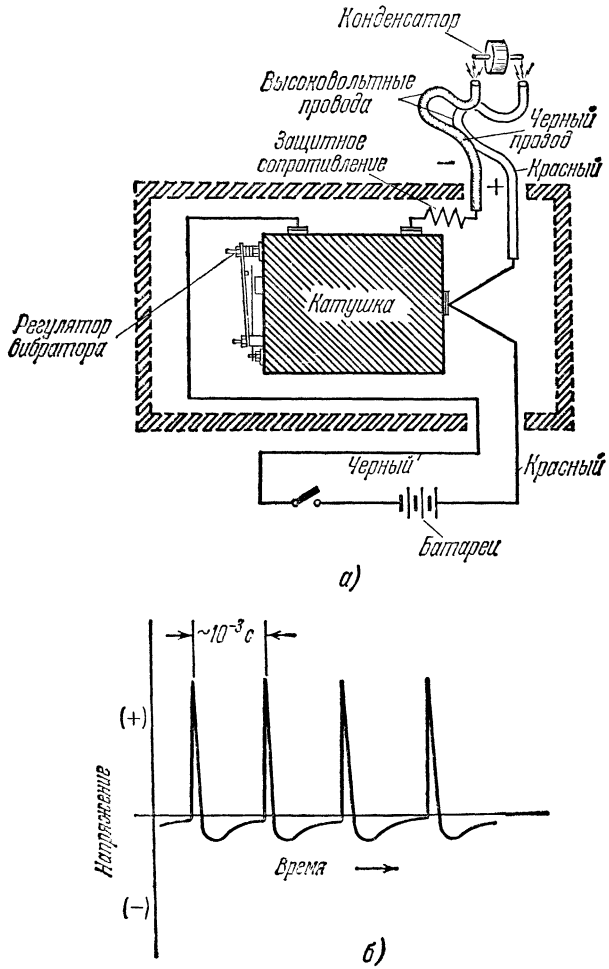


Рис. 104

Подсоедините катушку к батарее или аккумулятору на 6 В через защитное сопротивление на 5—10 МОм, как показано на рис. 104, *а*. Катушка и сопротивление должны находиться в закрытом ящике с доступом только к изолированным выводам высокого напряжения.

Конденсатор высокого напряжения (20—30 кВ, 500 пФ) используется обычно для накопления заряда от индукционной катушки. Затем его используют для заряжения нужного предмета прямым соприкосновением.

Чтобы зарядить конденсатор, возьмите его за корпус и приведите его выводы в соприкосновение с выводными проводами высокого напряжения катушки, пока действует ее вибратор. Отведите конденсатор от катушки; при этом с его выводов должны проскакивать искры. Вибратор следует выключить уже после того, как убран конденсатор. Теперь последний заряжен до потенциала около 3000 В. Его вывод, на который проскакивали искры с красного высоковольтного провода, будет заряжен положительно, а другой вывод — отрицательно. Возьмитесь за один из выводов *(но никак не за оба вывода одновременно)* в зависимости от того, какой из них вы хотите заземлить, и дотроньтесь другим до электроскопа или того предмета, который вы намерены зарядить. При полном заряде конденсатор способен полностью заряжать нейтральный электроскоп почти до полного отклонения приблизительно 40 раз подряд.

Переменный ток, создаваемый индукционной катушкой, асимметричен: пиковое напряжение за одну половину цикла много раз выше пикового напряжения за вторую половину цикла (рис. 104, *б*). Когда конденсатор отводят от выводов работающей катушки, искры продолжают проскакивать все то время, пока выводы конденсатора не удалятся почти на целый сантиметр от выводов катушки. На таком удалении конденсатор заряжен только за полупериод с более высоким напряжением (довольно сильным, чтобы создавать искры с пробоем воздушного промежутка). В итоге всякий раз, когда конденсатор отводится от выводов работающей катушки, он заряжается до одной и той же полярности и почти до одного и того же потенциала. Переключение полюсов батареи приводит к обращению асимметрии и перемене полярности выводов катушки.

Катушку можно использовать непосредственно для заряжения электроскопов и иных предметов посредством проскока искры. Конденсатор служит лишь удобным переносимым источником заряда.

Когда требуется напряжение выше 3000 В, это напряжение можно удвоить последовательным соединением двух конденсаторов и их последовательным заряжением один за другим. Тем же самым способом напряжение можно и утроить.

IV.3. Сила взаимодействия между двумя заряженными шариками

Это очень важный опыт, который не следует опускать, если влажность воздуха не слишком высока. Если его поставить до перехода к изучению гл. 27, учащиеся сами убедятся в том, что электрические силы имеют природу обратной пропорциональности квадрату расстояния.

Опыт относится к числу тонких и трудных, так что его результаты лучше, пожалуй, проанализировать дома. Целесообразно провести несколько предварительных проб с записью данных, но без их анализа, чтобы затратить на заключительную попытку как можно меньше времени, пока утечка заряда не стала чрезмерной.

При условиях весьма высокой влажности можно воспользоваться экспериментальной установкой с шариками из бузины и прогреть изнутри коробку в течение трех минут лампой инфракрасного излучения (типа рефлектора) перед постановкой опыта. Если действие такого прогревания исчезает до того, как учащиеся успеют записать экспериментальные данные, прогревание инфракрасной лампой полезно повторить.

Шарик из сердцевины бузины покрывают коллоидной суспензией графита в спирте или тушью. (Алюминиевая краска *плохо* проводит электричество.) Шарик подвешивают на очень тонкой нейлоновой нити, потому что нейлон является очень хорошим изолятором, а сама нить весит много меньше шарика. Если нить тяжела, то подвес искривится при отклонении шарика. По мере увеличения отклонения изгиб будет становиться все больше, а горизонтальное отклонение перестанет быть

пропорциональным силе. Это сделает ошибку опыта слишком большой. Нейлоновую нить можно распрямить предварительным растяжением вручную. Затем шарик прикрепляют к нити, продев ее через прокол в шарике, сделанный тонкой иглой. Нанесите каплю клея на нить и протяните ее через шарик, чтобы клей проник в прокольное отверстие. После того как клей засохнет, короткий выступающий конец нити можно отрезать. В случае бифилярного подвеса обе нити должны выходить из шарика с одной стороны. В условиях высокой влажности эти нити целесообразно прикрепить к полоскам из полиэтилена малого молекулярного веса. Подвижную стойку для подвеса тоже надлежит изготовить из надежного изоляционного материала.

Обоим шарикам сообщают заряды одинакового знака по проводнику от электрофорной машины. Если шарикам сообщить заряды разных знаков, то они станут притягивать друг друга, могут вместе совершать колебания, прикоснуться друг к другу и разрядиться, что затруднит проведение опыта и сделает его результаты менее надежными. Оба шарика должны находиться на одинаковой высоте над основанием. При отсчете их координаты они должны находиться на достаточном удалении от стенок коробки, руки или других предметов, чтобы снизить погрешность от действия наведенных зарядов.

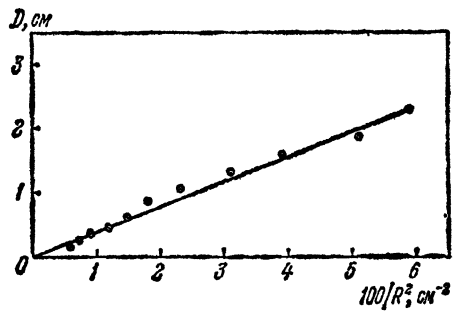


Рис. 105.

Учащимся может показаться, что в том случае, когда они подводят шарики очень близко друг к другу, закон обратной пропорциональности квадрату расстояния не соблюдается. Это объясняется тем, что этот закон справедлив для точечных зарядов. Шарики же ведут себя как точечные заряды только тогда, когда расстояние между ними составляет несколько их диаметров. При значительном сближении шарики перестают вести себя как точечные заряды из-за разведения зарядов на шариках под действием индукции (рис. 105).

Поскольку расстояние между соответствующими сторонами шариков равно расстоянию между их центрами, отсчет координат шариков проводят по этим сторонам, что объясняется бóльшей точностью определения положения этих сторон, чем центров.

Ответы на вопросы

К концу опыта шарик, укрепленный на изолирующем держателе, можно вернуть в исходное положение, когда был произведен первый отсчет. Если за время опыта случилась утечка заряда, то отклонение подвешенного шарика станет меньше, чем было на первых порах.

Графическое изображение сил в зависимости от расстояния не даст, разумеется, учащимся с первого взгляда представления об алгебраической форме функции. Однако сила на любом расстоянии r должна быть близка к $^1/_4$ силы на расстоянии $^1/_2\ r$ и $^4/_9$ силы на расстоянии $^2/_3\ r$. Это дает основания предполагать обратно пропорциональную зависимость квадрату расстояния, причем график F в функции $(1/r)^2$ должен давать прямую линию.

Приборы и принадлежности: 1 прибор для проверки закона Кулона, состоящий из коробки с зеркалом, шкалы отсчета, основания, крышки и шариков диаметром 0,5 см; нейлоновые нити; пластмассовая полоска с натирающей тканью; дисковая электрофорная машина с ручкой; 2 блока с шариками на изоляционных стержнях; спиртовая суспензия графита.

IV.4. Сложение электрических сил

В задачу данного опыта входит выявление векторной природы электрических сил. Это — важное понятие. Тем не менее этот опыт не относится к первоочередным, потому что поставить его и проанализировать экспериментальные результаты

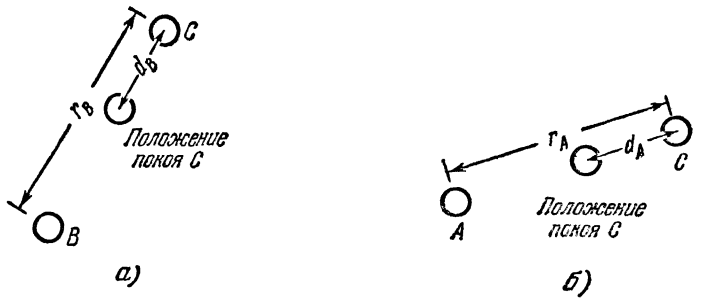


Рис. 106.

трудно. Утечка заряда ограничивает точность опытных данных в лучшем случае величиной 10%.

Утечку заряда в процессе опыта нужно проверять тем же самым способом, что и в опыте IV.3. Учащиеся должны регистрировать положение тени от подвешенного шара на миллиметровке снаружи коробки, так что необходимости забираться в нее в данном случае нет.

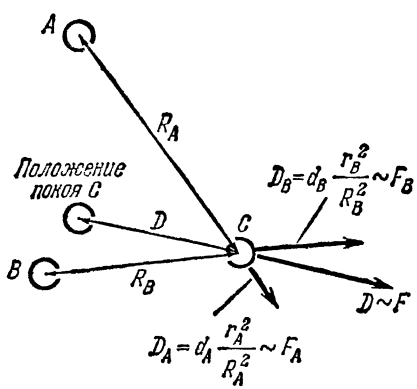


Рис. 107.

Если используются оба шарика A и B одновременно, то расстояние между A и C (или B и C) будет иным, чем в том случае, когда один шарик A или один шарик B взаимодействует с шариком C. Чтобы вычислить силы взаимодействия между A и C и между B и C при этих новых расстояниях, учащимся придется прибегнуть к закону обратной пропорциональности квадрату расстояния. Отнюдь не исключена целесообразность изложения классу следующего способа анализа.

Измерим сначала отклонение шарика C под действием силы со стороны одного только шарика B (рис. 106, *а*): при расстоянии r_B определим отклонение d_B. Подобным же образом измерим отклонение шарика C под действием силы со стороны одного только шарика A (рис. 106, *б*) и определим отклонение d_A при расстоянии r_A.

Если же на шарик C действуют силы со стороны обоих шариков A и B, то измерим отклонение D при расстояниях R_A и R_B (рис. 107). (Обратите внимание на то, что когда оба шарика A и B действуют на шарик C, то они занимают уже иные положения, чем при их раздельном действии на шарик C.)

Воспользовавшись законом Кулона, можно силу F_A, с которой шарик A действует на шарик C в присутствии шарика B, выразить через силу f_A, с которой он действует на шарик C, когда шарика B нет, в следующем виде:

$$F_A/f_A = r_A^2/R_A^2.$$

Поскольку силы пропорциональны отклонениям, запишем

$$F_A/f_A = D_A/d_A = r_A^2/R_A^2,$$

где D_A есть отклонение шарика C, когда шарики A и C были разделены расстоянием R_A, а шарика B не было. Отклонение D_A непосредственному измерению, разумеется, не подлежит, потому что шарики A и C находятся на расстоянии R_A друг от друга только тогда, когда присутствует шарик B.

Подобным же образом можно записать для шарика B соотношение

$$D_B/d_B = r_B^2/R_B^2.$$

Два предположительных отклонения D_A и D_B, которые пропорциональны силам действия со стороны шариков A и B, представляют собой компоненты вектора результирующего отклонения D для шарика C. Найдя векторную сумму D_A и D_B, можно сравнить ее с экспериментально определенным отклонением D.

Ответы на вопросы

Чтобы измерить силу действия только одного заряда, другой заряд нужно отвести в бесконечность. Практически «бесконечность» означает такое удаление, при котором сила действия со стороны удаляемого заряда становится достаточно малой, скажем, составляющей 1% силы, оказываемой исследуемым зарядом. Это условие выполняется в том случае, когда расстояния относятся друг к другу приблизительно как 10 : 1. Для этого достаточно один заряд удалить из коробки.

Заряды, наведенные на руке, станут отклонять подвешенный шарик. Руки надо убирать подальше от коробки, чтобы не возмущать положение подвешенного шарика.

Анализ на основе закона обратной пропорциональности квадрату расстояния позволяет сделать вывод о том, что сложение электрических сил есть векторное сложение.

Приборы и принадлежности: 1 прибор для проверки закона Кулона, состоящий из коробки с зеркалом, шкалы отсчета, основания и крышки, шариков диаметром 0,5 см; нейлоновые нити; пластмассовая полоска с заряжающей тканью; дисковая электрофорная машина с ручкой; 2 блока с шариками на изоляционных стержнях; спиртовая суспензия графита; 1 точечная лампочка с патроном и шнуром; штатив высотой 60 см; 1 зажим для баллона; 1 подвижный зажим; транспортир; линейка; миллиметровка.

IV.5. Движущая сила и конечная скорость

Этот опыт предназначается для того, чтобы ознакомить учащихся с прибором Милликена, помочь им освоиться с измерениями подобного рода и привести доводы в пользу пропорциональности конечной скорости движущей силе. В опыте сначала устанавливается, что шарики быстро приобретают конечную скорость и

затем движутся с постоянной скоростью. Затем показывается, что эта постоянная конечная скорость прямо пропорциональна движущей силе.

Опыт лучше всего проводить двум учащимся. Один из них должен следить за шариком, пуская и останавливая секундомер, когда тот проходит контрольные метки. Второму же надлежит записывать показания секундомера, следить за направлением движения и тем, заряжены ли пластины. Надо обратить внимание на то, что микроскоп не только увеличивает, но и перевертывает изображение. Поэтому при рассмотрении будет казаться, что шарики под действием силы тяжести «падают вверх».

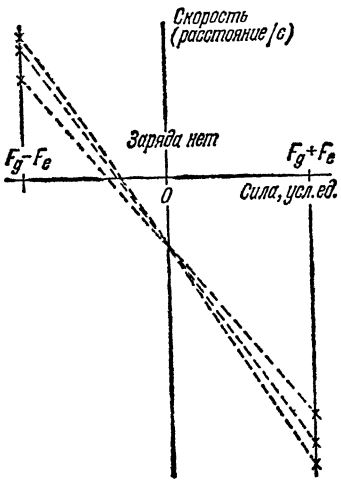


Рис. 108.

Шарики вводят в пространство между пластинами в виде водной суспензии (10% шариков), разбавленной водой в пропорции 1 : 2. Для обеспечения хороших результатов в распыляющую грушу достаточно влить до чайной ложки разбавленной суспензии. Разбавленную суспензию нужно слить в чистую бутыль и хранить для будущих нужд. Груша и особенно насадок требуют частой очистки. В этих целях грушу нужно несколько раз прополоскать чистой водой, а насадок продуть водой, пока брызги не станут чистыми.

Пластины нужно заряжать от сети постоянного тока через хороший фильтр или от батареи приблизительно на 500 В. По соображениям безопасности импеданс источника должен быть максимально высоким. Расход тока мал, потому что единственной нагрузкой является делитель напряжения между пластинами на 10 МОм. В качестве источника с успехом можно пользоваться и последовательно соединенными 5—6 батареями по 90 В. При этом обязательно нужно убедиться в надежности изоляции, а последовательно с батареями на выходе поставить сопротивление в 1 МОм в целях повышения импеданса источника.

Опыт лучше всего проводить в затемненной комнате; контрастность между шариком и фоном можно отрегулировать поворотом осветителя вокруг его оси.

Ответы на вопросы

Шарики станут двигаться в поле зрения вверх.

Все шарики будут двигаться в одном направлении. Никакого ускорения наблюдаться не будет, а шарики будут двигаться с постоянной скоростью.

При среднем положении переключателя на шарики действуют только сила тяжести и сопротивление воздуха. Эти силы равны и противоположны по направлению.

Если же теперь на пластины подать заряд, то при заряжении пластин некоторые шарики станут двигаться быстрее, некоторые медленнее, а некоторые переменят направление своего движения.

При перемене направления электрического поля бóльшая часть шариков начнет двигаться в обратном направлении.

Значение v^+ больше, чем конечная скорость при действии одной силы тяжести, тогда как v^- меньше. Часто v^- имеет обратное направление.

Всякий график представляет собой прямую линию (рис. 108). Одна линия отличается от другой своим наклоном, потому что на шариках имеются разные заряды.

Скорость прямо пропорциональна движущей силе.

Приборы и принадлежности: прибор Милликена; секундомер; источники питания (сеть постоянного тока на 500 В и источник переменного тока на 6,3 В для осветителя).

IV.6. Опыт Милликена

В данном опыте учащийся производит измерения скоростей ряда крохотных пластмассовых шариков, движущихся в электрическом поле. Из опыта выясняется, что скорости группируются вокруг целочисленных кратных определенной единичной скорости; это дает основания полагать, что и заряды представляют собой целочисленные кратные какого-то единичного заряда.

Опыт проводится на той же самой аппаратуре, что и в предыдущем случае. Следовательно, на него распространяются те же самые рекомендации и предостережения. И в данном случае важно опыт проводить вдвоем. Надо отметить, что нет необходимости производить измерения скоростей свободно падающих шариков. Однако целесообразно произвести несколько измерений (скажем, три) на каждом шарике и усреднить их результаты.

Напомните учащимся о необходимости сначала предоставить возможность полю «угнать» шарики, которые движутся слишком быстро, чтобы позволить провести точное хронометрирование, а также шарики, несущие слишком много зарядов, чтобы показать дискретность заряда. Через некоторое время в поле зрения останутся лишь отдельные шарики. Лучше всего прослеживать движение самых медленных шариков. Выбрав шарик, учащийся шаг за шагом следит за его движением, меняя каждый раз направление поля посредством переключателя. Учащийся, следящий за шариками, работает с секундомером, тогда как его напарник снимает показания секундомера и записывает результаты (учащийся, наблюдающий за шариками, должен в это время не упускать из поля зрения исследуемый шарик).

Раз оптика настроена и шарики ясно видны в виде светлых точек, единственная действительная трудность заключается в истолковании экспериментальных результатов. Проще и непосредственнее всего откладывать результаты в виде столбчатой диаграммы (гистограммы) в произвольном масштабе по горизонтальной оси и в масштабе, который пропорционален скоростям, измеренным для разных шариков в электрическом поле заданной напряженности, по вертикальной. Но такой непосредственный способ нельзя признать лучшим по двум причинам: 1) вес шариков создает как бы своеобразный силовой фон во всех измерениях; 2) осколки или конгломераты шариков имеют неодинаковый вес и разную форму, что делает гравитационный фон неоднородным, размывая тем самым сигнал.

Предлагаемый здесь способ анализа устраняет оба этих недостатка. Он заключается в следующем. Скорость, определяемая как разность $v^+ - v^-$, пропорциональна $2F_e$, ибо $(F_g + F_e) - (F_g - F_e) = 2F_e$. Иными словами, она зависит только от электрической силы. Но построение столбчатой диаграммы разности $v^+ - v^-$ не устраняет всех затруднений. Мы не избавились пока, например, от той неопределенности, которая обусловлена тем, что сопротивление воздуха конгломератам и осколкам шариков иное, чем его сопротивление одиночному целому шарику.

Если же теперь взять *сумму* скоростей $v^+ + v^-$, то она будет пропорциональна $(F_g + F_e) + (F_g - F_e) \sim 2F_g$. Тем самым нами найдена величина, которая представляет собой меру массы. Если произвести такое суммирование для всех шариков, то станет ясно, что существует одно чаще всех других встречающееся значение массы с двумя вариантами в направлении завышения, с одной стороны, и в сторону занижения, с другой. Если отбросить варианты, то остальные данные станут относиться к отдельным целым шарикам.

Ответы на вопросы

Разность $v^+ - v^-$ пропорциональна $(F_g + F_e) - (F_g - F_e) = 2F_e$. Поскольку F_e зависит только от заряда, разность $v^+ - v^-$ годится в качестве меры заряда.

Быстрой проверкой можно установить, что несмятый листок бумаги имеет конечную скорость много меньше, чем скомканный наподобие шарика такой же листок. Весьма маловероятно, чтобы осколок шарика имел сферическую форму. Конгломерат шариков должен по всей вероятности обладать совершенно иной формой, нежели одиночный шарик, так что разность $v^+ - v^-$ для отдельных шариков должна быть иной, нежели разность $v^+ - v^-$ для конгломератов даже в том случае, когда они обладают одинаковым зарядом.

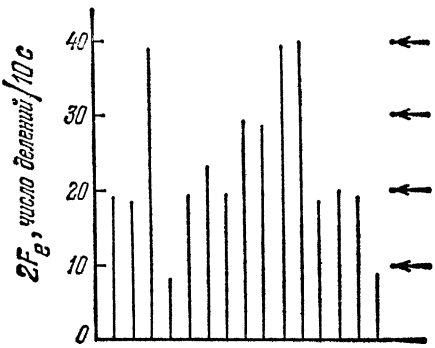


Рис. 109.

Сумма $v^+ + v^- \sim (F_g + F_e) + (F_g - F_e) \sim 2F_g$. Величина $2F_g$ есть мера массы, позволяющая нам отбросить экспериментальные результаты для конгломератов и осколков шариков.

На рис. 109 приведены результаты для одной серии показаний. Группирование показаний около целочисленных кратных наименьшей скорости служит убедительным доводом в пользу существования природной единицы заряда. В данной серии наблюдений наименьший заряд состоит из одного элементарного заряда. Если бы на пробном шарике отсутствовали одиночные заряды, то отношение двух наинизших скоростей составляло бы 3 : 2, а не 2 : 1.

Скорости, соответствующие одному элементарному заряду, могут меняться с переходом от одной серии данных к другой из-за незначительных вариаций промежутка между пластинами и разности потенциалов. Таким образом, чтобы сгруппировать воедино показания для целого класса, каждую серию данных необходимо нормировать, выразив их через скорости, соответствующие одному элементарному заряду.

Приборы и принадлежности: прибор Милликена; секундомер; источники питания (сеть постоянного тока на 500 В и источник переменного тока на 6,3 В для осветителя).

IV.7. Заряд, переносимый ионами в растворе

Это единственный опыт, который непосредственно касается атомарности (дробности) электрических зарядов, благодаря чему он отнесен к категории первоочередных. Его следует поставить после обсуждения раздела 28.3.

Разбавленную кислоту лучше всего приготовить до начала лабораторных работ. Не забудьте, что кислоту полагается медленно подливать в воду. Когда разбавляют концентрированную серную кислоту, выделяется большое количество теплоты. Если к кислоте приливать воду, то это приводит к разбрызгиванию. Предупредите учащихся о необходимости осторожного обращения с кислотами.

Анод нужно вырезать из очень тонкого листа меди, чтобы небольшая убыль его массы, наблюдающаяся при рекомендованных для опыта значениях силы тока и времени, образовывала разумную долю его исходной массы. Пайка соединений с анодом и катодом может стать причиной вредных химических реакций. Чтобы избежать погружения припоя в электролит, аноду нужно придать форму, показанную на рис. 110. В этом случае достаточно длинную узкую полоску анода можно вывести за край ванночки, придав ей нужный выгиб. Для подсоединения к катоду обмотайте медную проволоку вокруг его конца и плотно прижмите ее к электроду плоскогубцами. Медная подводка к катоду должна быть снабжена водонепроницаемой пластмассовой изоляцией, чтобы не допустить выделения водорода в кислоте вне колбы.

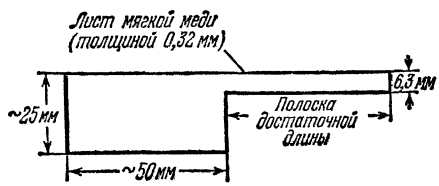


Рис. 110.

Оба медных электрода нужно очистить с поверхности мелким песком и затем начисто вытереть. Анод *после* очистки нужно взвесить. После окончания опыта анод требуется вымыть и ополоснуть водой, вытереть мягкой ветошью и затем тщательно высушить. Если анод покрылся коричневым налетом, то его нужно стереть, не прибегая к соскабливанию, чтобы предотвратить потерю меди.

Источник питания должен допускать отбор тока силой 5 А при напряжении около 12 В. Убыль массы анода составит около 1,5 г, если через раствор пропускать ток силой 5 А в течение приблизительно 5 мин. За это же время скопится около 500 $см^3$ водорода. Точность опыта требует определения убыли массы лишь до двух значащих цифр.

Если учащиеся достаточно знакомы с общими законами газового состояния, то они могут внести поправки на давление и температуру. Полное давление в колбе состоит из парциальных давлений насыщенного водяного пара и истинного давления водорода. Для определения последнего из полного давления необходимо вычесть давление насыщенного водяного пара. В табл. 25 приведены данные, характеризующие зависимость насыщенного водяного пара от температуры.

ТАБЛИЦА 25

Температура, °С	15	20	25	30	35	40
Давление, мм рт. ст.	12,8	17,5	23,7	31,7	42,0	55,1

Ниже приводятся фактические данные, полученные в этом опыте, в качестве примера того, как нужно их анализировать.

Экспериментальные данные: ток $I=4{,}8$ А; время $\Delta t=13{,}5$ мин$=810$ с; убыль массы анода $\Delta M=9{,}8$ г$-8{,}4$ г$=1{,}4$ г; объем водорода $V_1=0{,}525$ л; температура $T=21$ °С; атмосферное давление $P_A=750$ мм рт. ст.

Анализ данных опыта:

Перенесенный заряд:

$$q=6{,}25\cdot 10^{18}\,It=(6{,}25\cdot 10^{18})\cdot 4{,}8\cdot 810=2{,}4\cdot 10^{22}\text{ элем. зар.}$$

Число молей ионов меди:

$$n_{Cu}=\Delta M/\text{атомная масса Cu}=0{,}022\text{ моля.}$$

Число ионов меди:

$$N_{Cu}=\text{число Авогадро}\cdot n_{Cu}=(6{,}02\cdot 10^{23})\cdot 0{,}022=1{,}3\cdot 10^{22}\text{ ионов.}$$

Число элементарных зарядов на ион меди:

$$q/N_{Cu}=(2{,}4\cdot 10^{22})/(1{,}3\cdot 10^{22})=1{,}8\approx 2\text{ элем. зар./ион.}$$

Число элементарных зарядов на ион водорода: без поправок на температуру и давление заряд на *молекулу* водорода будет

$$q/n_H=q/[(6{,}02\cdot 10^{23})\cdot V/22{,}4]=(2{,}4\cdot 10^{22})\cdot 22{,}4/(6{,}02\cdot 10^{23}\cdot 0{,}525)=$$

$$=1{,}7\text{ элем. зар./молекулу.}$$

Но для образования одной молекулы водорода нужны два его иона; таким образом, заряд, переносимый к катоду всяким ионом водорода, равен $1{,}7/2=0{,}85\approx 1$.

Поправки к объему водорода на давление и температуру: Из табл. 25 находим, что давление водяного пара при температуре 21 °С составляет 19 мм рт. ст. Следовательно, парциальное давление P_1 водорода в колбе равно атмосферному давлению P_A за вычетом давления водяного пара. Подстановка в основное уравнение кинетической теории состояния газов дает для объема водорода V_2 при стандартных температуре и давлении величину

$$V_2=\frac{P_1T_2}{P_2T_1}V_1=\frac{(750-19)\,273}{760\,(273+21)}\cdot 0{,}525=0{,}470\text{ л.}$$

Это скорректированное значение для объема дает 1,9 заряда на молекулу, т. е. немного ближе к 2, чем нескорректированное значение.

Надо отметить, что все амперметры, кроме самых дорогих, видимо, привносят в результаты измерений систематические ошибки из-за неточностей градуировки. Хотя ошибки, вносимые нашим амперметром, малы по сравнению с другими ошибками, эти приборы подлежат проверке путем сравнения с тем или иным довольно точным стандартным прибором.

Ответы на вопросы

Число элементарных зарядов, прошедших через раствор, равно произведению силы тока на время и коэффициент пересчета, равный $6{,}25\cdot 10^{18}$.

Число молей образовавшихся ионов меди равно убыли массы анода , деленной на атомную массу меди, равную 63,5. Число ионов меди равно числу ее молей, помноженному на число Авогадро $(6{,}02\cdot 10^{23})$.

Число элементарных зарядов, переносимых каждым ионом меди, равно числу элементарных зарядов, прошедших через раствор, поделенному на число ионов меди.

Самое важное предположение, сделанное при подсчете числа переносимых каждым ионом меди зарядов, заключается в том, что все ионы меди переносят

одинаковое число элементарных зарядов. Учащимся из курса химии должно быть известно, что существуют два распространенных иона меди: Cu^+ и Cu^{++}. Однако в самом опыте нет ничего такого, что говорило бы о том, какой же из двух ионов образуется при опыте. Поэтому учащиеся, получив значение между 1 и 2, вправе высказать предположение о том, что образуются оба иона Cu^+ и Cu^{++}, давая среднее значение между 1 и 2.

Каждый ион водорода несет на себе один элементарный заряд. Если получится значение меньше 1, например 0,86, как в нашем случае, то надо заключить, что каждый ион несет по одному заряду, ибо если бы некоторые ионы несли на себе по одному заряду, а другие никакого заряда не несли бы, то «ионы» без заряда не могли бы притягиваться к катоду и не выделились бы (они не были бы «ионами»!). Значение больше 1 не может служить доказательством того, что существуют ионы водорода, несущие по два положительных заряда, потому что у водородных атомов имеется всего по одному электрону. Еще одно важное предположение заключается в том, что ионы меди и ионы водорода представляют собой одиночные атомы, а не образования, состоящие из двух или трех атомов. Однако для учащихся, прошедших курс химии, это уже нельзя считать предположением.

Доказательство того, что $m=\alpha q$, требует проведения повторных опытов разной длительности и с токами разной силы. Всякий раз надо брать свежую кислоту, чтобы предотвратить осаждение меди на катоде.

Значение α для меди есть атомная масса меди, деленная на число зарядов, переносимых каждым ионом меди; значение α для водорода есть атомная масса водорода, деленная на число зарядов переносимых каждым ионом водорода. Отношение α_{Cu}/α_H равно 36,8.

Известно, что

m = масса иона · число ионов; q = заряд иона · число ионов.

Отсюда

α = масса иона/заряд иона.

Заряд иона, если его выразить через элементарные заряды, оказывается целым числом, показывающим, что он представляет собой целочисленное кратное элементарного заряда.

Очень незначительное количество меди отлагается на катоде, если в растворе мало ионов меди и анод расположен на достаточном удалении от катода. При осаждении меди на катоде электроны, захватываемые ионами меди, уже не смогут участвовать в выделении водорода, что приводит к снижению количества собираемого водорода и завышению величины заряда, переносимого каждым ионом водорода, до уровня выше единицы.

Приборы и принадлежности: колба емкостью 500 мл; штатив высотой 60 см; лапка с кольцом (для крепления колбы, как это показано на рис. IV.11); предохранительная бутыль; резиновая пробка с двумя отверстиями (для предохранительной бутыли); 2 штативных зажима; кирпич или струбцина; 3 куска стандартных трубок, изогнутых, как показано на рис. IV.11; резиновые трубки длиной 30—60 см; зажим для резиновой трубки; тонкий лист меди размером около 25×150 мм и толщиной 0,32 мм; стеклянная ванночка; кусок изолированного провода длиной 50 мм; съемные прижимные контакты; 1 литр 5%-ной серной кислоты; источник постоянного тока на 5—10 А при напряжении 6—12 В (его можно использовать для нескольких экспериментальных установок одновременно); амперметр на 0—10 А; регулируемый реостат (для контроля за током); несколько мензурок емкостью 500—1000 $см^3$; тонкая наждачная бумага; весы; бумажные салфетки; мягкая ветошь; плоскогубцы; секундомер.

IV.8. Заряд конденсатора

Измерить электрический заряд непосредственно довольно трудно. Поэтому приходится обращаться к косвенному методу. Он сводится к измерению среднего тока и умножению последнего на период времени протекания тока.

В данном опыте полный ток, прошедший через миллиамперметр за один цикл разрядки конденсатора, очень мал, а прибор обладает слишком большой инерционностью, чтобы дать показание. Но если за короткий промежуток времени провести много циклов разрядки, то миллиамперметр измерит средний ток, а заряд, сообщаемый каждый раз конденсатору, можно подсчитать.

При данном принципе действия переключатель должен обеспечивать контакт достаточное время, чтобы конденсатор полностью заряжался и разряжался за каждый цикл. Позднее в цепь вводятся сопротивления, чтобы замедлить скорость зарядки конденсатора; это заставляет учащихся задуматься над вопросом о длительности переходного времени при зарядке и разрядке.

Существует также проблема батареи для цепи хронизирующего устройства, посылающего ток через колеблющийся якорь и создающего в нем ЭДС. Сопротивление и ток в якоре малы, так что вредного взаимодействия между цепями хронизирующего устройства и конденсатора, видимо, не возникает.

Важно обеспечить устойчивую и ровную работу хронизирующего устройства. Молоточек (якорь) должен находиться в соприкосновении с контактными металлическими пластинами короткое время к концу периодов колебательного движения. Устойчивые показания миллиамперметра при разрядке свидетельствуют о правильности регулировки. Изменение периода колебаний должно сопровождаться изменением показаний силы тока; поэтому показания можно сопоставлять непосредственно только при одинаковой частоте колебаний. Можно предусмотреть, чтобы учащиеся ввели в цепь хронизирующего устройства реостат, позволяющий регулировать подаваемое на него напряжение.

В процессе опыта предусматривается последовательное и параллельное соединение конденсаторов.

Ответы на вопросы

Стрелка миллиамперметра отклонится, но очень незначительно при единичной разрядке конденсатора, потому что мгновенный ток через прибор создаст лишь незначительный импульс, проявившийся в отклонении стрелки.

ТАБЛИЦА 26

Номер опыта	Разность потенциалов, В	Ток, 10^{-4} А	Частота, $с^{-1}$	Емкость, мкФ	
				измеренная	номинальная
1	0	0	60		
2	1,5	1,0	60	1,1	1,0
3	3,0	2,0	60	1,1	1,0
4	4,5	3,1	60	1,1	1,0
5	6,0	4,2	60	1,2	1,0
6	6,0	1,0	60	0,28	0,25

Батарея, приводящая в действие переключатель, никакого тока через миллиамперметр не создает.

Инерционность прибора усредняет отдельные импульсы тока.

Скорость зарядки и разрядки будет равна скорости колебаний хронизатора, составляя около 50—60 $с^{-1}$.

Число кулонов, сообщаемых конденсатору за один цикл зарядки, зависит от разности потенциалов на конденсаторе (см. экспериментальные данные, представленные в табл. 26).

Отношение заряда к разности потенциалов остается неизменным.

Включение сопротивлений 100 и 200 Ом в цепь зарядки никак не повлияет на ток. Контактного времени хватит для полной зарядки и полной разрядки конденсатора, если хронизатор правильно отрегулирован. Включение сопротивлений 10^3, 10^4 и 10^5 Ом в цепь зарядки должно приводить ко все большему ослаблению тока, проходящего через прибор, потому что конденсатор не сможет полностью заряжаться за контактное время (табл. 27).

ТАБЛИЦА 27

Номер опыта	Сопротивление, Ом	Ток, 10^{-4} А		Частота, $с^{-1}$
		Сопротивление в цепи		
		зарядки	разрядки	
1	100	4,2	4,2	60
2	200	4,2	4,2	60
3	10^3	1,4	1,5	60
4	10^4	0,51	0,56	60
5	10^5	0,06	0,09	60

$C=1$ мкФ; $V=6$В.

ТАБЛИЦА 28

Вид соединения	Разность потенциалов, В	Ток, 10^{-4} А	Частота, $с^{-1}$	Емкость, мкФ	
				измеренная	расчетная
Параллельное	6,0	5,1	60	1,4	1,25
Последовательное	6,0	0,8	60	0,22	0,20

$C_1=1$ мкФ; $C_2=0{,}25$ мкФ.

Если два конденсатора соединить параллельно, то их емкости сложатся; если же их соединить последовательно, то емкость цепи станет меньше емкости каждого из них в отдельности (табл. 28). В таком случае

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2} \quad \text{или} \quad C=\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}.$$

Приборы и принадлежности: хронизатор с электрическим переключателем; полношкальный миллиамперметр на 0—10 мА; 4 сухих элемента по 1,5 В; бумажный конденсатор емкостью 1 мкФ; бумажный конденсатор емкостью 0,25 мкФ; 5 угольных 0,25-ваттных сопротивлений на 100, 200, 10^3, 10^4 и 10^5 Ом.

IV.9. Энергия, преобразуемая электродвигателем

Учащиеся зачастую думают о механике и электричестве, как о далеко стоящих друг от друга дисциплинах. Данный опыт предоставляет возможность увязать их, сосредоточив внимание на преобразовании энергии, а не на внутреннем действии двигателя.

Один электродвигатель может значительно отличаться от другого по своим характеристикам. Поэтому приводимые здесь данные могут быть несколько иными, чем результаты, полученные учащимися.

Ответы на вопросы

ЭДС батареи, питающей двигатель, равна 1,5 В. Она почти не меняется под нагрузкой, если взять новую батарею.

Как видно из табл. 29, для поднятия 6 колец на высоту 1,5 м со скоростью 0,42 м/с потребуется 0,36 с.

Энергия, сообщенная батареей, составляет $\mathcal{E}It = 1{,}5$ В·0,81 А·0,36 с=4,4 Дж.

Прирост потенциальной энергии колец составляет 1,5 м·0,02 кг·9,8 м/с^2= =0,29 Дж.

Энергия, сообщенная батареей, приблизительно в 15 раз превосходит прирост потенциальной энергии колец.

Ток остается при разных скоростях, но одинаковом грузе приблизительно постоянным (см. табл. 29).

На рис. 111, *а* приведен график изменения тока в зависимости от скорости, а на рис. 111, *б* в той же зависимости дан график изменения к.п.д.

Результаты опыта представлены в табл. 30.

ТАБЛИЦА 29

Комплект сопротивлений	Ток, А	Время, с	Средняя скорость, м/с	Комплект сопротивлений	Ток, А	Время, с	Средняя скорость, м/с
1	0,81	4,3	0,42	3	0,80	2,0	0,88
	0,81	4,4			0,80	2,0	
	0,81	4,0			0,80	2,0	
2	0,82	2,2	0,76	4	0,80	1,9	0,93
	0,82	2,4			0,80	1,9	
	0,82	2,6			0,80	1,9	
	0,82	2,1					

Масса груза из 6 колец равна 0,02 кг; высота подъема составляет 1,77 м.

График изменения к. п. д. в зависимости от числа колец представлен на рис. 111, *в*. К. п. д. остается почти постоянным, пока число колец не превзойдет четырех, после чего он быстро убывает.

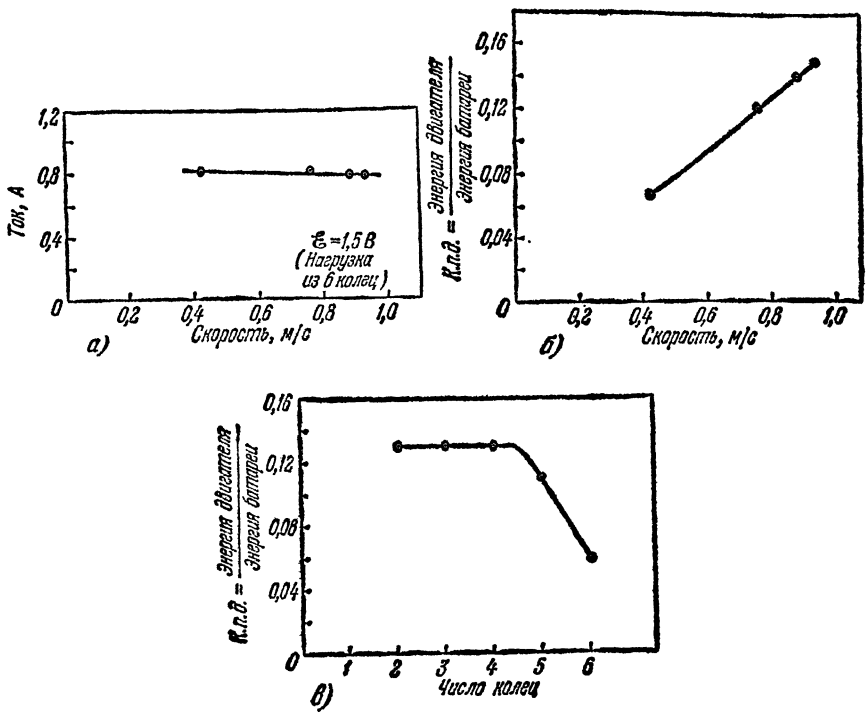


Рис. 111.

Энергия, которая не преобразуется в потенциальную энергию поднятого груза, рассеивается в виде теплоты в сопротивлении и двигателе.

ТАБЛИЦА 30

Номер опыта	Число колец	Масса, кг	Ток, А	Время, с	Средняя скорость, м/с
1	6	0,020	0,82	4,6	0,39
2	5	0,017	0,70	2,5	0,71
3	5	0,017	0,70	2,5	
4	4	0,013	0,60	1,8	0,93
5	4	0,013	0,60	2,0	
6	4	0,013	0,60	1,9	
7	3	0,010	0,55	1,7	1,1
8	3	0,010	0,54	1,6	
9	2	0,007	0,45	1,4	1,3
10	2	0,007	0,45	1,4	

Приборы и принадлежности: экспериментальная установка по преобразованию энергии; штатив высотой 60 см; штативный зажим, подобный показанному на рис. IV.14; батарея на 1,5 В; амперметр на 0—3 А; секундомер.

IV.10. Магнитное поле тока

Данный опыт следует провести до проработки раздела 30.3. Его нетрудно поставить, а анализ векторной диаграммы с использованием тригонометрических формул занимает мало времени. Опыт показывает, что магнитные поля складываются векторно и пропорциональны создающему их току.

Лучше воспользоваться квадратной, а не круглой проволочной рамкой, так как ее проще сделать. Для всего опыта потребуется моток проволоки длиной около 10 м. Это обеспечит постоянство тока в проволоке при условии, что полный

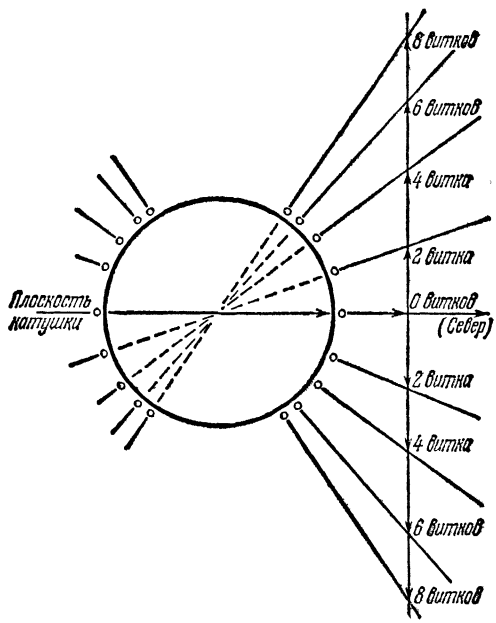


Рис. 112.

отбор тока от батареи не будет чрезмерным. Маленькая сигнальная лампочка ограничивает ток величиной около 0,3 А от одного сухого элемента.

В качестве индикатора магнитного поля можно воспользоваться либо небольшим магнитным компасом диаметром около 5 см, либо же компасом, об устройстве которого говорится ниже.

Углы можно отсчитывать непосредственно по компасу, если его шкала снабжена угловыми делениями. Прежде чем определять углы, по корпусу компаса нужно слегка постучать, чтобы избежать ошибок из-за трения. Если ось вращения стрелки не совпадает с центром шкалы, то надо снять показания обоих концов стрелки и записать их среднее значение. Опыт можно провести, пользуясь при регистрации данных и их анализе либо графическими приемами, либо определяя уг-

лы в градусах и прибегая к простым тригонометрическим соотношениям, когда нужно определить значения напряженности поля.

Направление стрелки компаса можно зафиксировать, поставив на бумаге против концов стрелки точки.

Данные наблюдений можно проанализировать так, как это показано на рис. 112. Линии направления стрелки компаса для разных чисел витков должны отсекать разные отрезки на линии, проведенной перпендикулярно к линии нулевого тока. Каждый такой отрезок характеризует приращение напряженности поля при добавлении к катушке одного витка.

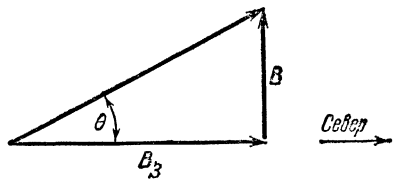


Рис. 113.

Если углы отклонения стрелки компаса измеряются в градусах, то экспериментальные данные можно проанализировать так, как это показано на рис. 113. Постоянная горизонтальная составляющая магнитного поля Земли $B_З$, создаваемое током поле B и угол θ, который стрелка образует со своим нулевым положением, связаны соотношением $B=B_З \operatorname{tg} \theta$. Нанеся значения $\operatorname{tg} \theta$ в функции числа витков, получим прямую линию.

Некоторые учащиеся могут возразить против утверждения, что ток в катушке можно увеличить, добавив число витков. Важный момент здесь заключается в

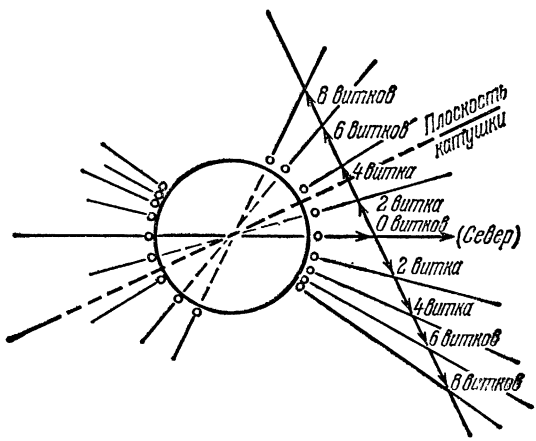


Рис. 114.

том, что, хотя ток в проволоке остается постоянным, ток, текущий в плотно уложенных трех витках катушки, в три раза больше тока, текущего в одной проволоке. Этот способ измеримого увеличения тока в контуре позволяет в ряде случаев обходиться без амперметра.

Ответы на вопросы

Магнитное поле в центре катушки, создаваемое током, перпендикулярно к плоскости катушки. Перемена направления тока в катушке меняет направление магнитного поля на обратное.

Величина магнитного поля пропорциональна полному току, текущему вокруг катушки.

Намотка витков в противоположных направлениях создает поля противоположных направлений. Результирующее поле создается избытком числа витков, намотанных в одном направлении.

Измерить поле можно даже в том случае, когда стрелка компаса не параллельна плоскости катушки, поскольку перемена направления тока уже не даст равного отклонения (рис. 114). В этом случае измерения проще производить графическим способом.

Напряженность магнитного поля стрелки компаса не влияет на экспериментальные результаты.

Приборы и принадлежности: установка с тангенс-гальванометром; около 10 м изолированной проволоки; магнитный компас; сухая батарея на 1,5 В; лампочка от карманного фонаря с патроном; лист бумаги с полярной или прямоугольной сеткой (вместо лампочки от карманного фонаря можно взять 4-ваттное переменное сопротивление на 10 Ом и амперметр со шкалой 0—3 А).

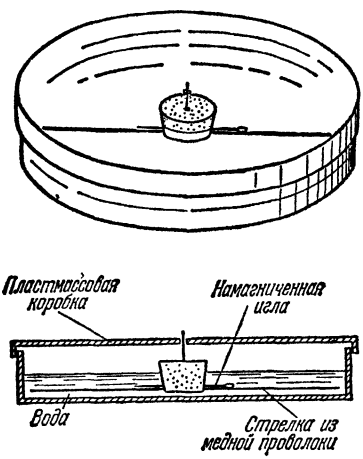


Рис. 115.

Самодельный компас. Для изготовления самодельного чувствительного компаса, которым можно пользоваться при проведении опытов IV.10 и IV.13, нужно иметь пробку, иглу, кусок медной проволоки и круглую пластмассовую коробку.

Намагнитьте швейную иглу (длиной около 3 см), проведя по ней несколько раз одним концом сильного постоянного магнита. Это можно сделать и иначе. Приложите иглу к карандашу и намотайте на них в таком виде около 20 витков изолированной проволоки, концы которой подсоедините на одну секунду или меньше к выводам батареи на 1,5—3,0 В, чтобы намагнитить иглу.

Отрежьте верхнюю часть пробки (диаметром около 12 мм внизу), оставив высоту нижней половинки равной 12,5 мм. Укрепите намагниченную иглу в надрезе, сделанном ножом в пробке по диаметру, как это показано на рис. 115.

Выпрямите кусок голой медной проволоки диаметром около 0,4 мм, зажав один ее конец в тисках и потянув за другой ее конец, пока она не начнет вытягиваться. Отрежьте выпрямленную проволоку приблизительно на 5 мм короче внутреннего диаметра пластмассовой коробки и закрепите ее по центру в прорези, сделанной в пробке, под намагниченной иглой.

Опустите эту систему плавать в воде, налитой в круглую пластмассовую коробку. Чтобы сцентрировать ее, воткните кусок медной проволоки вертикально по центру пробки так, чтобы ее верхний конец выходил в небольшое отверстие, просверленное по центру крышки.

Может возникнуть вопрос, почему в этом компасе нельзя пользоваться длинной намагниченной стальной проволокой вместо короткой намагниченной иглы и длинной проволоки из немагнитного материала в качестве индикатора. Это объясняется тем, что исследуемое магнитное поле обычно неоднородно по большой площади. Поэтому длинная намагниченная проволока не покажет напряженности магнитного поля в центре компаса. А поскольку определять направления с помощью короткого магнита трудно, приходится прибегать к использованию в качестве индикатора длинной немагнитной проволоки.

IV.11. Измерение индукции магнитного поля

Данный опыт не только позволяет установить единицу измерения магнитной индукции через другие известные единицы, но он представляет собой единственный опыт по измерению магнитных сил. Ставить его нужно после проработки соответствующей темы по Учебнику.

Данные о проводимой по ходу настоящего опыта градуировке соленоидов потребуется при постановке опыта IV.12. Поэтому соленоиды должны быть снабжены номерами, если они имеют различные характеристики. Это избавит от лишней работы в последующем.

На рис. IV.20 (см. стр. 269) петля весов и соленоид соединены параллельно источнику тока, причем оба они имеют в своей цепи переменное сопротивление и амперметр, что позволяет независимо регулировать токи в них. Такая схема проще всего усваивается учащимися, но если у вас не хватает реостатов и амперметров, то их можно соединить и последовательно, как это показано на рис.116. Правда, при работе по такой схеме нельзя провести несколько определений индукции в соленоиде посредством изменения тока в петле.

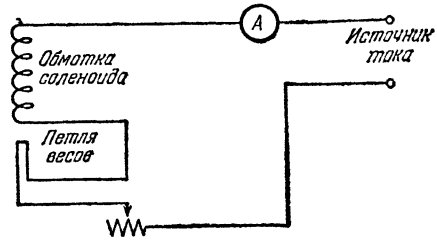


Рис. 116.

Ради точности опыта проволоку или бечевку следует считать однородной по сечению, причем их массу можно вычислить по массе куска длиной в несколько метров. Длину l прямого конца петли (A на рис. 116) следует измерить как расстояние между центрами полосок, образующих боковые стороны петли.

Надо помнить, что в показаниях амперметра возможна систематическая ошибка, если не произвести его градуировку.

Ответы на вопросы

Отношение индукции поля в катушке к току в катушке есть величина постоянная.

Хотя петлю с током можно уравновесить в магнитном поле около небольшого магнита, измеренную индукцию поля трудно будет проанализировать, поскольку поле около магнита на расстояниях, сравнимых с размерами петли, будет далеко не однородным. Поэтому у нас не будет уверенности в том, в какой точке около магнита индукция поля имеет величину, вычисленную нами по силе, уравновешивающей петлю.

В принципе измерить напряженность магнитного поля Земли, равномерного на больших расстояниях, можно посредством весов, но эта напряженность столь слаба, что без помощи весьма чувствительных весов силу трудно правильно измерить. Однако учащиеся могут попытаться сделать это, чтобы посмотреть, придут ли весы хотя бы в малейшее движение. Если ток в петле превосходит 5 А, то контакты нагреваются и корродируют.

Если петлю сделать из железной проволоки, то она намагнитится и привнесет в измеряемое поле неизвестную индукцию.

Приборы и принадлежности: полый соленоид; токовые весы; источник постоянного тока до 10 А (6—12 В), который может обеспечить проведение опытов

одновременно на нескольких установках; 2 амперметра со шкалой 0—10 А, 2 переменных сопротивления; 8 съемных зажимов; чувствительные весы (до 0,1 г); бечевка, рулетка или линейка.

IV.12. Масса электрона

Это — весьма фундаментальный опыт, со всей очевидностью показывающий, как можно простыми средствами определить массу электрона. Самое лучшее время для постановки этого опыта — после классного обсуждения раздела 30.6.

Условия внутри лампы 6 АГ6С гораздо сложнее, чем это охарактеризовано на стр. 271. Детали лампы и их крепление слегка магнитны и приводят к незначительному искажению магнитного поля. К тому же электроны в луче не движутся с постоянной скоростью в отклоняющем магнитном поле, потому что разгоняющее электрическое поле простирается от катода до анода. Однако благодаря специфике

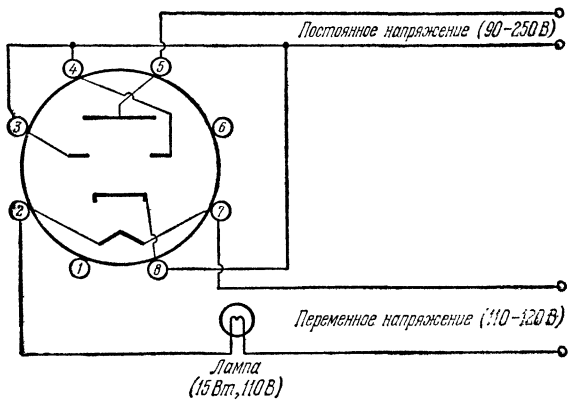


Рис. 117.

«геометрии» (размеру, форме, размещению деталей) лампы максимальный разгон электронов осуществляется до их выхода за центральный цоколь. И искажение магнитного поля, и изменение скорости в процессе отклонения магнитным полем приводят к тому, что погрешность определения массы электрона составляет 200—300%, но порядок ее величины (10^{-30} кг) определен правильно. Это очень большое достижение в измерении столь малой массы.

Обратите внимание на то, что видимая нами картина представляет собой не путь электронов, а лишь *конечную точку* траекторий многих различных электронов, когда они ударяются о коническую мишень.

Можно услышать вопрос о том, почему нельзя спиральную сетку, окружающую катод, соединить с анодом, чтобы электроны приобретали всю свою кинетическую энергию между катодом и этой сеткой и двигались дальше от этой сетки к аноду, с постоянной скоростью. Тщательное рассмотрение рис. 117 показывает, что эта сетка имеет внутреннее соединение с катодом.

Нить накала лампы 6АГ6С требует питания от источника с напряжением 6,3 В при токе 0,15 А. Таким источником могут служить батареи, накальный трансформатор или сеть переменного тока с напряжением 110—120 В через лампу накаливания на 15 Вт в качестве сопротивления, снижающего напряжение, как

это показано на рис. 117. В качестве источника анодного напряжения можно пользоваться также сетью переменного тока на 110 В. В данном случае при быстром изменении анодного напряжения все еще видна резкая тень благодаря устойчивости видения и усилению яркости пучка при повышении анодного напряжения. При расчете за разность потенциалов надо брать пиковое напряжение. На данном этапе учащимся трудно объяснить эти моменты, из-за чего анод целесообразнее питать от источника постоянного тока.

Составляя цепь контура, надо помнить, что номера штырьков на цоколе лампы (см. рис. IV.25) даны в том порядке, в каком мы их видим, глядя на основание цоколя, а не сверху лампы по направлению вниз на цоколь.

Нужные для данного опыта напряжения опасны, что делает обязательным соблюдение надлежащих правил техники безопасности. В данном случае используется такой же соленоид, как и в опыте IV.11, с токами силой 5 А. Для соленоида можно взять низковольтный источник постоянного тока, питающийся от сети переменного тока на 110 В, если он снабжен надежным фильтром. В опыте IV.11 плохая фильтрация остается незаметной из-за инерции металлической петли, тогда как в данном случае электроны успевают следовать за быстрыми колебаниями магнитного поля, вследствие чего края тени утрачивают резкость. Поэтому лучше взять аккумулятор на 6 В. Сухие элементы для этой цели не годятся, потому что при токах нужной силы они не в состоянии служить необходимое время.

При расчетах надлежит пользоваться соответствующими единицами. Чтобы получить массу m в килограммах, измерьте R в метрах, q в кулонах, B в ньютонах на ампер·метр, а V в вольтах. Один такой опыт был проведен при следующих значениях параметров: $B/I=3{,}6\cdot10^{-3}$ Н/(А^2·м), $I=3$ А, $B=10{,}8\cdot10^{-3}$ Н/(А·м), $V=135$ В и $R=5\cdot10^{-3}$ м.

Постановка этих значений в уравнение для m на стр. 271 дала следующую величину массы m:

$$m=B^2qR^2/2V=(1{,}2\cdot10^{-4})\cdot(1{,}6\cdot10^{-19})\cdot(25\cdot10^{-6})/270=1{,}8\cdot10^{-30}\text{ кг}.$$

Ответы на вопросы

Электронный луч можно отклонить и магнитным полем Земли. Если вертикальная составляющая напряженности магнитного поля Земли составляет около $5\cdot10^{-5}$ Н/(А·м), а ускоряющее напряжение будет равно 100 В, то электронный луч изогнется по окружности с радиусом кривизны приблизительно 67 см. Следовательно, в подобном случае потребовалась бы лампа диаметром по меньшей мере 1 м. Однако такое отклонение электронного луча легко замерить и в прямой трубке.

Воспользоваться для определения массы электрона его свободным падением — заманчиво лишь теоретически, но не практически. Электрон приобретает огромную скорость даже при разгоне очень незначительным ускоряющим напряжением. Поэтому он успеет покрыть очень большое расстояние по горизонтали, пока станет возможным измерить высоту его «падения». Нам в подобном случае пришлось бы определить его «начальную» скорость по перепаду высоты и вычислить его массу по формуле $mv^2/2=qV$. Электрон при разгоне напряжением всего лишь в 1 В приобретает скорость около $6\cdot10^5$ м/с. За 0,01 с он покроет по горизонтали путь 6000 м, отклонившись за это время под действием силы тяжести вниз на $4{,}9\cdot10^{-4}$ м, т. е. приблизительно на 0,5 мм. Ясно, что провести опыт подобного рода не представляется возможным.

Приборы и принадлежности: 1 полый соленоид; 1 экспериментальная установка для определения массы электрона; 4 батареи (сухих элемента) по 4,5 В или иной источник питания; источник постоянного напряжения на ток силой до 5 А по крайней мере с одним выходом для накала в 6 В; амперметр со шкалой 0—10 А; 1 переменное сопротивление (для регулировки тока); 4 монтажных провода со съемными зажимами; 1 рулетка или линейка; 1 набор деревянных штырьков разного диаметра.

Устройство соленоида. Соленоид, показанный на рис. 118, можно сделать самому. Отношение магнитной индукции в центре соленоида к току равно около $3{,}6 \cdot 10^{-3}$ Н/(А^2·м) ($\pm 10\%$). Если предположить, что соленоид имеет бесконечную

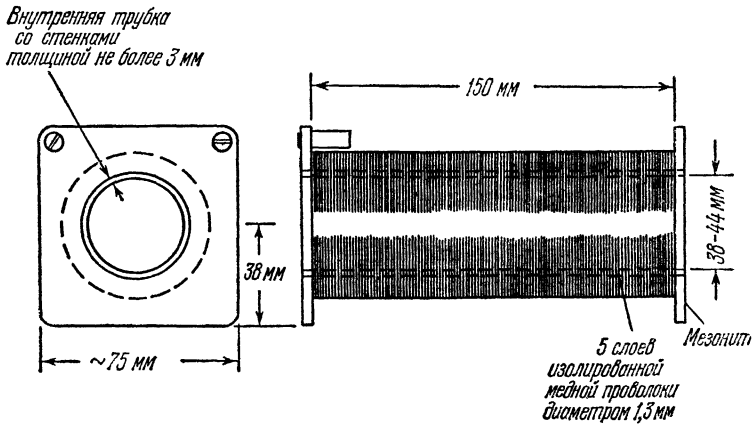


Рис. 118.

длину, то подсчет этого отношения с учетом геометрии соленоида дает величину $4 \cdot 10^{-3}$ Н/(А^2·м).

Внесение поправки в это отношение на конечные размеры соленоида снижает расчетное значение приблизительно до $3{,}6 \cdot 10^{-3}$ Н/(А^2·м).

IV.13. Магнитное поле вблизи длинного прямого провода

Данный опыт представляет собой единственную попытку экспериментального исследования зависимости магнитных сил от расстояния. Более того, он прост в постановке и дает точные результаты. Его надо ставить до перехода к изучению раздела 30.9.

Вертикальный участок провода должен иметь достаточную длину и возвышаться над столом по возможности не меньше, чем стол над полом. Степень влияния близких соседних железных предметов можно оценить, перемещая компас по миллиметровой бумаге, когда в проводе нет тока. Если компас при перемещении по миллиметровке на 20 см от провода не обнаруживает изменения направления магнитного поля, то можно считать, что соседние железные предметы не привнесут ошибок в результате измерения. Если же на столе имеется много железных предметов, то можно прибегнуть к использованию немагнитной коробки для корпусирования катушки, как это было сделано в опыте IV.10.

С компасом надо обращаться так же, как это делалось в предшествующем опыте. Чтобы снять показание при минимальном удалении, самодельный компас в немагнитной коробке подводится впритык к проводу, потому что магнитная стрелка

имеет малую длину и достаточно удалена от провода, позволяя таким образом избежать погрешностей. Если позволяет время и если поставить задачу повышения точности измерений, то ток через провод нужно обращать при каждом положении компаса и замерять отклонения стрелки в противоположных направлениях. Если источник постоянного тока на 5А не снабжен отдельным реостатом, а амперметра нет, то можно взять батареи или иной источник питания. Учащимся надо показать, как полагается соединить реостат и амперметр последовательно с вертикальным участком провода и источником питания. Для этого опыта сухими элементами пользоваться не рекомендуется, так как они дороги и быстро выходят из строя при непрерывном отборе токов большой силы.

Ответы на вопросы

Напряженность магнитного поля, создаваемого проводником с электрическим полем, если ее выразить через горизонтальную составляющую магнитного поля Земли, обратно пропорциональна расстоянию до проводника. Это можно установить, определяя напряженность поля на разных расстояниях до проводника и построив по результатам такого измерения график изменения этой напряженности в зависимости от величины, обратной расстоянию до проводника. Если

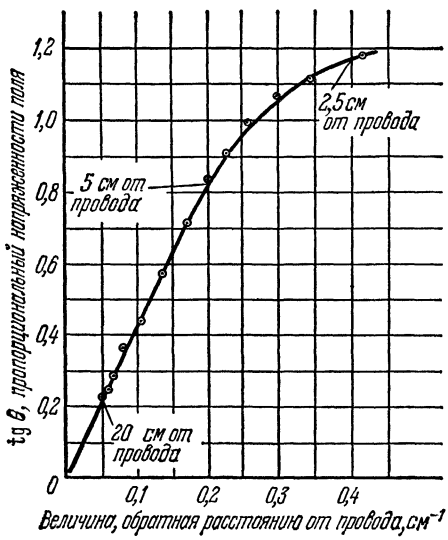


Рис. 119.

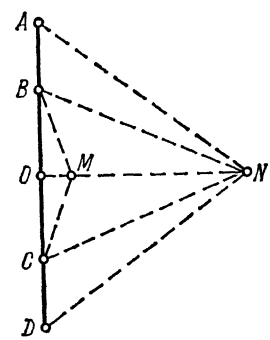


Рис. 120.

опытные данные были замерены с помощью компаса, расположенного слишком близко к проводнику, то кривая при малых удалениях отклонится от прямой, как это показано на рис. 119. Чем короче стрелка компаса, тем меньше погрешность.

Поскольку даже одно только поле Земли способно намагнитить железо, весьма близкое соседство с железными предметами привносит вклад в поле неизвестной величины. Подобным же образом близость расположения остальных частей проводника добавляет нежелательные поля к измеряемому полю.

Если бы проводник имел длину всего 20 см, то напряженность магнитного поля убывала бы быстрее, чем это следует из закона обратной пропорциональности расстоянию. Учащимся надо посоветовать проверить это на опыте, если позволяет

время. На рис. 120 иллюстрируется именно такая ситуация. Поле в точке M создается прежде всего током в проводнике вблизи точки O, потому что отрезки MB и MC, например, уже в несколько раз длиннее отрезка MO, так что ток в точке B или C дает очень незначительный вклад в магнитное поле в точке M. А ток на

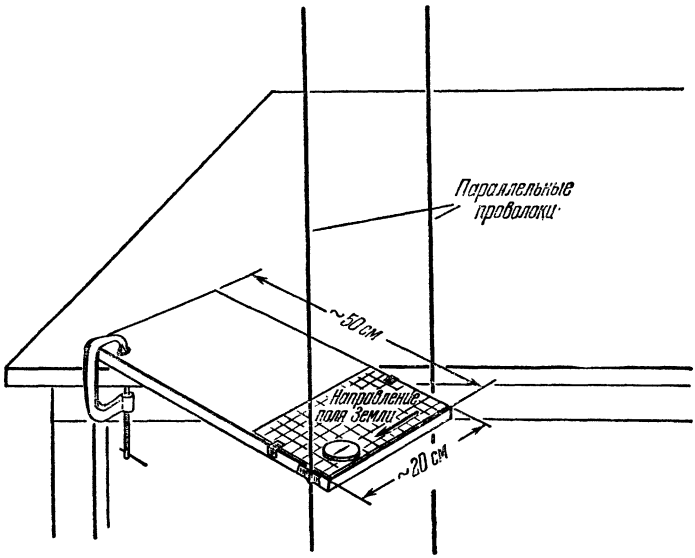


Рис. 121.

участках проводника AB и CD уже почти никак не отразится на напряженности магнитного поля в точке M. С другой стороны, отрезки AN, ON и DN имеют приблизительно одинаковую длину, так что участки проводника AB и DC должны

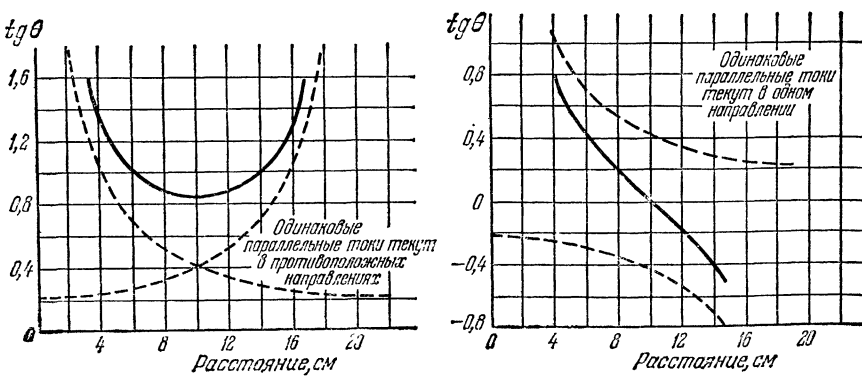


Рис. 122.

давать существенный вклад в напряженность магнитного поля в точке N. Укорочение проводника ослабит поле в точке N. Следовательно, в случае короткого проводника напряженность магнитного поля должна убывать быстрее, чем это дает закон обратной пропорциональности расстоянию.

Стократное увеличение силы тока сделает поле вблизи проводника очень сильным, так что стрелка компаса отклонится на углы, близкие к прямому. Это ухудшит точность измерения малых изменений угла при отодвигании компаса на 20 см от проводника. Если же силу тока уменьшить в 100 раз, то максимальное отклонение в подобном случае составит лишь доли градуса и сделает невозможным его точное измерение.

Если лабораторные столы нельзя передвинуть так, чтобы сделать края параллельными магнитному полю Земли, то в последней части опыта необходимо на краю стола закрепить должным образом ориентированную доску, как это показано на рис. 121. Расчетные кривые изменения напряженности магнитного поля в зависимости от расстояния приведены на рис. 122. (Эта часть опыта предназначается только для тех учащихся, которые захотят узнать побольше о магнитном поле вблизи проводника с электрическим током. Некоторым из них еще до проведения опыта удастся предсказать результаты, если они прибегнут к суперпозиции двух полей, как это сделано на рис. 122.)

Приборы и принадлежности: 1 магнитный компас; изолированная проволока; 2 листа миллиметровой бумаги; 1 штатив высотой 90 см; 1 зажим; 1 линейка; 1 источник постоянного тока на 1 А (16—12 В); 1 амперметр со шкалой 0—10 А; 1 переменное сопротивление (для регулировки тока); 2 кирпича; клейкая лента; струбцина; доска размером 1×20×30 см.

IV.14. Неупорядоченность радиоактивного распада

Радиоактивному распаду и испусканию света присуща одна одинаковая особенность: их можно описать (охарактеризовать) только посредством статистических величин. Это означает, что отдельные атомы или ядра распадаются хаотично и что момент времени отдельного распада нельзя ни предсказать, ни подчинить контролю со стороны экспериментатора. Прогнозированию поддается лишь усредненное поведение множества этих частиц. Данный опыт предоставляет учащимся возможность исследовать эту неупорядоченность. В этом заключается единственная цель данного опыта. Его можно поставить в процессе изучения гл. 33, если ограничиться подчеркиванием самой неупорядоченности. Но с его постановкой можно и повременить до перехода к изучению самого явления радиоактивности.

Чтобы выдержать ежесекундное число отсчетов счетчика в разумных пределах и не сбиться при счете из-за чрезмерной частоты щелчков, поместите радиоактивный образец на таком расстоянии от зонда счетчика, чтобы последний делал лишь один щелчок ежесекундно.

Можно ограничиться единственным счетчиком, передавая его щелчки через громкоговоритель для всего класса. (Если счетчик не снабжен усилителем и громкоговорителем, то можно воспользоваться звуковым усилителем от кинопроектора.) В этом случае учащиеся должны приступить к построению графиков зависимости средней скорости счета от общего числа щелчков за разные промежутки времени, скажем, с минутными паузами. Сравнив такие графики, они убедятся в том, что отдельные кривые, будучи сильно разными на первых порах, затем сходятся во всех случаях к одной и той же средней скорости счета.

Анализ экспериментальных данных требует значительного времени. Чтобы ускорить расчеты, учащихся целесообразно разбить на пары: один производит сложение, а другой — деление и нахождение среднего. На рис. 123 и 124 представлены результаты одного такого реального опыта.

Ответы на вопросы

Средняя скорость счета, найденная из гистограммы (столбчатой диаграммы), расходится с расчетным значением приблизительно на 10%.

При малом числе отсчетов средняя скорость счета сильно меняется от точки к точке. С ростом числа отсчетов колебания средней скорости счета становятся все

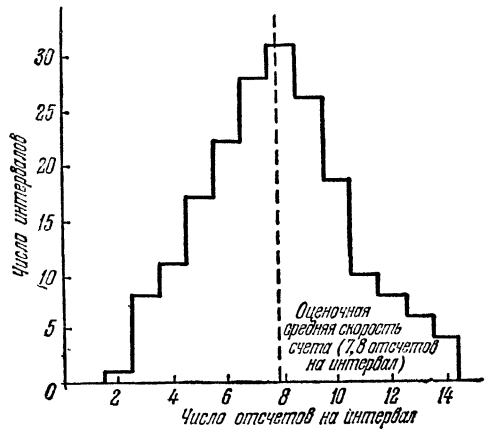


Рис. 123.

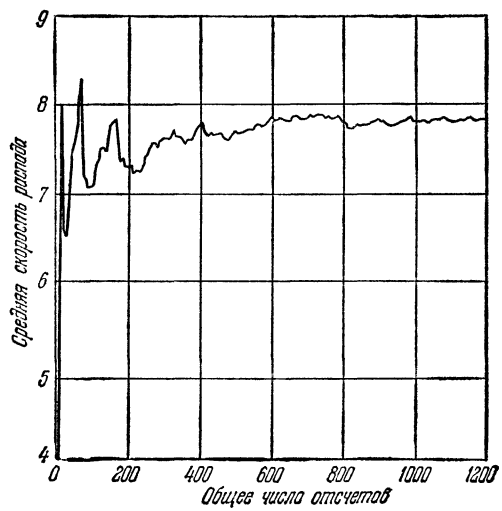


Рис. 124.

меньше. Точность измерения средней скорости счета возрастает с увеличением общего числа отсчетов, охваченных при вычислениях. По малым и почти постоянным колебаниям за последние несколько минут учащийся может прийти к выводу, что дальнейший подсчет на протяжении еще двух или более часов не увенчается существенным повышением точности измерений. От него при этом не потребуется

знания того, что точность пропорциональна корню квадратному из полного числа отсчетов.

Предположив, что радиоактивный образец испускает частицы равномерно по всем направлениям, и определив телесный угол их перехвата счетчиком, можно узнать, какая доля частиц попадает в счетчик. Чтобы сделать это, проведем воображаемую сферу с центром в образце, поверхность которой проходила бы через счетчик. Затем оценочно определим площадь поверхности поперечного сечения захвата счетчиком частиц и разделим ее на площадь поверхности воображаемой сферы $4\pi R^2$. Доля всего числа испускаемых образцом частиц, попадающая в счетчик, и будет равна этому отношению. Здесь полагается учесть и эффективность счетчика (учащиеся в большинстве своем пока не имеют представления об этом). Только часть частиц, попадающая в счетчик, регистрируется последней. Эффективность работы счетчика сильно зависит от его устройства и природы радиоактивного источника. Счетчики Гейгера, как правило, не регистрируют α-частицы.

По результатам наших измерений нельзя определить период полураспада радиоактивного образца, потому что последний слишком велик для того, чтобы на протяжении какого-то часа удалось обнаружить заметные изменения скорости распада. Чтобы определить период полураспада, надо знать число радиоактивных ядер в источнике и полную эффективность подсчета. Зная число ядер N в источнике и число ежесекундных распадов $\Delta N/\Delta t$, период полураспада найдем в виде

$$T = 0{,}693N/(\Delta N/\Delta t),$$

если ΔN мало по сравнению с N. Учащиеся, разумеется, не знают этого уравнения.

Период полураспада порядка одного часа можно определить непосредственно, построив график изменения скорости счета в зависимости от времени. Из такого графика видно, что время, требующееся для двукратного снижения скорости счета (период полураспада), не зависит от самой скорости счета. Кривая скорости счета представляет собой прямую с наклоном, равным отношению 0,693/период полураспада.

Приборы и принадлежности: 1 радиоактивный источник; часы со светящимся (радиоактивным) циферблатом; 2 листа миллиметровой бумаги; 1 линейка; 1 секундомер или хронометр; звукоусилитель и громкоговоритель; камера Вильсона.

IV.15. Спектр водорода и постоянная Планка

Изучение спектра водорода предоставляет единственную в своем роде возможность объединения результатов точных измерений с проверкой теории и нахождением величины универсальной постоянной.

Учащимся надо предоставить достаточно времени для того, чтобы тщательно установить спектрометр и приобрести навыки по обнаружению не только сильных, но и слабых линий, особенно по краям видимого спектра. Чтобы воспользоваться в полной мере высокой точностью прибора, необходим твердый, остро отточенный карандаш. Логарифмическая линейка недостаточно точна для необходимых вычислений.

Позаботьтесь о том, чтобы сфокусировать зрительную трубу на бесконечность (удаленный предмет), а решетку поместить точно на вертикальной оси вращения этой трубы.

Незначительные неточности при установке спектрометра бывают меньше, а общая точность измерений повышается, если наблюдать все линии по обе стороны от центрального максимума.

Особенно тщательно надо измерить положение зеленой линии спектра ртути, так как именно она используется для градуировки спектрометра. Любая ошибка при измерении ее положения даст погрешность при определении коэффициента пропорциональности, вносящую систематическую ошибку во все определения длин волн водорода.

Полезный срок службы водородной трубки исчисляется всего несколькими часами. По истечении этого срока наряду с линиями водорода начинают появляться дополнительные линии вследствие загрязнения газа примесями элементов, по-

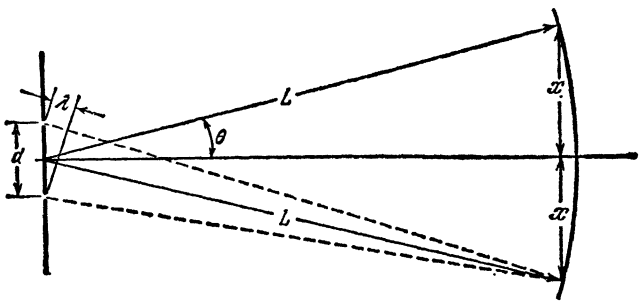


Рис. 125.

падающих из материалов, из которых сделана трубка. Поэтому есть смысл предупредить учащихся о необходимости включения трубки только в процессе фактических измерений спектрометром.

Ответы на вопросы

Изображение щели получится в бесконечности, если зрительную трубу заранее сфокусировать на удаленный предмет. Самое резкое изображение щели возникает тогда, когда она находится в фокальной плоскости коллиматорной линзы и когда свет от щели выходит из линзы в виде параллельного пучка.

Дифракционная решетка расположена параллельно плоскости щели в том случае, когда наблюдаемая спектральная линия создает дифракционную картину под наибольшим углом. Если же решетка наклонена под тем или иным углом по отношению к плоскости щели, то эффективный промежуток между рисками, т. е. угол дифракции, станет меньше.

Как видно из рис. 125, $\lambda = d \sin\theta = d(x/L)$, где L — расстояние от точки (центра) поворота до риски, имеющейся в середине основания зрительной трубы, а x — ее смещение перпендикулярно к центральному максимуму. Сам коэффициент пропорциональности равен отношению d/L.

Коэффициент пропорциональности можно следующим образом выразить через градуировочную длину волны, каковой в данном случае служит зеленая линия спектра ртути: $\lambda_{Hg} = x_{Hg}(d/L)$, т. е. $d/L = \lambda_{Hg}/x_{Hg}$.

В табл. 31 приведены данные проведенных спектрометрических измерений. Ошибка при определении λ обычно составляет около 0,3%, но никогда не превосходит 1%. (Справочные данные о длинах волн включены в эту таблицу в целях сравнения.)

ТАБЛИЦА 31

Трубка	Цвет	Расстояние, см	Длина волны λ, Å	
			измеренная	по справочным данным
Ртутная	Зеленый	18,66	Эталон	5461
Водородная	1) Густо-фиолетовый	14,03	4107	4102
	2) Фиолетовый	14,81	4335	4340
	3) Голубовато-зеленый	16,62	4865	4861
	4) Красный	22,39	6554	6563

Легко различить три яркие линии водорода. Затемнив комнату и дав глазам привыкнуть, можно увидеть и четвертую линию водорода в крайнем фиолете. Отдельные учащиеся могут испытывать некоторые трудности физиологического порядка с обнаружением самой дальней линии в области крайнего фиолета.

ТАБЛИЦА 32

n	n_i'	n_f	Расчетное значение	Измеренное значение	n	n_i'	n_f	Расчетное значение	Измеренное значение
2	3	1	0,8438		3	6	2	0,6250	0,6267
2	4	1	0,8000		4	5	3	0,6836	
2	5	1	0,7813		4	6	3	0,5833	
3	4	2	0,7407	0,7426	4	7	3	0,5359	
3	5	2	0,6614	0,6615					

В табл. 32 приведены расчетные и экспериментальные значения отношения величин, обратных длинам волн. Экспериментальные значения даны для длин волн, измеренных с помощью спектрометра. Расчетные значения вычислялись по формуле

$$\frac{1/\lambda_1}{1/\lambda_2} = \frac{1/n_i^2 - 1/n_f^2}{1/n_i'^2 - 1/n_f'^2}.$$

Постоянную Планка определяют из соотношения

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{2\pi^2 k^2 m}{h^3 c}\left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2}\right).$$

Измеренные значения длин волн дают при надлежащих значениях n_i и n_f среднее значение h, равное $6{,}622 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Ошибка, вносимая измерением длины волны λ, очень мала и составляет около 0,3%. Следовательно, погрешность определения h в данном опыте выражается в виде $h\alpha\lambda^{1/3}$, т. е. приблизительно равна 0,1%. Эта погрешность сопоставима с приводимыми в справочниках экспериментальными ошибками определения других физических констант, фигурирующих в соотношении, которое было взято нами для определения постоянной Планка.

Приборы и принадлежности: 1 спектрометр; 1 рулетка; кусок изоляционной ленты; 1 лист бумаги; 1 спектральная водородная трубка; 1 спектральная ртутная трубка; 1 экспериментальная установка высокого напряжения.

1. Опыт Максвелла. Проверка закона действия силы по зависимости обратной пропорциональности квадрату расстояния

То обстоятельство, что сила в законе Кулона изменяется в точности обратно пропорционально квадрату расстояния, а не просто тому или иному показателю степени, близкому к двум, точнее всего доказывается следующим простым, но изящным опытом. Полый проводящий шар сильно заряжают. Затем *изнутри* к нему подводят небольшой другой проводник и отводят. Как установлено экспериментально, такой проводник не отбирает от полого шара *никакого* заряда. Если бы внутри полого шара действовали какие-то электрические силы, то заряд полого шара увеличился бы или уменьшился за счет прикосновения к нему небольшого проводника, при каковом заряд получает возможность перераспределиться. Итак, этот простой опыт показывает, что внутри заряженного проводящего шара сила электрического действия равна нулю.

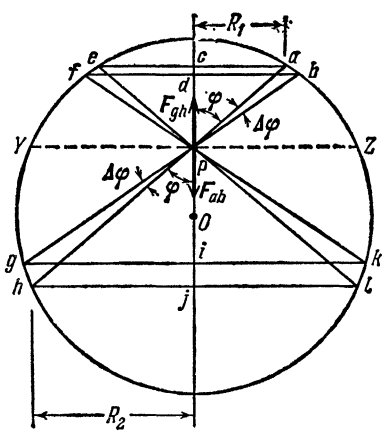


Рис. 126.

Рассмотрим силу электрического действия на небольшой пробный заряд, помещенный в ту или иную точку пространства P внутри равномерно заряженной сферической оболочки (рис. 126). Какова результирующая сила действия на пробный заряд, находящийся в точке P? Единственная возможность заключается в том, что такая сила должна действовать по направлению линии OP. Ведь сферическая оболочка обладает осевой симметрией относительно диаметра, проходящего через точки O и P, так что заряд, находящийся где бы то ни было на этой линии, не должен испытывать действия результирующей силы по любому направлению, кроме направления вдоль OP. Описанный выше опыт показывает, что результирующая сила действия на подобный пробный заряд действительно равна нулю. Легко доказать, что результирующая сила действия вдоль OP на заряд, находящийся в точке P, может быть равна нулю тогда и *только* тогда, когда результирующая сила действия на заряд со стороны каждой пары поперечных колец, подобных показанным на рис. 126 кольцам *abdfec* и *ghjlki*, равна нулю. Обозначим силы действия со стороны этих колец соответственно F_{ab} и F_{gh}.

Таким образом, наша задача сводится к установлению того, при каких условиях результирующая сила действия со стороны двух таких колец будет тождественно равна нулю. При этих условиях силы действия всех таких пар колец будут взаимно уничтожаться, а результирующая сила действия на заряд, находящийся в точке P, будет равна нулю.

Чтобы вычислить силу действия на находящийся в точке P заряд q со стороны *abdfec*, учтем, что все точки кольца находятся на одинаковом расстоянии r

от точки P (при условии, что кольцо имеет очень небольшую ширину). Итак, эта сила выразится в виде

$$F_{ab} = (Qq/r_1^n)\cos\varphi,$$

где n есть показатель степени в законе Кулона.

Множитель $\cos\varphi$ фигурирует здесь потому, что нас интересует только *составляющая* силы действия вдоль OP.

Полный заряд Q на рассматриваемом кольце равен плотности поверхностного заряда σ на сферической оболочке, помноженной на площадь A этого кольца. Но площадь A найдется как произведение длины окружности $2\pi R_1$ на высоту W_1. Сила действия на наш заряд со стороны другого кольца запишется подобным же образом:

$$F_{gh} = \frac{\sigma 2\pi R_2 W_2 q}{r_2^n}\cos\varphi.$$

Чтобы создать нулевой эффект, эти силы должны быть равны по величине. Следовательно,

$$\frac{\sigma 2\pi R_2 W_2 q}{r_2^n}\cos\varphi = \frac{\sigma 2\pi R_1 W_1 q}{r_1^n}\cos\varphi,$$

или

$$\frac{R_2 W_2}{r_2^n} = \frac{R_1 W_1}{r_1^n}, \text{ т. е. } \frac{R_2 W_2}{R_1 W_1} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^n.$$

Из рис. 127, где показано поперечное сечение через сферическую оболочку, видно, что $R_1 = r_1\sin\varphi$, а $R_2 = r_2\sin\varphi$. Далее,

$$W_1 = \widehat{ab} = \overline{an}/\cos\theta_1, \quad W_2 = \widehat{gh} = \overline{mh}/\cos\theta_2.$$

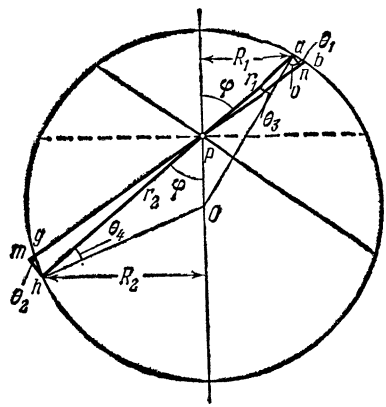


Рис. 127.

Но $\theta_2 = \theta_4$, $\theta_1 = \theta_3$ ($\theta_1 + v = 90°$, $\theta_3 + v = 90°$); следовательно, $\theta_1 = \theta_3$ и $\theta_3 = \theta_4$ (углы при основании в равнобедренном треугольнике); таким образом, $\theta_1 = \theta_2$. Итак,

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{\overline{an}}{\cos\theta_1}\cdot\frac{\cos\theta_2}{\overline{mh}} = \frac{\overline{an}}{\overline{mh}} = \frac{r_1}{r_2}.$$

Положив теперь

$$\frac{F_{ab}}{F_{gh}} = \frac{R_2 W_2}{R_1 W_1} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^n$$

и зная, что $W_1/W_2 = r_1/r_2$, $R_1 = r_1\sin\varphi$ и $R_2 = r_2\sin\varphi$, можно записать

$$\frac{F_{ab}}{F_{gh}} = \frac{R_2 W_2}{R_1 W_1} = \frac{r_2\sin\varphi}{r_1\sin\varphi}\frac{r_2}{r_1} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^n.$$

Единственное значение n, при котором только что выписанное уравнение превращается в истинное тождество, есть $n \equiv 2$.

Итак, из того экспериментального факта, что сила действия на точечный заряд, находящийся внутри сферической оболочки, равна нулю, однозначно следует, что показатель степени при расстоянии в законе Кулона должен быть равен двум. Точность определения показателя зависит от точности измерения нулевой силы. Эксперимент подобного рода можно провести с весьма высокой точностью.

Гораздо более сложные рассуждения ведут к доказательству того, что даже в случае несферического наружного проводника электрические силы внутри него все же равны нулю.

Непосредственным следствием из этого доказательства является то, что если заряженный проводящий предмет привести в соприкосновение с внутренней поверхностью полого проводника, то первый передаст весь свой заряд наружному

проводнику. Доказать это просто. Частицы взаимно отталкиваются, стремясь тем самым перейти с предмета. Если со стороны заряда на наружном проводнике нет никакого взаимодействия, то как только два проводника придут в соприкосновение, весь заряд с внутреннего проводника перетечет на наружный. Этот заряд немедленно утечет наружу во внешнем проводнике и, как это нами было доказано на опыте, не оказывает никакого противодействия, позволяющего какому бы то ни было остаточному заряду сохраниться на внутреннем проводнике. Почему наружу? *Внутреннюю* часть наружного проводника можно уподобить проводнику, находящемуся внутри другого полого проводника, а нам уже известно, что весь заряд покидает его, когда к тому открывается хотя бы малейшая возможность.

То обстоятельство, что весь заряд переходит наружу сферического проводника, часто ошибочно объясняют взаимным отталкиванием зарядов одинакового знака, вследствие чего они расходятся как можно дальше друг от друга, т. е. наружу. Так должно случиться только тогда, когда закон отталкивания выражается зависимостью обратной пропорциональности квадрату расстояния. При всяком ином законе действия силы какая-то часть заряда останется позади. Чтобы убедиться в этом, представим себе две заряженные бусинки, способные скользить по проволоке. Под действием силы взаимного отталкивания они начнут скользить к концам проволоки, каков бы ни был закон силы. Но наденьте на проволоку еще две бусинки. Они уже не станут двигаться к концам проволоки, потому что там уже находятся первые бусинки, которые будут отталкивать новые бусинки. Подобная же картина возникла бы и в трехмерном пространстве, если бы закон силы не предполагал строгой обратной пропорциональности квадрату расстояния.

2. Поля электрических сил

Во второй части раздела 27.3 излагается мысль о том, что действие сил со стороны нескольких зарядов на данный заряд можно определить посредством векторного сложения отдельных сил. В настоящем курсе не ставится задача делать большой упор на эту мысль. Но если у вас найдется время (!), то некоторые практические навыки в данном направлении принесли бы учащимся значительную пользу при прохождении ими настоящего курса физики. Задачу можно было сформулировать следующим образом. Пусть нам даны четыре одинаковых заряда q_1, q_2, q_3

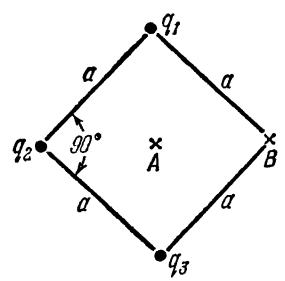


Рис. 128.

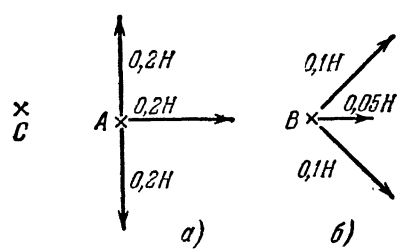


Рис. 129.

и q_4. Пусть заряды q_1, q_2 и q_3 закреплены неподвижно, как это показано на рис. 128. Какова сила их совокупного действия на заряд q_4, когда он находится в точке *A*? *B*? *C*? Сила взаимного отталкивания любой пары этих зарядов, когда расстояние между ними составляет a, равно 0,1 Н. Когда заряд q_4 находится в точке *A*, на него действуют три силы, показанные на рис. 129, *а*. Величина каждой из них была найдена из закона Кулона:

$$F = k\frac{q^2}{(a/\sqrt{2})^2} = k\frac{q^2}{a^2/2} = 2 \cdot 0{,}1 = 0{,}2 \text{ Н}.$$

Векторное сложение дает результирующую силу, равную 0,2 Н, с направлением направо. На рис. 129, *б* показаны силы, действующие на наш заряд, когда он находится в точке *B*. Две диагональные силы создаются двумя зарядами q, на-

ходящимися на расстоянии a, и равны, следовательно, 0,1 Н. Сила действия заряда q_2 на наш пробный заряд найдется в виде

$$F = k\frac{q^2}{(\sqrt{2}a)^2} = k\frac{q^2}{2a^2} = 0{,}05 \text{ Н}.$$

Произведя необходимое векторное сложение геометрически, найдем, что результирующая сила равна 0,101 Н (0,1· $\sqrt{2}$+0,05) и имеет направление слева направо.

Точку C можно взять на любом удалении от B. Предполагается, что эту часть задачи предстоит решить графически. Идея состоит в том, чтобы показать, что сила в C приближается к силе действия точечного заряда $3q$, находящегося где-то по близости от центра трех зарядов. Эта идея важна. На большом удалении от совокупности зарядов электрическая сила, испытываемая пробным зарядом, эквивалентна силе действия точечного заряда, равного алгебраической сумме совокупности зарядов и находящегося где-то поблизости от центра этой совокупности. Следовательно, на большом удалении от совокупности зарядов сила их действия обратно пропорциональна квадрату расстояния. При небольшом удалении сила не обязательно обратно пропорциональна квадрату расстояния и подлежит вычислению посредством векторного сложения.

3. Обсуждение дополнительных сведений, приведенных на стр. 155

Дополнительный материал, напечатанный мелким шрифтом на стр. 155, представляет собой необходимое звено в надлежащем усвоении количественного рассмотрения вопроса о скорости распространения электромагнитных волн. Помещаемый ниже материал помогает разъяснению некоторых изложенных там моментов.

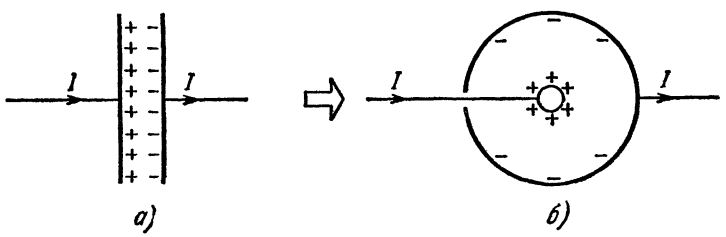


Рис. 130.

На стр. 155 рассмотрение этого вопроса начинается со случая точечного заряда, который понятен учащимся, но который может показаться им не имеющим отношения к переменному электрическому полю между проводящими пластинами, выбранному нами в качестве модели для рассмотрения. Если возникнет вопрос о связи между этими двумя моделями, то отвечать на него надо следующим образом.

В разделе 31.7 Учебника рассматриваются электрические поля между параллельными пластинами. Такие поля легко представить себе, но применительно к ним трудно проводить количественные определения доступными средствами. Поэтому давайте рассмотрим следующую ситуацию.

На рис. 130, *а* воспроизведена схема опыта, рассматриваемого в разделе 31.7. Две параллельные проводящие пластины заряжаются так, как показано на рис. 130. Ток, заряжающий левую пластину положительно, оставит правую пластину заряженной отрицательно. Ясно, что электрическое поле имеет *направление от левой пластины к правой* и что оно тем сильнее, чем дольше течет ток. Если ток прекратится, то поле останется. Оно просто перестанет изменяться. Таким образом, протекание тока эквивалентно изменению поля.

На рис. 130, *б* показана несколько измененная ситуация. Заряд подводится к небольшому проводящему шарику, находящемуся в центре полого сферического проводника. Наружный проводник снабжен небольшим отверстием, через которое проходит проволока, идущая к внутреннему шарику. Когда ток перетекает на

шарик, он оттекает от наружного проводника, оставляя его заряженным отрицательно. Два заряда равны друг другу, поскольку ток, перетекающий на шарик, всегда равен току, оттекающему от наружного проводника. Между двумя проводниками существует электрическое поле. Это радиальное поле с направлением от центра наружу (если небольшой положительный пробный заряд поместить в пространстве между сферами, то он станет перемещаться наружу). Таким образом, находящийся в центре проводник играет роль левой пластины на рис. 130, *а*, а наружный — правой.

Пусть в момент времени $t=0$ ни на наружном, ни на внутреннем проводниках нет зарядов, но, начиная с этого момента, на внутренний проводник станет оттекать *постоянный* ток I. Это означает, что I элементарных зарядов перетекает ежесекундно по проволоке на внутренний проводник. Через t с на нем окажется It элементарных зарядов, которые распределятся равномерно по поверхности шарика. Пусть небольшой зонд в один положительный элементарный заряд находится в точке P на расстоянии r от центра внутреннего шарика, как это показано на рис. 131. Нам известно из закона Кулона, что действующая на такой зонд сила будет

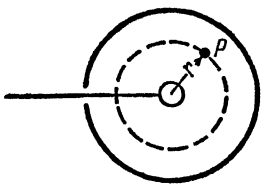


Рис. 131.

$$F = kIt \cdot 1/r^2.$$

Поскольку k есть надлежащая константа, It представляет собой заряд в центре, а 1 — величина зонда, т. е. пробного заряда. По нашему определению, электрическое поле есть просто сила, действующая на один элементарный заряд, так что электрическое поле на расстоянии r от центра равно

$$E_r = kIt/r^2.$$

Электрическое поле симметрично и повсюду одинаково на сфере радиуса r, показанной пунктиром на рис. 131. Введем понятие электрического потока Φ_E, который определим как произведение напряженности электрического поля на рассматриваемую площадь. (Можно было бы обойтись и без этого понятия, но оно несколько упрощает анализ и позволяет провести сравнение с магнитным потоком.) Электрический поток через показанную пунктиром сферу есть площадь этой сферы, умноженная на напряженность электрического поля:

$$\Phi_E = 4\pi r^2 kI/r^2 = 4\pi kIt.$$

Отсюда видно, что электрический поток изменяется со скоростью

$$\Delta\Phi_E/\Delta t = 4\pi kI$$

($\Delta\Phi_E = 4\pi kIt_2 - 4\pi kIt_1 = 4\pi kI(t_2 - t_1)$, т. е. $\Delta\Phi/(t_2 - t_1) = \Delta\Phi/\Delta t = 4\pi kI$). Итак,

$$I = \frac{1}{4\pi k}\frac{\Delta\Phi_E}{\Delta t}.$$

Отметим, что разговор нами был начат об электрическом поле через конкретную сферу радиуса r, а этот радиус, как оказалось, в ответе не фигурирует. Поток одинаков через *любую* сферу, проведенную между сферическими проводниками. Это необходимо, если скорость изменения потока считается «током». Таким образом выяснилось, что скорость изменения потока можно считать как бы продолжением тока, текущего в центральный шарик и оттекающего от полой сферы. Хотя это утверждение и нельзя считать строгим, дело обстоит так, словно ток I «обращается» в ток $\frac{1}{4\pi k}\frac{\Delta\Phi_E}{\Delta t}$, чтобы пересечь пустое пространство.

4. Резерфордовская формула рассеяния

Вывод приближенной формулы для малых углов рассеяния. Если вы сможете выделить время, то излагаемые в разделе 32.3 результаты можно представить более правдоподобно посредством вывода зависимости между углом рассеяния и прицельным расстоянием. Отклонение легко вычислить, если известно вектор-

ное изменение количества движения при соударении. Для этого достаточно построить треугольник векторной суммы, образуемой исходным количеством движения $m\boldsymbol{v}_i$, конечным количеством движения $m\boldsymbol{v}_f$ и векторным изменением $\Delta m\boldsymbol{v}$. Из условия сохранения количества энергии нам известно, что модули исходного и конечного количеств движения равны между собой (из условия $mv_i^2/2 = mv_f^2/2$ вытекает равенство $mv_i = mv_f$). Угол рассеяния θ образуется исходным и конечным количествами движения (рис. 132):

$$m\boldsymbol{v}_f = m\boldsymbol{v}_i + \Delta m\boldsymbol{v}, \quad AB/OB = AC/OC = \sin(\theta/2),$$
$$OB = OC = mv, \quad |\Delta m\boldsymbol{v}| = CB = AB + AC = 2mv\sin(\theta/2).$$

Изменение количества движения при соударении равно импульсу силы, действующей на частицу. Поскольку сила постоянной не остается, разобьем время соударения на многие небольшие интервалы времени Δt, достаточно короткие,

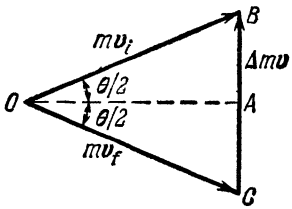


Рис. 132.

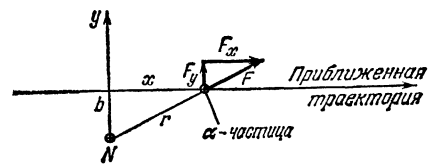


Рис. 133.

чтобы можно было считать силу почти постоянной на каждом интервале. Импульс и, следовательно, количество движения на каждом интервале времени Δt выражаются в виде произведения $\boldsymbol{F}\Delta t$. Просуммировав все векторы частичных импульсов $\boldsymbol{F}\Delta t$, найдем полный импульс и, следовательно, изменение количества движения в процессе всего соударения. При этом, разумеется, нужно учесть то, что $\boldsymbol{F}$ изменяется во времени, и брать всякий раз надлежащее значение для каждого интервала времени.

Все сказанное до сих пор пока совершенно верно. Но когда мы попытаемся составить оценку результата, могут возникнуть трудности. Сила $\boldsymbol{F}$ действия на частицу в момент времени t зависит от положения частицы в это время, а нам неизвестно, где она находится, если нами заранее не была определена ее траектория. Эту трудность можно обойти, если учесть, что при большом прицельном расстоянии частица будет двигаться почти по прямой линии и с почти постоянной скоростью. Поэтому у нас есть возможность определить приближенное значение импульса, считая, что им будет служить импульс этой частицы при прямолинейном движении с постоянной скоростью v_0. Если прицельное расстояние равно b, то приближенной траекторией будет прямая, проходящая на расстоянии b от ядра N. Сила действия на частицу найдется в виде

$$F = kq_\alpha q_N/r^2.$$

В нашем приближении x-компонента количества движения не меняется, если ее взять за весь процесс соударения (импульс слева на первой половине траектории погашается равным импульсом справа на второй, как это видно из рис. 133).

Чтобы вычислить y-компоненту импульса, рассмотрим y-компоненту силы, равную, как это следует из подобия треугольников,

$$F_y = F\frac{b}{r} = \frac{kq_\alpha q_N}{r^2}\frac{b}{r}.$$

Частица пролетает расстояние Δx за время Δt, равное $\Delta x/v$; следовательно, y-компонента импульса, действующего на частицу при ее движении на

промежутке Δx, выражается в виде

$$F_y \Delta x = \frac{F_y}{v} \Delta x = \left[\frac{k q_\alpha q_N b}{v r^3} \right] \Delta x.$$

Сумма всех малых импульсов выражается площадью под кривой

$$\frac{F_y}{v} = \frac{k q_\alpha q_N}{v} \frac{b}{r^3}$$

в зависимости от x. Такой график построен на рис. 134 (r вычисляли по формуле $r^2 = b^2 + x^2$). Площадь под кривой можно измерить (или вычислить методами высшей математики). Результат определения показывает, что импульс равен $2kq_\alpha q_N / bv$.

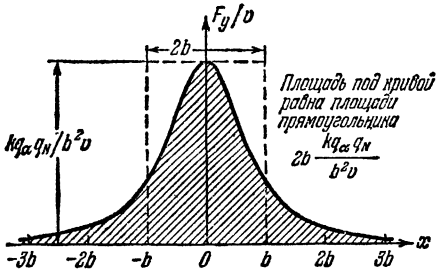


Рис. 134.

Приравняв импульс изменению количества движения $2mv \sin(\theta/2)$, получим

$$2 \sin(\theta/2) = r_0/b,$$

где

$$r_0 = kq_\alpha q_N / E_\alpha,$$

т. е. расстояние наибольшего сближения при лобовом соударении (см. раздел 32.4). Точный результат гласит

$$2 \operatorname{tg}(\theta/2) = r_0/b$$

(для малых углов $\sin(\theta/2) = \operatorname{tg}(\theta/2)$).

Вывод резерфордовской формулы рассеяния. Резерфордовская формула рассеяния выводится здесь в справочных целях. Хотя делается это довольно просто, вывод данной формулы предполагает знакомство с высшей математикой и использование постоянства углового количества движения, т. е. выходит за рамки знаний большей части учащихся.

Предположим, что ядро много массивнее α-частицы. Это позволяет считать его неподвижным. Поскольку траектория α-частицы лежит в плоскости, в которой находится и ядро, будем определять положение этой частицы двумя координатами x и y, измеряемыми от ядра как начала системы координат. В целях удобства выберем ось y так, чтобы она симметрично разделяла траекторию. Воспользовавшись законом движения Ньютона и законом силы Кулона, вычислим y-компоненту ускорения (рис. 135):

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{F_y}{m_\alpha} = \frac{F \sin\varphi}{m_\alpha} = \frac{k q_\alpha q_N}{m_\alpha} \frac{\sin\varphi}{r^2}.$$

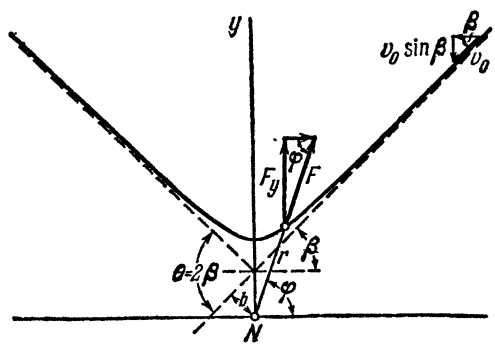


Рис. 135.

Так как действующая на α-частицу сила имеет направление вдоль линии, соединяющей ее с ядром, вращающего момента (момента силы) вокруг ядра не возникает; таким образом, угловой момент (момент количества движения) вокруг ядра остается постоянным. Угловой момент $mr^2(d\varphi/dt)$ в любой момент времени определяется как произведение расстояния от ядра r на составляющую количества движения по нормали к линии, соединяющей ядро с α-частицей:

$$mv_\perp = mr(d\varphi/dt).$$

α-частица движется по прямой, проходящей на расстоянии b от ядра, с количеством движения mv_0; таким образом, начальный момент количества движения есть произведение $b(mv_0)$. Из условия постоянства момента количества движения следует

$$mr^2\frac{d\varphi}{dt}=mv_0b, \quad \text{или} \quad \frac{d\varphi}{dt}=\frac{v_0b}{r^2}.$$

Воспользуемся последним соотношением, чтобы исключить время в уравнении для v_y:

$$\frac{dv_y}{d\varphi}=\frac{dv_y/dt}{d\varphi/dt}=\frac{(kq_\alpha q_N/m_\alpha)(\sin\varphi/r^2)}{v_0b/r^2}={}^1/_2\,v_0\,(r_0/b)\sin\varphi.$$

Здесь мы ввели сокращение:

$$r_0=\frac{kq_\alpha q_N}{m_\alpha v_0^2/2}=\frac{kq_\alpha q_N}{E_\alpha}.$$

Нам известно, что $\sin\varphi=-d\cos\varphi/d\varphi$ и что $v_y=0$ при $\varphi=\pi/2$; проинтегрировав уравнение $dv_y/d\varphi$, получим

$$v_y=-{}^1/_2v_0\,(r_0/b)\cos\varphi.$$

Пока α-частица находится еще далеко от ядра, угол φ равен углу β, так что наше последнее уравнение дает $v_y=-{}^1/_2v_0\,(r_0/b)\cos\beta$. Поскольку при $\varphi=\pi/2$ частица движется перпендикулярно к y, компонента v_y в данный момент времени равна нулю. Кроме того, в нашем случае $v_y=-v_0\sin\beta$. Чтобы эти два соотношения согласовывались друг с другом, необходимо соблюдение равенства

$$-{}^1/_2\,v_0\,(r_0/b)\cos\beta=-v_0\sin\beta.$$

Но, как это видно из рис. 135, $\beta=\theta/2$; следовательно,

$$2\operatorname{tg}\beta=2\operatorname{tg}(\theta/2)=v_0b.$$

ЧАСТЬ IV

ФИЗИКА

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И СТРОЕНИЕ АТОМА

Под редакцией
А. С. Ахматова

М., 1974 г., 528 стр. с илл.

Редактор *Л. И. Гладнева*

Техн. редактор *С. Я. Шкляр*

Корректоры *З. В. Автонеева, Н. Б. Румянцева*

Сдано в набор 1/IV 1974 г. Подписано к печати
25/VII 1974 г. Бумага 60×90¹/₁₆. Физ. печ. л. 33.
Усл. печ. л. 33. Уч.-изд. л. 36,76. Тираж 114 000 экз.
Цена книги 1 р. 42 к. Заказ № 1222

Издательство «Наука»
Главная редакция
физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография им. А. А. Жданова
Союзполиграфпрома при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-54, Валовая, 28