СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Под общей редакцией А. Д. Архангельского, Н. К. Кольцова, В. Ф. Кагана, В. А. Костицына, П. П. Лазарева и Л. А. Тарасевича

КНИГА 30

РОБЕРТ МИЛЛИКЭН

ЭЛЕКТРОН

РОБЕРТ МИЛЛИКЭН
(Robert Andrews Millican)
Профессор физики Технологического Института в Калифорнии (Пазадена)

ЭЛЕКТРОН

ЕГО ИЗОЛИРОВАНИЕ, ИЗМЕРЕНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО
В. А. ФОКА
ПОД РЕДАКЦИЕЙ
С. И. ВАВИЛОВА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА

ГИЗ № 5723. Р. О 11. 4207. Напечат.—3.000 эк.

2-я Гостипография им. т Ленина. - Одесса. Пушкинская. 18. Зак. № 2472.

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА.

Теоретические построения новой физики заложены на весьма загадочном фундаменте — постулатах теории относительности, теории квантов и теории электронов. Самостоятельное бытие электрона, не разлетающегося на части вопреки законам электростатики, стационарные, устойчивые движения электронов в атоме вопреки законам электродинамики, странные переходы электронов из одних стационарных состояний в другие с нарушением обычной временной связи действия и причины, постоянство скорости света вопреки законам механики — таковы некоторые из постулатов новой теоретической физики. Но на ряду с этим странным характером исходных положений выводы новой физики отличаются точностью и определенностью совершенно необычной в истории науки. Именно в безукоризненно точном совпадении выводов с результатами опыта и лежит объяснение стойкости указанных постулатов, несмотря на их странность и кажущуюся неприменимость a priori. Эти постулаты — результат опыта и должны быть приняты волей-неволей a posteriori. Начала, исходные положения физики заложены экспериментаторами, теоретики облекали их только в математические формы и извлекли возможные следствия.

Одним из первых в ряду блестящих экспериментаторов, основавших и обосновавших новую физику, следует назвать Роберта Милликэна, автора книги, перевод которой предлагается русскому читателю. Характерной чертой исследований Милликэна является их совершенно исключительная точность. Милликэн во многих случаях повторял опыты, придуманные и даже выполненные другими лицами, но делал их с такой тщательностью и осмотрительностью, что его результаты становились бесспорной и неизбежной базой теоретического построения. Основная заслуга Милликэна — измерение величины заряда электрона e и постоянной теории квантов h. Цифры Милликэна:

$$e = 4{,}774.10^{-10},$$
$$h = 6{,}54.10^{-27}$$

получены до 1916 г. и с тех пор (семь лет — громадный срок при неудержимом росте современной физики) никем не исправлялись. Эти цифры — основание всех точнейших выводов теории квантов.

Главная тема книги Милликэна — изложение его собственных работ и работ его сотрудников в области изучения свойств электрона. Перед нами блестящий образец точного, остроумного и целесообразного физического эксперимента. Это—наиболее ценная часть книги. Изложение вопросов, связанных с теорией строения атома, слищком сжато и в некоторых частях значительно устарело (оригинал книги вышел в 1917 г.). Мы не сочли нужным исправлять текст или вводить примечания в этом отношении, так как читатель может найти вполне современное изложение всех вопросов, связанных с радиоактивностью, изотопами, теорией спектров и прочим в книгах Резерфорда, Бора и Астона, переведенных в серии: „Современные проблемы естествознания". С другой стороны, изложение Милликэна во многом очень своеобразно, и с этой точки зрения нам представлялось желательным сохранить первоначальный текст книги, даже в заведомо устаревших местах. Историческая часть у Милликэна не всегда достаточно объективна, например, не отмечены заслуги Ленарда при изучении свойств электронов, работы Эренгафта представлены в слишком шаржированном виде и не отмечено, что Эренгафт независимо от Милликэна воспользовался тем же методом определения заряда электрона.

Кроме немногих примечаний в тексте, в конце книги добавлено краткое изложение главных работ, произведенных Милликэном и его сотрудниками за 1918 — 1923 г., с указанием соответствующей литературы.

С. Вавилов.

Декабрь 1923 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА.

Я надеюсь, что эта книга представит некоторый интерес как для физика - специалиста, так и для читателя, не обладающего специальными познаниями. В интересах тех и других читателей, мне представлялось желательным не прерывать нити излагаемых в тексте рассуждений более детальным разбором, нужным для лиц, подробно изучающих данный предмет. На основании этих соображений, все математические доказательства отнесены в приложения. Если же, несмотря на это, некоторые главы, как например VII и VIII, покажутся читателю неспециалисту непонятными, то я надеюсь, что, и пропустив эти главы, он все же вынесет некоторое представление об известных стадиях развития современной физики.

Р. Милликэн.

18 мая 1917.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

Стр.

Предисловие редактора V
Предисловие автора VII
Введение 1
Глава первая. Прежние воззрения на электричество 5
Глава вторая. Распространение законов электролиза на прохождение электричества через газы 20
Глава третья. Прежние попытки непосредственного определения *e* . . . 34
Глава четвертая. Общее доказательство атомной природы электричества 51
Глава пятая. Точное определение *e* 69
Глава шестая. Механизм ионизации газов рентгеновыми лучами и лучами радия 97
Глава седьмая. Броуновское движение в газах 112
Глава восьмая. Существует ли суб-электрон? 122
Глава девятая. Строение атома 141
Глава десятая. Природа лучистой энергии 173
Приложения 190
Добавление редактора 206

ВВЕДЕНИЕ.

Фалес Милетский первый заметил, что натертый янтарь приходит в новое и замечательное состояние, называемое нами состоянием электризации. Тот же философ впервые выразил убеждение, что существует некий великий объединяющий принцип, который связывает все явления природы в единое целое и делает их доступными человеческому разуму; за видимым разнообразием и изменчивостью вещей скрывается некоторый первичный элемент, из которого построены все вещи и разыскание которого должно составлять конечную цель всей науки о природе. Быть может, тот факт, что оба эти открытия сделаны одним и тем же человеком, есть случайное совпадение; но даже и в этом случае Фалесу Милетскому принадлежить двойная честь. Ибо он первый правильно осознал и правильно выразил еще около 600 г. до Р. Х. тот дух, который фактически являлся руководящим в развитии физики во все эпохи, и он же первый описал, хотя и грубым и несовершенным образом, упомянутое здесь замечательное явление. Изучение этого явления связало теперь многие отделы физики, стоявшие ранее совершенно обособленно, как то: учение о лучистой теплоте, свете, магнитизме и электричестве. В результате этого изучения мы в настоящее время стоим к первичному элементу ближе, чем когда-либо ранее.

Мы отметим здесь непрекращающееся стремление разложить сложное строение мира на простые составные части и построить все бесконечное разнообразие предметов, представляющихся нашим органам чувств, из различных сочетаний и движений возможно меньшего числа элементарных субстанций. Решение же вопроса о том, является ли это стремление наследием греческой мысли или же представляет врожденный инстинкт человеческого ума — мы предоставим философу и историку. Несомненно, однако, что конечной целью величайших из греческих мыслителей было полное изгнание произвола из природы и приведение всех ее процессов в стройную

и доступную человеческому разуму систему. Несомненно и то, что в истории физики периоды наибольшего прогресса совпадали с периодами, когда это стремление проявлялось наиболее интенсивным и наиболее плодотворным образом.

Так, первая половина девятнадцатого века бесспорно необыкновенно плодотворная эпоха. Вместе с тем, она является эпохой, когда ученые во главе с Дальтоном (Dalton) впервые могли получить непосредственным экспериментом количественные доказательства того, что атомный мир, завещанный нам древними, мир Левкиппа, Демокрита и Лукреция, состоящий, казалось, из бесконечного числа и бесконечного разнообразия атомов,—что этот мир далеко не так сложен, как предпологалось. В эту эпоху удалось свести количество необходимых элементов к небольшому сравнительно числу — семидесяти. Сделано это было при помощи вновь введенного понятия о молекуле, построенной из сочетаний различным образом расположенных атомов. Значение этой мысли ясно уже из того, что благодаря ей в течение немногих лет сформировались основы всей современной химии.

Текущий двадцатый век, несмотря на свою молодость,— ему всего шестнадцать лет [1]), — пытается сделать еще более знаменательный шаг. Добавив к двум мирам девятнадцатого века — миру молекул и миру атамов — еще третий мир — мир электронов, — он стремится свести число первичных элементов не более чем к двум, а именно, к положительному и отрицательному электрическим зарядам. Это стремление лежит в основе современного периода развития физики— периода бурного роста и необычайной плодотворности. В наше время новые воззрения и новые явления следуют одно за другим с такой быстротой, что даже сами участники научной работы едва ли вполне сознают совершающееся. Период этот характеризуется также тем, что промышленность заимствует и приспособляет для своих целей с невиданной ранее быстротой последние результаты физических и химических лабораторий. Как следствие этого, выводы исследований вчерашнего дня, предназначенных исключительно для того, чтобы расширить хоть немного наши познания о строении материи, подхватываются практичным деловым миром и утилизуются, например, для увеличения в сотни раз силы действия телефона или для извлечения в шестеро большего света из того же количества электрической энергии.

---

[1]) Книга написана в 1916 г. *Прим. перев.*

Поэтому не только академический интерес представляют, например, следующие факты: доказано, что электричество обладает атомным или зернистым строением; удалось изолировать и точно измерить элементарный электрический заряд; найдено, что этот заряд входит в качестве составной части во все семьдесят с лишим атомов химии. Эти факты обладают, разумеется, коренным и захватывающим интересом для человека, который стремится раскрыть последние тайны природы; но они полны смысла также и для практика. Часто случается, что обнаружение внутреннего механизма того или иного явления природы сопровождается тем, что человек рано или поздно находит средство овладеть этим механизмом и управлять им по своему усмотрению. Каждое увеличение познаний человека о происходящих в природе процессах дает в конце концов ровно такое же увеличение уменья контролировать природу и пользоваться ее скрытыми силами для своих целей.

В предлагаемой книге я имею в виду изложить опытное доказательство атомного строения элекричества, описать некоторые из наиболее замечательных свойств элементарной единицы электричества—электрона,—и, наконец, рассмотреть вопрос об отношении этих свойств к двум наиболее важным проблемам современной физики: строению атома и природе электромагнитного излучения. В своем изложении я не буду уклоняться от рассмотрения точных опытов количественного характера: как утверждал еще Пифагор, только на этой почве и возможно научное исследование физических явлений. С точки зрения этого философа задача всего естествознания состоит в изгнании качественных представлений и в замене их количественными соотношениями. Просматривая историю физики, мы увидим, что такие взгляды высказывались неоднократно, вплоть до настоящего времени. Один из наиболее крупных физиков последнего времени, лорд Кельвин (Lord Kelvin), писал:

„Если Вы можете измерять и выражать в числах то, о чем говорите, то об этом предмете вы кое-что знаете; если же Вы не можете сделать этого, то Ваши познания скудны и неудовлетворительны. Быть может, они и представляют первый шаг исследования, но едва ли позволительно думать, что Ваша мысль продвинулась до степени настоящего знания“.

Я предполагаю рассматривать главным образом те исследования, с которыми знаком непосредственно и детально, а именно, работы произведенные в этой области за последние годы в Райерсоновской лаборатории (Ryerson Laboratory). Тем не менее я надеюсь, что буду в состоянии дать справедливый и беспристрастный обзор как всех

предшествовавших работ, послуживших основанием для упомянутых исследований, так и работы, шедшей параллельно в других лабораториях. В популярном изложении представляется необходимым связать каждое крупное открытие, каждую новую теорию, каждый важный принцип, с именем какого-нибудь определенного лица. Но можно принять за общее правило, что в физике развитие происходит иными путями. Наука, подобно планете, растет преимущественно посредством весьма малых приращений. Каждое исследование обычно представляет видоизменение предыдущего; каждая новая теория строится, подобно средневековым соборам, которые возводились в течение веков многими архитекторами, и в ней сочетаются различные элементы. Это в особенности справедливо по отношению к электронной теории. Она представляет растущий организм, и я попытаюсь в каждом отдельном случае начертить родословное древо каждого связанного с нею исследования.

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

ПРЕЖНИЕ ВОЗЗРЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.

I. Развитие атомистической теории материи.

Между атомными теориями электричества и материи существует интересный и назидательный параллелизм. И в том и в другом случае возникновение мысли об атомном строении относится к самому началу развития данной науки. В обоих случаях эта мысль оставалась бесплодной вплоть до того момента, когда появление точных количественных методов измерения сообщало ей плодотворность. Для этого потребовалось две тысячи лет в случае теории материи и сто пятьдесят лет в случае теории электричества. Быстрое развитие атомных теорий совпало с тем моментом, когда обе области, которые рассматривались ранее, как совершенно обособленные, стали приближаться друг к другу. В результате такого сближения обе области стали казаться различными сторонами одного и того же предмета или явления, воскрешая тем самым древнюю веру Фалеса в принципиальное единство природы. Чтобы ознакомить читателя с тем, как произошла эта попытка к объединению, лучше всего сделать краткий обзор истории обеих идей.

Идея о том, что мир построен из атомов, находящихся в непрестанном движении, вырисовывалась в умах греческих философов из школы Демокрита (420 г. до Р. Х.), а также Эпикура— (370 г. до Р. Х.) и Лукреция (латинский поэт, 50 г. до Р. Х.) с той же отчетливостью, как и в уме современного физика. Но в первом случае идея эта основывалась исключительно на спекулятивной философии; во втором же случае основанием ее, как и почти всей науки двадцатаго века, служат прямые и точные количественные наблюдения и измерения. Мы не хотим сказать, что человеческий глаз когда-либо видел или может увидеть отдельный атом или молекулу. Это останется навсегда невозможным по следующей простой причине. Пределы нашей способности видеть малые пред-

меты определяются не дефектами наших инструментов, а самой природой глаза и световой волны, к которой чувствителен глаз. Для получения возможности видеть молекулы, наши коллеги—биологи должны разработать совершенно новый тип глаза. Этот глаз должен быть чувствителен к волне, длина которой в тысячу раз меньше длины волн, действующих на наш теперешний зрительный нерв.

Но, в конце концов, показания наших глаз заслуживают наименьшего доверия из всех показаний. Мы беспрестанно видим то, чего нет на самом деле, и это даже в том случае, когда сюда не вмешиваются наши привычки. Наибольшего доверия заслуживают те выводы, которые представляются нашему умственному взору в качестве логических следствий точных измерений. Поскольку дело касается атомной теории материи, эти выводы были все получены уже после 1800 г. Поэтому возраст обеих теорий материи атомной и кинетической, несмотря на их древнее происхождение, в известном смысле не превышает ста лет. В самом деле, все наши конкретные сведения о молекулах и атомах были получены, начиная с 1851 г., когда Джоуль (Joule)[1]) в Англии сделал первое абсолютное определение величины относящейся к молекуле, а именно средней скорости беспорядочного движения молекулы газа при обыкновенной температуре. Этот результат был столь же замечателен, как и много других, полученных вслед за ним в области молекулярной физики. Оказалось, например, что молекула водорода обладает головокружительной скоростью около 1800 *м* в секунду. Второй молекулярной величиной, подлежавшей определению, было среднее расстояние пробегаемое молекулой за время между двумя столкновениями; для этой величины существует специальный термин — средний свободный пробег молекулы. Она была впервые вычислена в 1860 г. Максвеллом (Clerk Maxwell)[2]). Тот же 1860 г. принес первый приблизительный подсчет числа молекул в одном кубическом сантиметре газа. В настоящее время мы можем опредлить это число, вероятно, с большею степенью точности, чем число жителей Нью-Иорка, хотя оно достигает чудовищной цифры в 27,05 миллиардов миллиардов.

---

[1]) „Mem. of the Manchester Lit. and Phil. Soc.“, (1851; 2-я серия), 107; „Phil. Mag.“, XIV (1857), 211.

[2]) „Phil. Mag.“, XIX (1860; 4-я серия), 28; Клаузиус (Clausius) также рассматривал уже в 1858 г. („Pogg. Ann.“, CV [1858], 239) некоторые свойства этой величины, но блестящий труд Максвелла по вязкости газов впервые сделал возможным ее вычисление.

Этот факт дает некоторое представление о том огромном прогрессе, который был достигнут в деле овладения тайнами мира молекул и атомов. Лицу, впервые попадающему в атмосферу современной научной мысли кажется поразительным тот факт, что сравнительно сложные и запутанные явления света, электричества и магнитизма были объединены в довольно стройные и удовлетворительные теории задолго до того, как были правильно поняты более простые явления, рассматриваемые в учении о теплоте и в молекулярной физике. Между тем, почти все качественные понятия атомной и кинетической теорий были разработаны тысячи лет назад. Остановимся несколько на принципах, провозглашенных Демокритом. Бэкон (Bacon) характеризовал Демокрита, как „человека более крупного калибра, чем Платон или Аристотель, хотя философия последних была провозглашаема и прославляема в школах шумными восхвалениями профессоров". Мы приведем высказанные Демокритом принципы в той формулировке, какую им дал Тиндаль (Tyndall). Мы увидим, насколько законченная атомистическая философия была создана около 400 г. до Р. Х. „Разрушение этой философии впоследствии", говорит далее Бэкон, „объясняется не столько нападениями на нее со стороны идеалистической школы, главными представителями которой были Платон и Аристотель, сколько теми нападениями, которым подверглась вся цивилизация со стороны Гензериха, Аттилы и варваров". Тот факт, что философия Аристотеля пережила этот период, объясняется Бэконом следующим образом: „В эпоху, когда вся наука человечества потерпела кораблекрушение, обломки ее, принадлежавшие к философии Аристотеля или Платона, будучи сделаны из более легкого и более раздутого материала, спаслись и дошли до нас, тогда как вещи более солидные потонули и были преданы почти полному забвению".

Вот принципы Демокрита, в том виде, как они были изложены Тиндалем:

1. Из ничего не происходит ничего. Ничто существующее не может быть разрушено. Все изменения происходят благодаря соединению и разделению молекул.

2. Ничто не происходит случайно. Всякое событие имеет свою причину, из которой оно вытекает с необходимостью.

3. Единственные существующие вещи суть атомы и пустое пространство; все остальное — чистое измышление.

4. Атомы бесконечны по числу и бесконечно разнообразны по форме; они постоянно сталкиваются друг с другом, и образующиеся при этом поперечные движения и вихри суть начала миров.

5. Разнообразие вещей обусловлено разнообразием их атомов в числе, размерах и сочетаниях.

6. Душа состоит из тонких, гладких и круглых атомов, подобных атомам огня. Эти атомы наиболее подвижны из всех. Они проникают всюду, насыщая все тела, и из их движений создаются явления жизни.

Эти принципы, если в них кое-что изменить и кое-что выкинуть, выдержали бы экзамен и ныне. Крупные успехи, достигнутые в новейшее время, заключаются не столько в изменении самих понятий и взглядов, сколько в изменении обоснования их. Перечисленные принципы были только мнениями одного человека или одной школы. Существовало множество других соперничавших с ними мнений, и никто не мог решить, которое же из них заслуживает предпочтения. Ныне же, по крайней мере у физиков, не осталось абсолютно никакой философии, кроме философии, опирающейся на атомистические основания. Однако, мы не могли бы утверждать этого даже в самое недавнее время, скажем, десять лет назад[1]). Ибо несмотря на закон кратных отношений и несмотря на множество других фактов, установленных химией и физикой девятнадцатого века, существовала группа передовых мыслителей, которая воздерживалась от признания этих теорий до самого недавнего времени. Наиболее выдающимся представителем этой группы был немецкий химик и философ, Вильгельм Оствальд (Wilhelm Ostwald), но и он, в предисловии к новому изданию своих „Основ химии", делает следующее, прямое и откровенное признание.

„Теперь я убежден, что в последнее время мы получили опытное доказательство прерывного или зернистого строения материи,—доказательство, которого тщетно искала атомная гипотеза в продолжении сотен и тысяч лет. Изолирование и подсчет газовых ионов с одной стороны, ... а с другой стороны совпадение Броуновского движения с требованиями кинетической гипотезы ..... дают право самому осторожному ученому говорить об опытном доказательстве атомной теории материи. Атомистическая гипотеза возведена, таким образом, в ранг научной прочно обоснованной теории".

II. Развитие теории электричества.

Теория зернистого строения электричества, в противоположность атомной и кинетической теории материи, не может похвастаться своим древним происхождением. Но подобно тому, как это было в случае последних теорий, человек, впервые высказавший предположение о природе электричества, полагал, что оно обладает атом-

[1]) В первые годы нашего века. *Прим. перев.*

ным строением. Однако, современная электронная теория получила свое развитие только за самые последние года, — за последние двадцать лет — не больше. До Вениамина Франклина (Benjamin Franklin) (1750), не только не было никаких теорий электричества, но если не считать сделанного греками открытия притягательных свойств натертого янтаря, то окажется, что до 1600 г. по Р. Х. об электричестве вообще не знали ничего. В этом году Гильберт (Gilbert), врач королевы Елизаветы и ученый, обладавший крупным талантом и большой ироницательностью, нашел, что стекляная палочка и около двадцати других тел, будучи натерты шелком, действуют подобно натертому янтарю греков. Гильберт формулировал этот факт, говоря, что стекляная палочка стала наэлектризованной (буквально — „наянтаренной", так как электрон значит по гречески янтарь) или, как мы теперь выражаемся, получила электрический заряд. В 1733 г. Дюфэ (Dufay), французский физик, нашел, что сургуч, натертый кошачьим мехом, также электризуется, но что электризация его отличается от электризации стекляной палочки. Именно, сургуч сильно притягивал всякое наэлектризованное тело, отталкиваемое стеклом, и отталкивал тела, притягиваемые стеклом. Таким образом он был приведен к необходимости различить два рода электричества, названные им „стекляным" и „смоляным". Около 1747 года Вениамин Франклин также обнаружил существование этих двух родов электризации и ввел для различения их термины „положительное" и „отрицательное" электричество. Итак, говорил он, мы условимся называть всякое тело наэлектризованным положительно, если оно отталкивается стекляной палочкой, натертой шелком, и наэлектризованным отрицательно, если оно отталкивается сургучем, натертым кошачьим мехом. Такими же остались и до сих пор наши определения положительного и отрицательного электрических зарядов. Заметим, что, вводя их, мы не вводим никакой теории электризации, но ограничиваемся простым описанием явлений.

Далее, Франклином был найден замечательный факт, который он несомненно имел в виду, когда предлагал свои термины „положительное" и „отрицательное" электричество. Точное доказательство этого факта было получено в 1837 году Фарадеем (Faraday) в опыте с формой для мороженого. Факт этот заключается в следующем: когда стекло натертое шелком, получает положительный электрический заряд, то самый шелк заряжается отрицательно, при чем этот отрицательный заряд в точности равен по-

ложительному заряду, полученному стеклом. Общее: положительный и отрицательный электрические заряды всегда появляются одновременно и в совершенно одинаковых количествах.

До сих пор не было введено никакой теории. Но для рационального объяснения рассмотренных явлений, и в частности последнего, Франклин сделал следующее предположение. То „нечто", которое было названо им электрической жидкостью (флюидом), или „электрическим огнем", входит в качестве составной части во всякую материю. Когда материя находится в нейтральном или ненаэлектризованном состоянии, то количество этого флюида — нормальное; количество, превышающее нормальное, проявляется в теле, как положительный электрический заряд, количество же, меньшее нормального, проявляется, как отрицательной заряд. Эпинус (Aepinus), профессор физики в С.-Петербурге, принимавший теорию Франклина, указал на следующее обстоятельство. Для объяснения отталкивания двух отрицательно заряженных тел необходимо предположить, что материя, отделенная от Фраклиновой электрической жидкости, отталкивает самоё себя, т. е. обладает свойствами, совершенно отличными от свойств обыкновенной ненаэлектризованной материи. Таким образом независимое существование материи было поставлено под угрозу. С целью оставить за материей привычные старые свойства и с целью выделить электрические явления в самостоятельный класс, другие физики той эпохи во главе с Зиммером (Symmer) высказали в 1759 г. другое предположение, а именно следующее. Материя в нейтральном состоянии не обнаруживает электрических свойств потому, что она содержит в качестве составных частей одинаковые количества двух жидкостей, называемых положительным и отрицательным электричеством. С этой точки зрения, положительно заряженное тело содержит избыток положительной жидкости, а отрицательно заряженное избыток отрицательной жидкости.

Таким образом возникла, так называемая, двухфлюидная теория (теория двух электрических жидкостей). Эта теория вновь разъединила понятия электричества и материи после того, как Франклин сделал шаг к их объединению. Несмотря на связанные с этой теорией затруднения, она господствовала в науке об электричестве в течение свыше столетия. Происходило это потому, что с чисто формальной стороны теория представлялась чрезвычайно удобной

для описания электрических явлений, а также для математической их формулировки. Наконец, она была удобна для целей классификации. Она дала возможность изучать электрические явления, как самостоятельную категорию, не затрагивая при этом каких-либо запутанных вопросов, об отношении, например, электрических сил к силам тяготения или сцепления. Но, несмотря на эти преимущества, она была только рабочей гипотезой. В самом деле, рассмотрим основные ее понятия: существуют две жидкости, которые могут развивать значительные силы, но вместе с тем абсолютно лишены веса — этого основного физического свойства тел; эти жидкости, без определенных физических свойств, полностью уничтожаются, будучи смешаны в одинаковых пропорциях. Ясно, что эти понятия в значительной мере лишены физического смысла. Дж. Дж. Томсон (J. J. Thomson) замечает в 1903 г. в своих Силлимэнских лекциях по этому поводу:

„Физики и математики, которые больше всего сделали для развития теории электрических жидкостей, занимались вопросами, связанными только с законами действия сил между наэлектризованными телами и с одновременным появлением одинаковых количеств положительного и отрицательного электричества. Понятию же о самих электрических жидкостях они придавали все более и более абстрактный характер, так что в конце-концов всякое упоминание об их физических свойствах стало казаться почти что неделикатным“.

Если стремиться к возможному уменьшению числа гипотез, то Франклинова однофлюидная теория в том виде, какой ей был придан Эпинусом, должна считаться более удовлетворительной. С математической стороны обе теории были тождественны. Различие между ними можно формулировать следующим образом. Видоизмененная однофлюидная теория требовала, чтобы материя, лишенная электрической жидкости, имела те самые свойства, которые двухфлюидная теория приписывала отрицательному электричеству, за исключением только свойства невесомости. Таким образом двухфлюидная теория предполагала существование трёх раздельных сущностей, а именно: положительного электричества, отрицательного электричества и материи, тогда как однофлюидная теория сводила эти три сущности к двум. В этом именно и заключалось самое важное отличие обеих теорий. Две субстанции однофлюидной теории были названы Франклином материей и электричеством; но с тем же правом можно было бы назвать их положительным и отрицательным электричеством, считая, что материя является просто сочетанием того и другого.

Несомненно, идея о зернистом строением электричества была чужда двухфлюидной теории; с другой стороны при развитии учения об электричестве эта теория являлась господствующей, поэтому почти никогда не упоминалось об атоме электричества за исключением чисто умозрительных построений. Этого нельзя, однако, сказать относительно теории Франклина. Его теория была, по существу, теорией материальной, и он несомненно верил в существование электрической частицы или атома, что видно, например, из следующих слов: „электрическая материя состоит из частичек, которые должны быть чрезвычайно мелкими, так как они могут проникать в обыкновенную, даже самую плотную материю так легко и свободно, что не встречают при этом заметного сопротивления". Когда Франклин писал эти строки, он едва ли мог думать, что окажется возможным изолировать и изучить отдельную частицу электрической жидкости. Атомная теория электричества была для него тем же, чем была атомная теория материи для Демокрита — чисто спекулятивным построением.

Первый намек на опытное подтверждение теории появился в 1833 году. В этом году Фарадей открыл следующий факт. Прохождение данного количества электричества через раствор, содержащий, например, соединение водорода, вызывает выделение на отрицательном электроде всегда одного и того же количества газообразного водорода независимо от того, какое именно водородное соединение содержалось в растворе, и независимо от крепости раствора. Далее было найдено, что количество электричества, потребное для выделения одного грамма водорода, выделяет из раствора, содержащего серебро, всегда одно и то же количество, а именно 107,1 граммов, серебра. А так как вес атома серебра ровно в 107,1 раз больше веса атома водорода, то это означало, что атом водорода и атом серебра связаны в растворе в точности с одним и тем же количеством электричества. Наконец, аналогичным путем было найдено, что все атомы, которые считаются в химии одновалентными, несут в точности одинаковое количество электричества; двувалентные атомы несут вдвое большее количество электричества, и вообще химическая валентность в точности пропорциональна количеству электричества, несомому данным атомом. Эти результаты бесспорно дают существенную опору атомной теории электричества.

Но, несмотря на всю важность и поразительность этих открытий, в то время никому не пришла мысль воспользоваться ими для заключения об атомной природе электричества. Открытия Фарадея

были сделаны в то время, когда природа электрической субстанции перестала привлекать к себе внимание ученых, работа которая направлялась совсем в иную сторону. Этот второй период развития теории электричества, период, продолжавшийся с 1840 по 1900 год, начался исследованиями того же Фарадея, хотя именно он сделал те блестящие открытия, о которых только что шла речь. В продолжение этого периода на электрические явления смотрят исключительно как на натяжения и напряжения в среде, окружающей наэлектризованное тело. До того времени представляли себе более или менее определенное нечто, называемое электрическим зарядом, и считали, что этот заряд находится на заряженном теле и действует на другие заряженные тела на расстоянии, совершенно так же, как сила притяжения земли действует на луну, или сила притяжения солнца на землю. Это понятие о действии на расстоянии было чуждо Фарадею; для случая электрических сил он нашел экспериментальные основания, говорившие против такого действия на расстоянии, — основания, отсутствующие в случае сил тяготения. Основания эти сводятся к тому, что электрическая сила между двумя заряженными телами зависит от природы промежуточной среды, тогда как сила тяготения, насколько известно, от нее не зависит. Итак, Фарадей представлял себе, что электрическая сила передается промежуточной средой совершенно таким же образом, как передается стержнем упругая деформация, произведенная на одном его конце. Далее, так как электрические силы передаются через пустоту, то Фарадей должен был предположить, что носителем и передатчиком электрических напряжений и натяжений является эфир. Предполагалось, что свойства эфира изменяются от присутствия материи, так как иначе нельзя было объяснить тот факт, что те же самые два заряда притягиваются с различною силою, смотря по тому, состоит ли промежуточная среда из стекля, или эбонита, или воздуха, или просто эфира. Эти идеи, высказанные Фарадеем и облеченные в математическую форму Максвеллом, отвлекли внимание от электрических явлений, происходящих внутри или на проводнике, несущем электричество; внимание было сосредоточено на натяжениях и напряжениях в среде, окружающей проводник. В 1886 г. Генрих Гертц (Heinrich Hertz) в Бонне (Германия) доказал непосредственным опытом, что электрические силы действительно передаются в форме электрических волн, которые распространяются в пространстве со скоростью света — в точности так, как это предсказывала теория Фарадея—Максвелла. После этого открытия триумф воззрений, основанных

на гипотезе натяжений, был полный. Увлекающиеся и не слишком осторожные физики писали в то время учебники, в которых утверждали, что электрический заряд есть ни что иное, как „состояние натяжения в эфире“, а электрический ток не представляет прохождения чего-либо определенного вдоль проволоки, но соответствует просто непрерывному „сдвигу“ или „нарушению натяжения“ в среде, заключенной внутри проволоки. Книга Лоджа (Lodge) „Современные взгляды на электричество“ („Modern Views on Electricity“) особенно способствовала распространению и истолкованию этой точки зрения.

Но на самом деле на опыте было доказано не то, что электричество есть состояние натяжения, а нечто иное. При появлении на теле электрического заряда среда, окружающая тело, становится местопребыванием новых сил, которые распространяются в ней, подобно упругим силам, с определенной скоростью. Поэтому вполне уместно сказать, что среда, окружающая заряженное тело, находится в состоянии натяжения. Но утверждение, что электрический заряд на теле производит состояние натяжения в окружающей среде, не равносильно утверждению, что электрический заряд представляет не что иное, как состояние натяжения в этой среде. Сказать, что человек, стоящий на мосту, производит механическое натяжение балок моста, не все равно, что сказать, что человек представляет ничто иное, как натяжение моста. Практическое различие между обеими точками зрения заключается в том, что в первом случае вы ищете и других способностей у человека, кроме способности производить натяжение моста, а во втором случае вы других свойств не ищете. Теория натяжений, по существу, совместимая с атомной гипотезой, фактически стала враждебной ей, ибо она повела к представлению, что натяжение распределяется равномерно по поверхности заряженного тела, а не излучается из определенных точек или центров, рассеянных по этой поверхности. Между 1833 и 1900 г.г. физик находился в следующем курьёзном положении. Когда он думал о прохождении электричества через раствор, он рисовал себе, следуя Фарадею, такую картину: через раствор проходят определенные точки или атомы электричества, при чем каждый атом материи несет с собой точное кратное (между одним и восемью) элементарного атома электричества. Когда же он думал о прохождении тока по металлическому проводнику, он совершенно оставлял атомную гипотезу и пытался представить себе явления, как непрерывный „сдвиг“ или „нарушение натяжения“ в материале про-

волоки. Другими словами, он признавал два типа электрической проводимости, совершенно отличные друг от друга — электролитическую проводимость и металлическую проводимость; а так как в большинстве задач физику приходилось иметь дело с металлической, а не с электролитической проводимостью, то представление об атомном строении, как общая гипотеза, оставалось почти, хотя и не совсем, забытым. Разумеется, было бы несправедливо по отношению к мыслителям этого периода сказать, что они не видели и не сознавали важности указанной пропасти между принятыми взглядами на электролитическую и на металлическую проводимость и что они попросту игнорировали затруднение. Существовали самые разнообразные мнения о причинах этого расхождения. Сам Максвелл в своем трактате „Электричество и Магнитизм“ (редакция 1873 года), в главе об электролизе (I, 375—386), признает важность законов Фарадея и даже заходит так далеко, что говорит: „для удобства описания мы можем называть этот постоянный молекулярный заряд (обнаруженный опытами Фарадея) одной молекулой электричества“. Тем не менее, несколько дальше он отбрасывает мысль, что этот термин может иметь какое-либо физическое значение; он говорит: „крайне невероятно, чтобы мы удержали в той или иной форме теорию молекулярных зарядов после того, как нам удастся понять истинную природу электролиза, так как у нас будет надежная основа, на которой можно построить правильную теорию электрических токов и таким образом освободиться от этих временных гипотез“.

Действительно, опыты Фарадея еще не доказали, что электрические заряды на металлических проводниках состоят из зерен электричества; они доказали только то, что заряды на ионах в растворах имеют определенные значения, которые для одновалентных ионов всегда одинаковы. Поэтому было вполне логично предполагать, как это сделал Максвелл, что постоянство заряда ионов в растворе объясняется особой способностью иона принимать с заряженной пластины один и тот же заряд. Не было оснований предполагать, что заряд на электроде составлен из целого числа электрических атомов.

С другой стороны, Вильгельм Вебер (Wilhelm Weber), в работах, написанных в 1871 г. (см. „Werke“, IV, 281), построил свою теорию электро-магнитизма на основе, почти совпадающей с видоизмененной теорией Франклина. Он объяснил все электрические явления, проявляющиеся на проводниках, включая термоэлектрический эффект и эффект Пельтье (Peltier), основываясь

на предположении, что атом построен из двух родов электрических частиц, при чем один род обладает значительно бо́льшей подвижностью, чем другой. Таким образом Вебер дал определенное толкование гипотезе молекулярных токов Ампера. В этой гипотезе созданной Ампером за пятьдесят лет до того, молекулы представлялись окруженными электрическими токами, которые делали их, маленькими электромагнитами. Вебер более определенно предполагал, что эти молекулярные токи возникают в результате обращения легких положительных зарядов вокруг тяжелых отрицательных. Приводим подлинные его слова.

„Для сравнения характера движения двух частиц может служить отношение их масс e и e', при чем подразумевается, что в e и e' включены массы весомых атомов, связанных с электрическими атомами. Пусть e — положительная электрическая частица. Пусть отрицательная будет ей равна и противоположна по знаку; обозначим ее поэтому через $-e$ (вместо e'). Весомый атом связан только с отрицательной частицей, ее масса поэтому становится настолько большой, что, по сравнению с ней, массу положительной частицы можно считать исчезающе малой. В таком случае можно представить себе частицу $-e$ находящейся в покое, а частицу $+e$ движущейся вокруг частицы $-e$. Эти две неодинаковые частицы, в описанных условиях, образуют Амперов молекулярный ток“.

Те же по существу идеи были разработаны и обобщены Лоренцом (Lorenz) и другими в течение последнего десятилетия развития современной электронной теории. Единственное различие заключается в том, что теперь установлено на опыте, что ничтожно малой массой или инерцией обладает отрицательная частица в сравнении с положительной, а не наоборот. Вебер объяснял даже термоэлектрический эффект и эффект Пельтье неодинаковостью кинетических энергий электрических частиц в различных проводниках [1]). Однако, здесь его объяснение сильно отклоняется от наших современных взглядов на теплоту.

С другой стороны, Джонстон Стоней (G. Johnston Stoney), в докладе, читанном на съезде Британской Ассоциации в Бельфасте (Belfast) в 1874 г., не только ясно формулировал атомную теорию электричества, но и дал оценку величины элементарного электрического заряда. Он получил число, которое заслуживало наибольшего доверия из всех, полученных до сравнительно недавнего времени чисел, а именно $0{,}3 \times 10^{-10}$ абсолютных электростатических единиц. В следующей главе, мы узнаем детальнее, что число это было

[1]) Weber, „Werke“, IV, стр. 294.

получено из рассмотрения количества электричества, необходимого для выделения из раствора одного грамма водорода, а также из подсчета на основании кинетической теории газов числа атомов водорода в двух граммах, т. е. в одной граммолекуле этого элемента. Работа Дж. Стонея была озаглавлена „О физических единицах природы" („On the Physical Units of Nature"), и, хотя доклад был читан в 1874 г., работа была опубликована полностью только в 1881 году [1]). Показав, что всякое физическое измерение может быть выражено в трех основных единицах, автор утверждает, что представляется возможным заменить наши современные, совершенно произвольные единицы (сантиметр, грамм и секунду) тремя естественными единицами, именно: скоростью света, постоянной тяготения и элементарным электрическим зарядом. Относительно последнего он говорит:

„Наконец, природа дает нам одно, вполне определенное количество электричества, независимое от рассматриваемых тел. Чтобы выяснить это, я формулирую закон Фарадея в следующих выражениях, которые, как я покажу, придадут ему ясность. На каждую химическую связь, разорванную внутри электролита, приходится определенное, всегда одинаковое, количество электричества, прошедшего через электролит. Это определенное количество электричества я назову E_1. Если мы примем его за единицу электричества, мы, вероятно, сделаем весьма большой шаг в изучении молекулярных явлений.

Таким образом мы имеем полное право предполагать, что V_1, G_1 и E_1, представляют три из ряда систематических единиц, которые являются в полном смысле естественными единицами и находятся в тесной связи с процессами, протекающими в мощной лаборатории природы".

Приведем еще один пример. Гельмгольц (Helmholtz), в своей Фарадеевской лекции, читанной в Королевском Институте (Royal Institution) в 1881 году, выражается так:

„Самым поразительным следствием закона Фарадея является быть может следующее. Если мы примем гипотезу, что простые вещества составлены из атомов,, то мы не можем избегнуть заключения, что и электричество как положительное, так и отрицательное, разделяется на определенные элементарные порции, которые ведут себя, как атомы электричества" [2]).

Эти слова можно было бы счесть за весьма прямое и недвусмысленное утверждение атомной теории электричества; однако в

---

[1]) „Phil. Mag.", XI (1881; 5-ая серия), 384.

[2]) „Vorträge und Reden", II, 296 (1884), „Wissenschaftliche Abhandlungen", III, 69.

той же самой лекции Гельмгольц, повидимому, представляет себе металлическую проводимость чем-то вполне отличным от электролитической проводимости. Он говорит:

„Все эти факты показывают, что электролитическая проводимость не ограничивается одними только растворами кислот или солей. Представляется, однако, весьма трудной задачей решить насколько широка область электролитической проводимости, и в настоящее время я не в состоянии дать на этот вопрос положительный ответ".

Эти слова показывают, что Гельмгольц думал о распространении понятия об электролитической проводимости на большинство изоляторов. Но нет никаких указаний на то, что он расчитывал распространить его на металлические проводники, или чтобы он представлял себе эти электрические атомы существующими в виде дискретных индивидуумов на заряженных металлах или идущими вдоль проволоки. Тем не менее, приведенные слова являются одним из наиболее прямых утверждений атомной природы электричества, какие только можно где-либо найти вплоть до 1899 г.

Предыдущих цитат достаточно, чтобы показать, что атомная теория электричества подобно атомной теории материи отнюдь не является чем-то новым, поскольку дело идет об основных представлениях. В обоих случаях встречались отдельные лица, которые стояли на точке зрения, почти совпадающей с современной. В обоих случаях новая стадия развития заключалась главным образом в появлении новых и точных экспериментальных данных, заставивших замолкнуть критиков и принудивших к оставлению других взглядов, которые до 1900 г. процветали наравне с атомными воззрениями, или даже имели преимущество перед ними. Даже в 1897 г. лорд Кельвин, вполне осведомленный о всех новых работах, относящихся к рентгеновым и катодным лучам, мог серьёзно поднимать вопрос о том, не может ли электричество быть „непрерывной однородной жидкостью". Он делает это в следующих словах.

„После фундаментального открытия, сделанного Варлеем (Varley) и блестяще подтвержденного Круксом (Crookes), именно, открытия катодных лучей, мне представляется неизбежным заключение, что, если мы останемся на точке зрения однофлюидной теории электричества, то электрической жидкостью должно являться смоляное, а не стекляное электричество. Математические соображения показывают, что, если смоляное электричество есть непрерывная однородная жидкость, то для толкования явлений контактного электричества (электричества прикосновения), которые вы видели сегодня, оно должно обладать свойством сцепления. Вполне мыслимо, хотя это и не представляется мне сейчас особенно вероятным, что эта

идея заслуживает тщательного рассмотрения. Пока я оставляю ее, однако, и предпочитаю обратиться к атомной теории электричества, которая считалась достойной рассмотрения Фарадеем и Клерком Максвеллом, была весьма определенно предложена Гельмгольцем в его последней лекции в Королевском Институте и принята большинством современных работников и преподавателей. Действительно, Фарадеевы законы электролиза вынуждают приписать электричеству атомные свойства . . .“ [1]).

Что же представляли те новые исследования, в результате которых еще в 1897 г. вырабатывалась эта перемена взглядов? Многое в них было сперва едва ли более убедительным, чем то, что было известно со времен Фарадея. Тем не менее, они заставили физиков размышлять о том, не придавалось ли натяжениям и напряжениям в эфире черезчур большое значение и не могло ли быть электричество, несмотря на несомненное существование этих натяжений, в конце концов, чем-то более конкретным, более материальным, чем его считала всепобеждающая теория Максвелла.

В результате работ последних 15 лет мы вернулись назад, весьма близко к тому положению, в котором был Франклин в 1750 г., с тем единственным отличием, что наша современная электронная теория основывается на множестве весьма прямых и весьма убедительных данных, изложение которых и составит предмет следующих глав.

---

[1]) Kelvin, „Contact Electricity and Electrolysis“, „Nature“. T. LVI (1897), 84.

ГЛАВА ВТОРАЯ.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗАКОНОВ ЭЛЕКТРОЛИЗА НА ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ЧЕРЕЗ ГАЗЫ.

I. Происхождение слова „Электрон".

Слово „электрон" было впервые предложено в 1891 году Джонстоном Стонеем в качестве названия для „естественной единицы электричества", т. е. для того количества электричества, которое должно пройти через раствор, чтобы освободить на одном из электродов один атом водорода или какого-нибудь одновалентного вещества. В статье, опубликованной в 1891 г., Стоней говорит:

„Необходимо обратить внимание на закон электролиза Фарадея, равносильный утверждению, что на каждую разорванную химическую связь приходится определенное и одинаковое во всех случаях количество электричества, прошедшее через раствор. Автор указал на эту формулировку закона в сообщении, сделанном Британской Ассоциации в 1874 г. и напечатанном в „Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society" в феврале 1881 г. и в „Philosophical Magazine" в мае 1881 г. (стр. 385—386). В этом сообщении показано, что величина этого весьма замечательного количества электричества равняется приблизительно $\frac{1}{10^{20}}$ обыкновенной электромагнитной единицы количества электричества, т. е. единицы в системе Ома. Это то же самое, что $\frac{3}{10^{11}}$ гораздо меньшей электростатической единицы системы C. G. S. Такой заряд соответствует в химическом атоме каждой связи. Таким образом, в одном химическом атоме могут быть несколько таких зарядов, и, повидимому, в каждом атоме их по крайней мере два. Эти заряды, которые удобно называть „электронами", не могут быть отделены от атомов, но они обнаруживаются, когда атомы вступают в химическое соединение. Если поместить электрон в точке P молекулы, которая совершает движение, описанное в последней главе, то вращение этого заряда вызовет электромагнитные колебания в окружающем эфире" [1]).

---

[1]) „Scientific Transactions of the Royal Dublin Society", IV (1891 II-ая серия), 563.

Приведенная цитата показывает, что слово „электрон“ было введено, для обозначения определенного элементарного количества электричества, без всякого указания на массу или инерцию, которая может быть с ним связана. Профессор Стоней предполагает, что каждый атом должен содержать по крайней мере два электрона: один положительный и один отрицательный, так как иначе атом, рассматриваемый как целое, не мог бы быть электрически нейтральным. Действительно, теперь можно считать установленным с большой степенью вероятия, что атом водорода содержит один положительный и один отрицательный электрон.

К сожалению, современные авторы не удержали первоначального значения слова „электрон“, введенного профессором Стонеем. Ясно, что нужно иметь слово, которое означало бы просто элементарную единицу электричества без всякого указания на то, где эта единица находится, с чем она связана, какой она обладает инерцией, и каков ее знак — положительный или отрицательный; очевидно также, что слово „электрон“ является, для обозначения этого понятия, наиболее логичным [1]). Слово „корпускула“, введенное Дж. Дж. Томсоном является весьма удобным для обозначения той, весьма малой инерции, которой, как найдено, обладает электрон в катодных лучах.

II. Определение величин $\frac{e}{m}$ и Ne из явлений электролиза.

Из опытов Фарадея нельзя было, разумеется, получить все данные, необходимые для определения того, какое количество электричества представляет электрон в нормальных единицах, в которых обыкновенно измеряются в лаборатории электрические заряды. Эта нормальная единица называется „кулоном“ и представляет количество электричества, проходящее в одну секунду при силе тока в один ампер. Фарадей показал только следующее. Данный ток,

---

[1]) Многие авторитетные ученые: Томсон (Thomson), Резерфорд (Rutherford), Кемпбелл (Campbell), Ричардсон (Richardson) и др. действительно удержали первоначальный смысл слова электрон, вместо того, чтобы обозначать им только свободный отрицательный электрон или корпускулу Дж. Дж. Томсона, масса которой равна $\frac{1}{1845}$ массы водородного атома. Все эти авторы в книгах или статьях, написанных после 1913 г., рассматривают наравне с отрицательным электроном также и положительный, хотя масса его никогда не бывает меньше массы атома водорода.

протекающий последовательно через растворы, содержащие различные одновалентные элементы (водород, серебро, натрий, калий, и т. д.), отлагает весовые количества этих веществ, в точности пропорциональные их соответственным атомным весам. Это позволило Фарадею утверждать, что одно и то же количество электричества связывается в процессе электролиза с одним атомом каждого из этих веществ. Он представлял себе, что этот заряд переносится атомом, или в некоторых случаях группой атомов, и он называл эту группу с ее зарядом „ионом", что значит „идущий" или „странствующий". Каким именно образом атомы получают в растворе заряд, Фарадей не знал, да и мы не знаем сколько-нибудь достоверно. Нам не известно также, какое количество растворителя ион связывает с собою и влечет через раствор. Мы можем утверждать, однако, что при растворении в воде некоторых веществ (напр. поваренной соли), многие из нейтральных молекул NaCl расщепляются под воздействием воды на положительно заряженные ионы натрия (Na) и отрицательно заряженные ионы хлора (Cl). Эти ионы, будучи противоположного знака, несомненно все время рекомбинируются (соединяются вновь), но другие ионы зато постоянно образуются вновь, так что в каждый данный момент в растворе находится много несоединенных ионов. С другой стороны, мы знаем, что в водном растворе медного купороса многие из нейтральных молекул $CuSO_4$ расщеплены на положительно заряженные ионы Cu и отрицательно заряженные ионы SO_4. В этом последнем случае мы находим, что тот самый ток, который в данный промежуток времени отлагает из раствора серебра весовое количество серебра, равное его атомному весу, будет в то же самое время отлагать из раствора медного купороса весовое количество меди, в точности равное половине ее атомного веса. Отсюда мы заключаем, что ион меди несет в растворе вдвое больше электричества, чем ион серебра, т. е. заряд в два электрона.

Мы не можем узнать из опытов Фарадея о количестве электричества e, представляемого одним электроном, можем, однако, определить с большой точностью отношение заряда иона E к массе атома, с которым ион связан в данном растворе.

В самом деле, прежде всего ясно, что весь ток, проходящий через раствор, переносится ионами,—если бы это было не так, то количества отлагаемых веществ не всегда были бы строго пропорциональны их атомным весам. Но в таком случае отношение полного количества электричества, прошедшего через раствор, к весу

отложившегося вещества должно быть равно отношению заряда E каждого иона к его массе m.

Согласно международному соглашению, абсолютная единица количества электричества в электромагнитной системе единиц была определена, как количество электричества, способное выделить из раствора 0,01118 грамма металлического серебра. Таким образом, если m относится к иону серебра, и E означает заряд этого иона, мы имеем для серебра

$$\frac{E}{m} = \frac{1}{0{,}01118} = 89{,}44 \text{ электромагнитных единиц.}$$

Если же m относится к иону водорода, то, так как атомный вес серебра в $\frac{107{,}88}{1{,}008}$ раз больше атомного веса водорода, то для водорода

$$\frac{E}{m} = \frac{1}{0{,}01118} \times \frac{107{,}88}{1{,}008} = 9573,$$

т. е. около 10^4 электромагнитных единиц.

Таким образом в электролизе величина $\frac{E}{m}$ меняется от иона к иону; для одновалентных ионов, для которых E одинаково и равно одному электрону e, отношение $\frac{E}{m}$ обратно пропорционально атомному весу иона. Для многовалентных ионов E может равняться 2, 3, 4 или 5 электронам; но так как водород по крайней мере в 7 раз легче всякого другого иона, встречающегося в растворе, и так как заряд его равен только одному электрону, то мы видим, что наибольшее значение, которое может принимать $\frac{E}{m}$ в электролизе, есть значение, соответствующее водороду, и равное приблизительно 10^4 электромагнитным единицам.

Хотя $\frac{E}{m}$ меняется в зависимости от природы иона, из него можно получить величину, которая является универсальной постоянной. Величина эта обозначается через Ne, где e означает, как и раньше, заряд одного электрона, а N есть постоянная Авогадро или число молекул в 16 граммах кислорода, т. е. в одной граммолекуле. Величину Ne мы можем получить непосредственно из $\frac{E}{m}$. Для этого нужно только подразумевать под m массу того воображаемого одновалентного

атома, атомный вес которого принят в нашей системе атомных весов за единицу; этот атом будет ровно в 16 раз легче атома кислорода или в 107,88 раз легче атома серебра. Для такого атома

$$\frac{E}{m} = \frac{e}{m} = \frac{107{,}88}{0{,}01118} = 9650.$$

Умножая числитель и знаменатель на N и помня, что для этого газа одна граммолекула представляет 1 грамм, и что, следовательно, $Nm = 1$, мы имеем:

$$Ne = 9650 \text{ абсолютных электромагнитных единиц.} \qquad (1)$$

Электромагнитная единица равна 3×10^{10} электростатическим единицам, откуда находим:

$$Ne = 28950 \times 10^{10} \text{ абсолютных электростатических единиц.}$$

Далее, так как одна граммолекула идеального газа при нормальных условиях, т. е. при 0°Ц. и 76 сант. давления, занимает 22412 куб. сант., то обозначая через n_1 число молекул такого газа в одном кубическом сантиметре при 0°Ц. и 76 сант., мы имеем

$$n_1 e = \frac{28950 \times 10^{10}}{22412} = 1{,}292 \times 10^{10} \text{ электростатических единиц.}$$

Если же под n подразумевать число молекул в кубическом сантиметре при 15°Ц. и 76 сант., то мы должны умножить предыдущее число на отношение абсолютных температур, т. е. на $\frac{273}{288}$; мы получим тогда

$$ne = 1{,}225 \times 10^{10}. \qquad (2)$$

Таким образом, хотя на основании явлений электролиза мы не можем вывести никакого заключения относительно величины заряда электрона, тем не менее эти явления позволяют нам утверждать, что если мы возьмем e столько раз, сколько молекул в одной граммолекуле, то мы получим ровно 9650 абсолютных электромагнитных единиц электричества. Такое количество электричества переносится током в 1 ампер в течение 10 секунд. До сравнительно недавнего времени можно было делать только грубые догадки относительно числа молекул в одной граммолекуле; но на основании этих приблизительных оценок, полученных из кинетической теории газов, мы можем при помощи формулы (1) произвести с той же точностью оценку величины e. Эти оценки, основанные по большей части на

очень недостоверных расчетах среднего радиуса молекулы воздуха, давали для N числа, лежащие между 2×10^{23} и 20×10^{23}. Таким именно путем Джонстон Стоней и получил в 1874 г. для e число $0{,}3 \times 10^{-10}$ эл.-ст. единиц. В книге О. Мейера (O. Meyer) „Кинетическая теория газов" („Kinetische Theorie der Gase"; стр. 335; 1899) приводится для n, числа молекул в одном кубическом сантиметре, цифра 6×10^{19}. Этому соответствовало бы $e = 2 \times 10^{-10}$. Во всех этих формулах e означает заряд, несомый одновалентным ионом в жидком растворе, а N или n отвлеченное число, которое является постоянной величиной, характерной для газа. Но предыдущий анализ не имеет ничего общего с вопросом о проводимости газов.

III. Природа газовой проводимости.

Вопрос о том, проводят ли вообще газы электричество, и если проводят, то является ли их проводимость электролитической или металлической или ни той ни другой, едва ли был поднят раньше 1895 г. Кулон (Coulomb) в 1785 г. заключил, что после того, как введены поправки на утечку через изоляторы, на которых покоится заряженный электрический проводник, известная доля утечки должна быть приписана самому воздуху. Он объяснял эту утечку предположением, что молекулы воздуха получают заряд от прикосновения и затем отталкиваются. Это заключение является однако несостоятельным. В самом деле, если бы оно было справедливо, то ни один проводник в воздухе не мог бы удерживать заряда более или менее продолжительное время даже при низких потенциалах. Кроме того, тогда не могло бы наблюдаться следующее явление: проводник, заряженный выше известного потенциала, сперва теряет свой заряд весьма быстро, а затем, когда потенциал упадет ниже известной критической величины, потеря заряда почти совершенно прекращается. Несмотря на ошибочность объяснения Кулона, оно встречалось в учебниках почти до 1900 г.

Варбург (Warburg) в 1872 г. снова предпринял опыты над утечкой заряда через воздух и был склонен приписывать всю утечку целиком частицам пыли. Правильное объяснение газовой проводимости было найдено уже после открытия в 1895 г. рентгеновых лучей. Опыты решающего значения были произведены Дж. Томсоном в лаборатории имени Кэвендиша (Cavendish) в Кембридже, в Англии. Толчком для этих новых исследований послужил тот факт, что рентгеновы лучи способны разряжать электроскопы, т. е. делать газ проводником. Через год или два то же свойство

было обнаружено у лучей радия. До того времени не было известно никаких способов воздействия на электрическую проводимость газов. Томсон и его ученики нашли, что проводимость, появившаяся в газах под влиянием рентгеновых лучей, исчезает после фильтрования газа через стеклянную вату [1]). Проводимость уменьшается также при пропускании газа через узкие металлические трубки. Наконец, проводимость совершенно уничтожалась после пропускания струи проводящего газа между двумя пластинами, которые поддерживаются при достаточно большой разности потенциалов. Первые два опыта показали, что проводимость производится чем-то таким, что может быть удалено из газа посредством фильтрования или посредством адсорбции стенками металлической трубки. Последний опыт доказал, что это „что-то" обладает электрическим зарядом.

Наконец, было найдено, что электрический ток в воздухе, находящемся между пластинами конденсатора и освещаемом рентгеновыми лучами, сначала возрастает при увеличении разности потенциалов пластин, а затем достигает значения, которое уже не меняется при дальнейшем увеличении разности потенциалов. Кроме того оказалось, что эта проводимость воздуха по прекращении действия рентгеновых лучей медленно исчезала в течение нескольких секунд. После всего этого выяснение качественной стороны явления можно было считать полным. Было ясно, что проводимость газа следует приписать заряженным частицам, создаваемым в воздухе с определенной быстротой постоянным источником рентгеновых лучей, и что эти заряженные частицы, среди которых очевидно должны быть как положительные, так и отрицательные, исчезают вследствие рекомбинаций, после прекращения действия лучей. Предельный ток или ток насыщения получался в том случае, когда данный источник ионизовал воздух между двумя пластинами конденсатора с переменной разностью потенциалов. Существование этого тока объясняется следующим образом. Представим себе, что электрическое поле между пластинами стало настолько сильным, что все ионы попадают на пластины немедленно по их образовании, при чем ни один ион не теряется вследствие диффузии или рекомбинации. При таких условиях, сила полученного тока не может, разумеется, увеличиваться от дальнейшего увеличения напряжения поля, — это и значит, что получен ток насыщения. Таким образом около 1896 г. было окончательно установлено, что проводимость газов носит электролитический характер.

---

[1]) J. J. Thomson and E. Rutherford, „Phil. Mag.", XLII (1896), 392.

IV. Сравнение газового иона с электрическим ионом.

Какого же рода ионы образуются таким образом в воздухе? В случае электролиза мы не знали абсолютной величины заряда одновалентного иона, но мы точно знали число ne. Нельзя ли найти то же число для ионов, принимающих участие в газовый проводимости? Положительным ответом на этот вопрос мы обязаны необыкновенному экспериментаторскому искусству и остроумию Дж. Томсона и его учеников в лаборатории Кэвендиша в Кэмбридже. Эти исследователи одновременно вырабатывали новые теоретические соотношения и изобретали новые методы для изучения проблем газовой проводимости.

Во первых, они нашли метод, позволяющий выразить величину ne через две постоянные, которые можно измерить. Постоянные эти называются: первая — подвижностью и вторая — коэффициентом диффузии газовых ионов.

Во вторых, они придумали новые способы измерения этих двух постоянных — постоянных, никем до того не определенных. Теория, дающая связь между этими постоянными и величиной ne, изложена в приложении A.

В результате получается соотношение

$$ne = \frac{v_0}{D} \cdot P, \tag{3}$$

где P есть давление газа, а v_0 и D подвижность и коэффициент диффузии ионов при этом давлении.

Таким образом, если мы найдем способ измерять подвижности v_0 атмосферных ионов, а также их коэффициенты диффузии D, мы сможем найти величину ne, где n есть отвлеченное число, именно, число молекул воздуха в кубическом сантиметре при 15° Ц. и 76 сант. давления, а e есть средний заряд атмосферного иона. В таком случае будет возможным сравнить эту величину с произведением, найденным на стр. 24 [формула (2)], где n имело то же значение, что и теперь, тогда как e означало средний заряд одновалентного иона в электролизе.

Методы, придуманные между 1897 г. и 1903 г. в лаборатории Кэвендиша для измерения подвижностей и коэффициентов диффузии газовых ионов, употреблялись и во всех позднейших исследованиях этих постоянных. Подвижности были впервые определены Резер-

фордом (Rutherford) в 1897 году[1]), а затем, более точным образом и другим способом, в 1898 году[2]). Зеленый (Zeleny) изобрел совершенно новый метод в 1900 году[3]), а Ланжевен (Langevin) еще один новый метод в 1903 году[4]). Все эти наблюдатели согласуются в том, что средняя подвижность (скорость в поле, равном единице) отрицательного иона в сухом воздухе равна приблизительно 1,83 сант. в секунду, тогда как подвижность положительного иона равна всего лишь 1,35 сант. в секунду. В водороде эти подвижности были около 7,8 сант. в секунду для отрицательного и 6,1 сант. в секунду для положительного иона. Вообще, в различных газах (но не в парах), подвижности изменяются приблизительно обратно пропорционально корню квадратному из молекулярного веса.

Коэффициенты диффузии для ионов были впервые измерены в 1900 г. Тоунсендом (Townsend), ныне профессором физики в Оксфорде, в Англии[5]), при помощи метода, изобретенного им и употреблявшегося после того другими наблюдателями в такого рода измерениях. Если мы обозначим коэффициент диффузии положительного иона через D_+, а отрицательного иона через D_-, то результаты измерений Тоунсенда в сухом воздухе могут быть формулированы так:

$$D_+ = 0{,}028,$$
$$D_- = 0{,}043.$$

Эти результаты интересны в двух отношениях. Во первых, они показывают, что по той или иной причине положительной ион в воздухе отличается большею медленностью, чем отрицательный, так как он движется в данном электрическом поле со скоростью, составляющей только 0,7 $\left(=\frac{1{,}35}{1{,}81}\right)$ скорости отрицательного иона, и диффундирует в воздухе со скоростью, равной лишь 0,7 $\left(=\frac{28}{43}\right)$ скорости диффузии отрицательного иона. Во вторых, результаты Тоунсенда показывают, что ион значительно более неповоротлив, чем молекулы воздуха, ибо коэффициент диффузии кислорода через

---

[1]) „Phil. Mag.", XLIV (1897), 422.
[2]) „Proc. Camb. Phil. Soc.", IX (1898), 401.
[3]) „Phil. Trans.", A. 195, p. 193.
[4]) „Ann. de Chimie et de Physique", XXVIII, 289 (1903).
[5]) „Phil. Trans.", A. 193, p. 129.

воздух равен 0,178, а это число в четыре раза превышает коэффициент диффузии через воздух для отрицательного иона, и в пять раз — для положительного. Эта неповоротливость ионов в сравнении с молекулами сперва рассматривалась всеми, как признак того, что газовый ион не есть одна связанная с электрическим зарядом молекула, но скопление нескольких молекул, от трех до двадцати, сдерживаемых одним зарядом. Если это толкование правильно, то по той или иной причине положительный ион представляет скопление большего числа молекул, чем ион отрицательный.

Позднее несколькими наблюдателями было показано, что отношение подвижностей положительного и отрицательного иона в других газах совсем не то, что в воздухе. В углекислом газе обе подвижности почти одинаковы, тогда как в хлоре, в водяном паре и в парах алкоголя положительный ион обладает, повидимому, несколько большей подвижностью, чем отрицательный. Это обстоятельство как будто говорит в пользу того, что отрицательный ион обладает большей подвижностью в электроположительных газах, а положительный — в сильно электроотрицательных газах. Такая зависимость отношения подвижностей от электроположительного или электроотрицательного характера газа обыкновенно считалась сильным доводом в пользу теории, рассматривающей ионы, как скопления молекул (теории ионов — скоплений).

Совсем недавно, однако, Лёб (Loeb)[1]), исследовавший в Райерсоновской лаборатории подвижности ионов в сильных электрических полях, и Веллиш (Wellish)[2]) в Йэле (Yale), измерявший подвижности при весьма низких давлениях, пришли к иным заключениям. Они полагают, что полученные ими результаты не согласуются с теорией ионов — скоплений, но должны быть скорее истолкованы в смысле, так называемой, теории ионов — атомов. Эта теория стремится объяснить относительную медленность ионов в сравнении с молекулами тем, что газообразная среда представляет движению заряженной молекулы бо́льшее сопротивление, чем незаряженной. Согласно этой гипотезе, ион является просто электрически заряженной молекулой.

К счастью, основанное на количественных данных доказательство электролитического характера газовой проводимости ни в какой

---

[1]) Leonard B. Loeb, „Proc. Nat. Acad.", II (1916). 345, также „Phys. Rev.", VIII (1916), 633.

[2]) Wellish, „Am. Journ of Science", XXXIX (1915), 583.

мере не зависит от того или иного взгляда на природу иона. Оно основывается просто на сравнении значений величины ne, полученных из электролитических измерений, со значениями, которые получаются, если подставить в уравнение (3) измеренные для газовых ионов величины v_0 и D.

Франк (Franck) и Вестфаль (Westphal)[1]) в Берлине повторили в 1908 г. измерения коэффициентов диффузии и подвижности. Результаты, полученные ими, согласуются, в пределах 4 или 5 процентов, с результатами опубликованными Тоунсендом в 1900 г. Для отрицательных ионов, появляющихся в газах под действием рентгеновых лучей, лучей радия и ультрафиолетового света, значения ne получаются, по мнению обоих наблюдателей, одинаковыми (в пределах ошибок наблюдения, составляющих около 5 или 6 процентов) со значением ne для одновалентных ионов в растворах, именно, с числом $1{,}23 \times 10^{10}$ абсолютных электростатических единиц. Этот результат показывает с большой степенью достоверности, что отрицательные ионы в газах, ионизованных рентгеновыми лучами или аналогичными агентами, несут в среднем тот же самый заряд, что и одновалентный ион при электролизе. Если обратиться к исследованиям, относящимся к положительному иону, то наше убеждение в неизбежности заключений, полученных рассматриваемыми методами, будет, быть может, несколько поколеблено. Дело в том, что Тоунсенд обнаружил следующий факт. Значение ne для положительного иона получалось примерно на 14 процентов больше, чем значение этой величины для отрицательного иона в электролизе. В виду экспериментальных неточностей этого метода, упомянутый факт не считался им, однако, необъяснимым. Но в 1908 г. он придумал для измерения отношения подвижности к коэффициенту диффузии второй метод. На этот раз он получил для отрицательного иона, как и раньше, $ne = 1{,}23 \times 10^{10}$, но для положительного иона получилось число, вдвое бо́льшее, а именно $2{,}46 \times 10^{10}$. Из этих последних опытов он вывел, что заряд, несомый положительным ионом в газах, ионизованных рентгеновыми лучами, в среднем вдвое больше заряда, несомого одновалентным ионом в электролизе. Франк и Вестфаль нашли, однако, что для величины ne для положительных ионов правильным является первоначальное число Тоунсенда. Отсюда они вывели, что только около 9 процентов положительных ионов могут нести двойной заряд

[1]) „Verh. der Deutsch. Phys. Ges.", XI (1909), 146 и 276.

2е. Исследования, которые будут описаны ниже, указывают, что заключения как Тоунсенда, так и Франка и Вестфаля неверны и что в обоих методах были какие-то ошибки. Но несмотря на эти затруднения, встретившиеся при исследовании положительных ионов, справедливость требует отметить следующее.

Тоунсенду первому удалось получить в своих опытах количественное подтверждение того факта, что средний заряд, несомый в ионизованных газах отрицательными ионами, одинаков со средним зарядом одновалентных ионов в растворах, и что средний заряд положительного иона в газах немногим отличается от этой величины.

Другой не менее важный успех был сделан в связи с изучением свойств газов, ионизованных рентгеновыми лучами. Единственным родом ионизации, известным до того времени, была ионизация, наблюдаемая в растворах; последня заключается в том, что сложная молекула, например, хлористого натрия (NaCl), распадается на положительно заряженный ион натрия и отрицательно заряженный ион хлора. Но ионизация, производимая в газах рентгеновыми лучами, была совсем иного рода, ибо она наблюдалась также в таких чистых газах, как азот или кислород, или даже в одноатомных газах, аргоне или гелие. Отсюда стало ясным, что нейтральный атом даже одноатомного вещества содержит в качестве составной части маленькие электрические заряды. Таким образом мы имеем здесь первое прямое указание на то, что, во первых, атом обладает сложным строением и, во вторых, в число его составных частей входят электрические заряды.

С этим открытием, которым мы обязаны новому агенту — рентгеновым лучам, атом, как последняя неделимая частица, окончил свое существование, и началась эпоха изучения составных частей самого атома. И с изумительной быстротой за последние двадцать лет были раскрыты одно за другим целый ряд свойств внутриатомного мира.

Физики стали усердно искать и действительно находили более или менее полные ответы на вопросы следующего рода:

1) Каковы массы составных частей атома, разделяемых рентгеновыми лучами и аналогичными агентами?

2) Как велики заряды, несомые этими составными частями?

3) Сколько имеется этих составных частей?

4) Как велики они, т. е. какие объемы они занимают?

5) В каком отношении они стоят к испусканию и поглощению световых и тепловых волн, т. е. к электромагнитному излучению?

6) Все ли атомы имеют одинаковые составные части? Другими словами, существует ли первичный „субатом", из которого составлены все атомы?

Частичный ответ на первый из этих вопросов принесло изучение электрических свойств разреженных газов в так называемых эвакуированных трубках, в которых газ находится в большом разрежении. Дж. Дж. Томсон [1]) и Вихерт (Wiechert) [2]) показали в 1897 г. независимо один от другого, что величина отношения $\frac{e}{m}$ для отрицательного иона в таких эвакуированных трубках равняется приблизительно $1{,}8 \times 10^7$ электромагнитным единицам, т. е. превышает примерно в 1800 раз величину $\frac{e}{m}$ для водородного иона в растворах. Так как приблизительная одинаковость $\frac{e}{m}$ в газах и растворах указывала на то, что e в обоих случаях было, по крайней мере, того же порядка величины, то отсюда с неизбежностью вытекало заключение, что отрицательный ион, появляющийся при разряде в безвоздушных трубках, обладает массой, т. е. инерцией, равной только $\frac{1}{1800}$ массы самого легкого из известных атомов, именно, атома водорода.

Кроме того, те же и другие экспериментаторы показали, что отношение $\frac{e}{m}$ для носителя отрицательного заряда всегда одинаково, какова бы ни была природа газа в разрядной трубке. В этом факте можно было усмотреть указание на положительный ответ на шестой из перечисленных вопросов. Это заключение подкреплялось открытием, сделанным в 1897 г. Зееманом (Zeeman), именно, открытием расщепления магнитным полем одной спектральной линии на две или на три. Это открытие будучи разработано с теоретической и количественной стороны, указало на существование внутри атома отрицательно заряженной частицы с тем же приблизительно значением отношения $\frac{e}{m}$.

---

[1]) „Phil. Mag.", XLIV (1897), 298.

[2]) „Verh. der phys. ökon. Ges. zu Königsberg", 1897.

Изучение величины $\frac{e}{m}$ для положительных ионов в безвоздушных трубках было впервые произведено с количественной стороны Вином (Wien) [1]), но более подробным и более успешным образом занимался им Дж. Дж. Томсон [2]). Результаты работ всех наблюдателей до настоящего времени вполне определенно показывают, что для положительного иона в газах значение $\frac{e}{m}$ никогда не превышает значения этой величины для водородного иона в электролизе, и что оно меняется в зависимости от взятого газа совершенно так же, как это имеет место в электролизе.

Короче говоря, акт ионизации в газах заключается, повидимому, в выделении из нейтрального атома одной или нескольких отрицательно заряженных частиц, названных Томсоном корпускулами. Остаток атома заряжен, разумеется, положительно, и масса его, практически, равна всей массе первоначального атома.

В газе при обыкновенном давлении отделённая корпускула должна вскоре связаться с нейтральным атомом, так как иначе мы не могли-бы объяснить того факта, что подвижности и коэффициенты диффузии для отрицательных ионов обыкновенно того же порядка величины, что и для положительных ионов. То обстоятельство, что инерцию составных частей диссоциированного атома необходимо исследовать в разреженных газах эвакуированных трубок, как раз и объясняется стремлением этих составных частей образовывать при обыкновенном давлении новые соединения.

Все предыдущие заключения относительно масс положительной и отрицательной составных частей атомов были получены до 1900 года, главным образом, сотрудниками лаборатории Кэвендиша. Последующие исследования не внесли в них существенных изменений.

Историей развития наших современных познаний о зарядах составных частей атома мы займемся в следующих главах.

---

[1]) W. Wien, „Wied. Ann.", LXV (1898), 440.

[2]) „Rays of Positive Electricity", London, Longmans, 1913.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ.

ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЕ ПОПЫТКИ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ *e*.

Методы, изложенные в предыдущих главах, показали, что средние заряды ионов в газах одинаковы или почти одинаковы со средним зарядом одновалентного иона в растворах. Ни в том, ни в другом случае мы не имели, однако, способов определения абсолютной величины этого среднего заряда; кроме того, у нас не было доказательства того, что все ионы данного рода, напр., ионы серебра или водорода, несут одинаковый заряд. На основании измеренной величины *en* можно было бы, конечно, найти абсолютную величину *e*, если бы только было известно *n* — число молекул в одном кубическом сантиметре газа при нормальных условиях. Но до сих пор мы имели только грубую оценку этого числа. Различные оценки отличались друг от друга раз в 10, и ни одна из них не была основана на соображениях, достаточно точных или даже вполне бесспорных.

I. Работа Тоунсенда по определению *e*.

Первая попытка непосредственного определения *e* была опубликована Тоунсендом в докладе, читанном в Кэмбриджском Философском Обществе (Cambridge Philosophical Society) 8-го февраля 1897 г. [1]). Метод Тоунсенда был совершенно новым по идее и весьма остроумным. Он представляется тем более интересным, что в нем содержатся все существенные черты некоторых из последующих определений *e*.

Уже Лапласу (Laplace) и Лавуазье (Lavoisier) за 100 лет до того было известно, что водород, выделяющийся при „растворении“ металла в кислоте, несет с собой электрический заряд. Этот „естественный способ“ получения заряда в газе почти не изучался, однако, до 1896 года, когда было открыто, что электрические свой-

---

[1]) „Proceedings“ IX (1897), 244.

ства газов могут быть искусственно сообщаемы им посредством рентгеновских лучей; это открытие дало сильный толчек изучению электрических свойств газов. Статья Тоунсенда появилась приблизительно через год после того.

Энрайт (Enriht)[1]) нашел, что водород, выделяющийся при растворении железа в серной кислоте, несет с собой положительный заряд. Но Оливер Лодж (Oliver Lodge)[2]) возражал на это, что заряд переносится, собственно, не самым газом, а брызгами; электризация брызг вследствие трения была хорошо известным явлением. Всегда предполагали, что молекулы газов, поднимающихся с электродов при электролизе, сами по себе нейтральны. Тоунсенд, однако, первый показал, что некоторые из этих молекул заряжены, хотя, несомненно, на каждую заряженную молекулу приходится миллион миллионов нейтральных. Он нашел далее, что водород и кислород, появляющиеся на противоположных электродах при электролизе серной кислоты, оба заряжены положительно. Если же электролитом является едкий калий, то и кислород и водород заряжены отрицательно. Сила тока, которым пользовался Тоунсенд при электролизе, менялась от 12 до 14 ампер. Этим путем он получал гораздо большее число ионов в кубическом сантиметре, чем при посредстве рентгеновых лучей. Именно, полный заряд кубического сантиметра достигал 5×10^{-3} электростатических единиц.

Когда эти заряженные газы пропускались сквозь воду в виде пузырей, они образовывали облако. Это облако можно было полностью удалить, пропуская его сквозь крепкую серную кислоту или какое-нибудь другое поглощающее воду вещество. Но когда газ выходил в комнатный воздух, он опять сгущал влагу и образовывал устойчивое облако. Тоунсенд говорит, что „можно образовать облако в положительно или отрицательно заряженном кислороде посредством пропускания его через воду и вновь уничтожить это облако, пропуская газ через серную кислоту, при чем в течение всего этого процесса теряется не более 20 или 25% первоначального заряда газа". Это означает следующее. Ионы сгущают вокруг себя воду, когда в воздухе имеется избыток влажности. Но когда ионы вносятся в совершенно сухой воздух, каким является, например, воздух в пузырьке, окруженном со всех сторон крепкой серной кислотой, то капельки воды испаряются и оставляют заряд моле-

---

[1]) „Phil. Mag.", XXIX (1890; 5-я серия), 56.
[2]) Там же; 292; „Nature", XXXVI, 412.

кулы воздуха таким, как он был; 20 или 25 процентов потерянного заряда представляют ту долю заряженных капелек, которая фактически пришла в соприкосновение с жидкостями, сквозь которые пропускался газ, и осталась в них.

Для определения заряда каждого иона Тоунсенд сделал такие предположения, опыты и расчеты.

1) Он предположил, что в насыщенном водяном паре каждый ион сгущал вокруг себя влагу, так что число ионов было одинаково с числом капелек.

2) Он определил при помощи квадрантного электрометра полный электрический заряд в каждом кубическом сантиметре газа.

3) Он нашел полный вес облака, пропуская его сквозь осушающие трубки и определяя увеличение веса этих трубок.

4) Он нашел средний вес капелек воды, составляющих облако; для этого он наблюдал скорость их свободного падения и вычислял их средний радиус на основании чисто теоретического закона, известного под названием закона Стокса (Stokes).

5) Он разделил вес облака на средний вес капельки воды. Частное от деления давало число капель; при справедливости предположения (1), число это должно было совпасть с числом ионов. Затем он разделил полный заряд в кубическом сантиметре газа на число ионов и получил отсюда средний заряд одного иона, т. е. величину e.

Краткое описание этих опытов дано в приложении *B*.

Одним из интересных побочных результатов работ Тоунсенда было следующее наблюдение. В отрицательно заряженном кислороде облака сгущались быстрее, чем в положительном; это указывало на то, что отрицательные ионы действуют в качестве ядер или центров для сгущения водяного пара более энергично, чем положительные ионы. Почти одновременно это наблюдение было сделано по другому способу Ч. Вильсоном (C. T. R. Wilson) [1], также в лаборатории Кэвендиша; оно играло довольно важную роль в последующих исследованиях. Открытие Вильсона заключалось в следующем. Когда воздух, насыщенный водяным паром, ионизуется рентгеновыми лучами радиоактивных веществ, и затем охлаждается посредством внезапного расширения, то для образования облака вокруг отрицательных ионов требуется меньшее расширение, чем вокруг положительных. Так, например, когда объем уве-

[1]) „Proc. Camb. Phil. Soc.“, IX (1897), 333.

личивался в отношении от 1 : 1,25 до 1 : 1,3 то в качестве ядер для сгущения действовали только отрицательные ионы, тогда как при расширениях, бо́льших, чем в 1,3 раза, оседали как отрицательные, так и положительные ионы.

В первых своих опытах, произведенных при помощи описанного метода, Тоунсенд получил, работая с положительно заряженным кислородом такие числа:

$$e = 2{,}8 \times 10^{-10} \text{ электростатических единиц;}$$

с отрицательно заряженным кислородом он нашел, что

$$e = 3{,}1 \times 10^{-10} \text{ электростатических единиц.}$$

В последующих опытах [1]) он получил вместо этих чисел соответственно 2,4 и 2,9, но в виду неизбежных ошибок он заключил, что можно считать оба заряда одинаковыми и равными приблизительно 3×10^{-10} электростатическим единицам. Таким образом он получил для e значение, почти одинаковое с тем, которое было тогда принято на основании вытекавшей из кинетической теории газов оценки n—числа молекул в кубическом сантиметре газа.

Слабые места в этой попытке непосредственного определения e были следующие: (1) предположение одинаковости числа ионов с числом капелек; (2) предположение справедливости закона падения Стокса; этот закон никогда не был проверен на опыте, и в том случае, когда капельки достаточно малы, можно было подозревать его неточность и с теоретической стороны; (3) предположение, что капельки были все одинаковы и падали с равномерной скоростью, которая не изменялась от испарения или от других возможных причин; (4) предположение, что во время измерения скорости падения облака в газе отсутствуют конвекционные токи.

II. Работы сэра Джозефа Томсона по определению e.

Первая попытка измерить e была выполнена в лаборатории проф. Дж. Томсона. Вторая попытка была сделана самим проф. Томсоном [2]) по методу, представлявшему близкое сходство с методом Тоунсенда во всех существенных деталях. Действительно, мы можем разложить опыты проф. Томсона на те же пять стадий, что и опыты Тоунсенда. Различие заключается главным образом

---

[1]) „Proc. Camb. Phil. Soc.", IX (1897), 345.

[2]) „Phil. Mag.", XLVI (1898), 528.

в стадии (2), т. е. в способе определения электрического заряда в кубическом сантиметре газа, и в стадии (3), т. е. в получении полного веса облака. Томсон получал ионы в пространстве A (рис. 1) при помощи рентгеновой трубки, непрерывно светившей, и измерял ток, который под влиянием весьма слабой электродвижущей силы E протекал сквозь A между поверхностью воды и алюминиевой пластинкой, закрывающей верхнюю часть сосуда. Пусть теперь n' есть полное число ионов одного знака в кубическом сантиметре, u скорость положительного, и v отрицательного иона под действием электродвижущей силы, равной единице, т. е. пусть u и v будут подвижности положительного и отрицательного ионов. Тогда плотность тока J (ток на единицу площади) будет, очевидно:

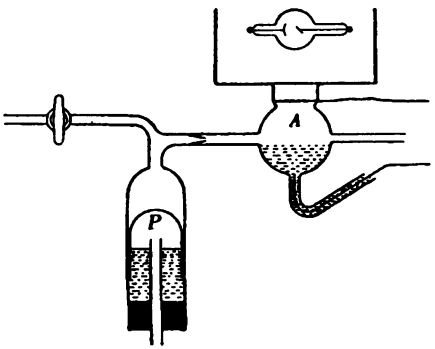

Рис. 1.

$$J = n'e\ (u + v)\ E \qquad (4)$$

J и E легко определялись в каждом опыте; $u + v$ было известно из предыдущих исследований Резерфорда, так что $n'e$, — плотность заряда одного знака (заряд одного знака в кубическом сантиметре газа) под ионизующим действием рентгеновых лучей, — можно было прямо получить из (4). Этот прием является простой заменой метода Тоунсенда для определения заряда в кубическом сантиметре газа, и принципиально оба метода совершенно одинаковы; различие же в экспериментальной установке обусловливалось тем, что ионы Тоунсенда были все одного знака, тогда как в опытах Томсона они были обоих знаков.

Получив таким путем величину $n'e$ из уравнения (4), Томсон должен был найти n' и затем решить уравнение относительно e. Для получения n' он поступал точно так же, как и Тоунсенд, а именно, заставлял ионы сгущать вокруг себя капельки воды и взвешивал полученное таким образом облако. Но для получения облака Томсон воспользовался только что упомянутым открытием Вильсона, заключающимся в том, что внезапное расширение и последующее охлаждение воздуха в A (рис. 1) делает ионы в A ядрами для образования капелек воды. Чтобы произвести это расширение, поршень P внезапно выдвигается вниз, так что пространство над ним увеличи-

вается. Так получается облако вокруг ионов в *A*. Вместо того, чтобы измерять вес этого облака непосредственно, как это делал Тоунсенд, Томсон пользовался здесь теоретическим расчетом. Именно, он вычислял вес облака на основании величины охлаждения, произведенного расширением, и на основании известной разности между плотностями насыщенного водяного пара при комнатной температуре и при температуре, получающейся при расширении. Этот способ получения веса облака был менее прямым и менее надежным, чем способ Тоунсенда, но он был единственным, применимым в данном случае при том методе, который употреблял Томсон для получения ионизованного газа и измерения плотности его заряда. Средняя величина капелек определялась совершенно так же, как в работах Тоунсенда, а именно, путем применения закона Стокса к наблюдаемой скорости падения вершины облака в камере *A*.

Тщательное рассмотрение опытов Томсона показывает, что в них имеются все те же теоретические неточности, которые встречались в работах Тоунсенда, но кроме того к ним присоединяются многие экспериментальные неточности. Наиболее важные из теоретических неточностей происходят, во первых, вследствие предположения справедливости закона Стокса и, во вторых, вследствие предположения, что число ионов одинаково с числом капелек. Оба наблюдателя старались найти какое-нибудь экспериментальное подтверждение второму и наиболее важному из этих предположений; но позднейшие работы Г. А. Вильсона (H. A. Wilson), Квинке (Quincke) и мои привели к следующему выводу. Облака, образуемые по способу Ч. Т. Р. Вильсона (C. T. R. Wilson), состоят обыкновенно из капелек, из которых некоторые могут нести один заряд, другие два, третьи десять, или вообще любое число зарядов. Мне никак не удалось, несмотря на весьма тщательное экспериментирование, получить условия, при которых было бы хотя бы приблизительно верно предположение, что каждая капелька несет один только заряд. Квинке недавно опубликовал работу, где он приходит к тому же заключению.[1])

С другой стороны, если мы сравним экспериментальные неточности в работах Тоунсенда и Томсона, то будет сразу очевидно, что предположение, что облака не испаряются в течение того времени, пока определяется скорость их падения, представляется еще более сомнительным в опытах Томсона, чем в опытах

[1]) „Verh. d. D. Phys. Ges.", XVI (1914), 422.

Тоунсенда, и это по следующей причине. В опытах Томсона облака образуются при внезапном расширении, влекущем за собою понижение температуры, и несомненно, что, пока температура восстанавливается, капельки должны испаряться. Далее, это внезапное расширение делает существование конвекционных потоков еще более вероятным в работах Томсона, чем в работах Тоунсенда; между тем эти конвекционные потоки могли сделать неверным вычисления радиуса капли из скорости падения. Результаты, полученные Томсоном в различных опытах, давали числа лежащие между $5{,}5 \times 10^{-10}$ и $8{,}4 \times 10^{-10}$. Окончательно принятие им и приведенное в опубликованной работе число было $6{,}5 \times 10^{-10}$. В 1903 г. Томсон опубликовал, однако [1]), некоторые новые работы по определению e, в которых он повторил определение этой величины, пользуясь в качестве ионизующего агента, вместо рентгеновых лучей, излучением радия; он получил число $e = 3{,}4 \times 10^{-10}$. Он объяснял разницу тем, что на водяной пар действовали почти исключительно более активные отрицательные ионы, положительные же ионы не оседали вместе с облаком, как это предполагалось раньше. В новых опытах он производил расширения более быстрые, чем раньше, и заключил, что, хотя в прежних опытах предположение о равенстве числа ионов числу частиц и оказалось неверным, оно справедливо для второй серии опытов. Действительно, если бы Томсон получил только половину ионов в первой серии опытов, и все ионы во второй, то во втором случае число должно было бы получиться вдвое меньшим, чем в первом, как это и было на самом деле. Хотя опыты Томсона были интересным и важным видоизменением опытов Тоунсенда, они едва ли дали нам более точное значение величины e.

Следующий шаг вперед в попытках определить e был сделан в 1903 г. Г. А. Вильсоном (H. A. Wilson) [2]), также в лаборатории Кэвендиша.

III. Метод Г. А. Вильсона.

Изменение, внесенное Вильсоном в постановку опытов Томсона, состояло в следующем. Он помещал внутри камеры A две горизонтальные круглые латунные пластинки в $3^1/_2$ *см.* диаметром и на расстоянии от 4 до 10 миллиметров друг от друга; к этим пластинам он при-

[1]) „Phil. Mag.", V (1903; 6-я серия), 354.

[2]) Op. cit., p. 429.

ключал полюсы батареи в 2000 вольт. Получая отрицательно заряженное облако, он наблюдал быстроту его падения в пространстве между пластинами сперва в отсутствии электрического поля, а затем (для другого облака) под действием как электрического поля, так и поля тяжести. Пусть mg есть сила тяжести, действующая на капли верхней поверхности облака, а $mg + Fe$ сила тяжести плюс электрическая сила, происходящая от действия поля F на заряд e; пусть далее v_1 есть скорость падения под действием одной тяжести, а v_2 скорость падения под действием как тяжести, так и электрического поля. Допуская, что отношение действующей силы к произведенной скорости одинаково как для заряженной частицы, так и для незаряженной, найдем:

$$\frac{mg}{mg + Fe} = \frac{v_1}{v_2}. \tag{5}$$

С другой стороны, закон Стокса дает

$$v_1 = \frac{2}{9}\,\frac{ga^2\sigma}{\eta}. \tag{6}$$

где a есть радиус, σ плотность, v_1 скорость капли под влиянием силы тяжести g, а η коэффициент внутреннего трения (вязкости) воздуха. Комбинируя последние две формулы и исключая m посредством уравнения

$$m = \frac{4}{3}\pi a^3\sigma, \tag{7}$$

Вильсон получил

$$e = 3{,}1 \times 10^{-9}\frac{g}{F}(v_2 - v_1)\,v_1^{\frac{1}{2}}. \tag{8}$$

Здесь величины η и σ заменены их численными значениями; впрочем, для насыщенного воздуха при температуре, наступающей тотчас же после расширения, значения эти известны лишь неточно.

Метод Вильсона представляет действительный шаг вперед в том отношении, что он обходится без произвольного допущения, что число капелек равно числу отрицательных ионов. В самом деле, здесь наблюдается только быстрота падения вершины облака; кроме того, более сильно заряженные частицы увлекаются полем вниз быстрее, чем менее сильно заряженные. Значит, фактически измерения производятся здесь над капельками, заряжен-

ными меньше всего. Что касается остальных неточностей и допущений, присущих опытам Томсона и Тоунсенда, то все они в равной мере относятся и к опытам Вильсона. Кроме того, к ним присоединяется еще новое и довольно существенное предположение, а именно, что облака, образованные при последовательных расширениях, одинаковы в смысле величины капелек. Первое уравнение метода Вильсона написано для того случая, когда v_1 и v_2 измерены для той же самой капли, тогда как фактически измерения производились над совершенно различными каплями. Я лично нашел, что точное воспроизведение характера облака при последовательных расширениях представляется весьма сомнительным. Далее, метод Вильсона предполагает равномерность поля между пластинами — предположение, которое может сильно удаляться от истины.

Вильсон обходился, как мы сказали, без предположения равенства числа капелек числу ионов, что делало его определение e более надежным, чем методы его предшественников, тем не менее фактически достигнутая точность была невелика, в чем можно убедиться из рассмотрения его собственной сводки результатов. Он сделал одиннадцать различных определений, в которых e колебалось от $e = 2 \times 10^{-10}$ до $e = 4{,}4 \times 10^{-10}$. Его одиннадцать чисел следующие:

Таблица I.

e	e	e	e
$2{,}3 \times 10^{-10}$	$2{,}7 \times 10^{-10}$	$3{,}8 \times 10^{-10}$	$2{,}0 \times 10^{-10}$
$2{,}6 \times$ „	$3{,}4 \times$ „	$3{,}0 \times$ „	$2{,}3 \times$ „
$4{,}4 \times$ „	$3{,}8 \times$ „	$3{,}5 \times$ „	Среднее $3{,}1 \times 10^{-10}$

В 1906 г., неудовлетворенный разноречивостью этих результатов, автор повторил опыты Вильсона, при чем, однако, не получил большего согласия, чем Вильсон. Действительно, неустойчивость, искажение и неопределенность верхней поверхности облака не позволяли расчитывать на получение надежных чисел, и автор счел свои результаты не настолько ценными, чтобы их стоило опубликовать. Тем не менее, на основании этих наблюдений было сделано заключение, что можно увеличить точность, если внести следующие изменения в постановку опытов: во-первых, пользоваться в качестве ионизатора радием вместо рентгеновых лучей; во-вторых,

употреблять более сильные электрические поля и тем самым увеличить разность между v_1 и v_2, которая в опытах Вильсона была совсем мала, и, в третьих, наблюдать падение облака на меньших расстояниях и в течение более коротких промежутков времени с целью уменьшить ошибку от испарения облака за время наблюдения. На основании этих соображений была построена аккумуляторная батарея в 4000 вольт, и летом 1908 г. Бегеман (Begeman) и автор, пользуясь в качестве ионизатора радием, вновь повторили опыты и опубликовали некоторые результаты, которые несколько лучше согласовались между собой, чем результаты Вильсона [1]). В качестве среднего из десяти наблюдений, которые колебались от 3,66 до 4,37, число $e = 4{,}06 \times 10^{-10}$. Одновременно мы указали, что хотя нами не вполне исключена ошибка от испарения, мы тем не менее полагаем, что эта ошибка сравнительно обезврежена, и что наше окончательное число, хотя оно и больше чисел Вильсона или Томсона (соответственно 3,1 и 3,4), должно тем не менее считаться более близким к истинному значению.

IV. Метод уравновешения капель.

Сознавая, однако, что быстрота испарения облака оставалась неизвестной, я попытался затем придумать способ, который бы вполне исключал эту неопределенную величину. Мой план состоял в следующем. В предыдущих опытах электрическое поле могло только немного увеличить или уменьшить скорость падения верхушки облака под действием силы тяжести. Теперь же я хотел усилить это поле настолько, чтобы верхняя поверхность облака оставалась на постоянной высоте. В этом случае являлась возможность с точностью определить скорость испарения облака и принять ее в расчет при вычислениях.

Эта попытка в первоначальной форме потерпела неудачу. Но она привела к видоизменению рассматриваемого метода, важное значение которого, очевидное с самого начала, было доказано дальнейшими опытами, благодаря чему стало впервые возможным производить все измерения над *отдельными* капельками. Таким образом окончательно исключались все сомнительные предположения и экспериментальные неточности, связанные с тем методом определения e, который был основан на наблюдении облака. Но, что еще важнее, явилась возможность иссле-

[1]) „Phys. Rev.". XXVI (1908), 198.

довать свойства отдельных электронов и определить, действительно ли разные ионы несут один и тот же заряд. До этих опытов относительно природы электричества в газах и растворах можно было высказать два предположения, другими словами, можно было держаться различных мнений относительно того, что представляет собою электрон, фигурировавший сперва в опытах Фарадея над растворами, а затем в опытах Тоунсенда и Томсона над газами. Во первых, можно было предполагать, что электрон является действительно атомом электричества, заряд которого всегда одинаков. Во вторых, можно было думать, что он представляет только статистическое среднее зарядов самой разнообразной величины. Упомянутое видоизменение нашего метода определило окончательный выбор между этими двумя предположениями. Заметим, что второе предположение защищалось многими до самого опубликования рассматриваемых опытов и даже после него. Мы обсудим сейчас этот вопрос более подробно.

Первое определение зарядов отдельных капелек было сделано весной 1909 г. Об этих опытах было доложено в августе 1909 г. на собрании Британской Ассоциации в Виннипеге (Winnipeg), сводка результатов была напечатана в 1909 г. в декабрьском номере „Physical Review“, и, наконец, полностью опыты были описаны в „Philosophical Magazine“ за февраль 1910 г. под заглавием „Новое видоизменение метода облака для определения элементарного электрического заряда и наиболее вероятная величина этого заряда“. Нижеследующие выдержки из этой статьи дают понятие о результатах этого первого определения электрических зарядов, несомых отдельными капельками.

Уравновешение отдельных заряженных капелек электростатическим полем.

Первоначально я надеялся исключить ошибку от испарения следующим образом. Я хотел получить электрическое поле, достаточно сильное, чтобы уравновесить действие на облако силы тяжести, и затем при помощи реостата изменять силу этого поля так, чтобы облако за все время его существования находилось в состоянии равновесия. Таким путем я надеялся проследить всю историю облака и внести затем необходимые поправки в наблюдения над скоростью падения, которые позволили бы совершенно исключить ошибку, происходящую от испарения. Однако, привести в исполнение первоначальный план и уравновесить облако оказалось невозможным. Зато оказалось возможно сделать нечто гораздо лучшее, а именно, поддерживать при помощи поля отдельные заряженные капельки в течение от 30 до 60 секунд. Измерять продолжительность существования капелек, превышавшую

45 секунд, мне не приходилось, хотя я несколько раз наблюдал капли, которые, по моему мнению, держались гораздо дольше. Те капли, которые удавалось уравновесить электрическим полем, всегда несли несколько зарядов, и уравновесить такие капли оказалось менее трудным, чем можно было ожидать.

Процедура состоит просто в том, что образуют облако и вслед за тем включают электрическое поле. Капли, имеющие заряды одного знака с верхней пластинкой, а также имеющие слишком слабые заряды противоположного знака, быстро падают. Те же капли, которые имеют слишком много зарядов противоположного знака, быстро притягиваются верхней пластинкой, преодолевая силу тяжести. В результате через 7 или 8 минут поле зрения

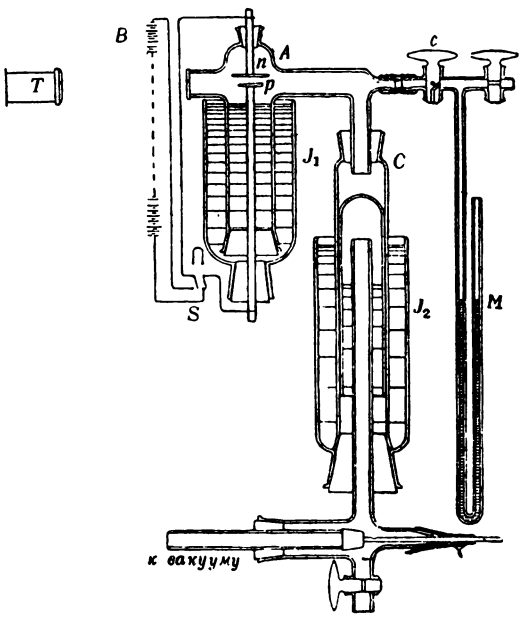

Рис. 2.

вполне проясняется, и в нем остается только сравнительно небольшое число капель, а именно те, которые имеют заряд, как раз достаточный, чтобы поддерживаться электрическим полем. Эти капли представляются отчетливо видимыми яркими точками. Я несколько раз получал только одну такую звездочку во всем поле, и она держалась там около минуты. В большинстве случаев, однако, описанные ниже наблюдения производились над большим числом таких точек в поле зрения. Оказалось, что тонкие, разорванные облака особенно благоприятствуют наблюдениям этого рода. Появление этих облаков облегчается, если поддерживать температуру воды в сосудах J_1 и J_2 (рис. 2) на градус или на два выше комнатной.

Далее, изменяя ионизацию, оказалось возможным изменять массу капель таким путем, чтобы одно и то же поле могло поддерживать капли с двумя

тремя, четырьмя, пятью и шестью зарядами, смотря по обстоятельствам. Предполагавшееся сперва постепенное изменение поля оказалось поэтому ненужным. Если данное поле не поддерживало никаких капель, то оно изменялось скачками по 100 или 200 вольт, пока капли не становились неподвижными или почти неподвижными. Когда поле выключалось, то очень часто можно было видеть, как разные капли падают под действием силы тяжести с весьма различными скоростями, что указывало на различие масс, а следовательно, и зарядов этих капель.

История этих капель протекает обыкновенно так. В случае небольшого преобладания силы тяжести над силой поля они начинают медленно падать, но так как они постепенно испаряются, то их нисходящее движение вскоре прекращается, и они на довольно долгое время становятся неподвижными. Затем поле начинает преобладать, и капли начинают медленно подниматься. Под конец их жизни в пространстве между пластинами это восходящее движение становится весьма сильно ускоренным, и они притягиваются с большой скоростью к верхней пластине. Напомним, что когда расстояние между пластинами равно 4 или 5 миллиметрам, то продолжительность их существования равна 35 — 60 секундам. Отсюда ясно, что бо́льшую часть их жизни они движутся чрезвычайно медленно. Часто случалось, что в течение 10 или 15 секунд трудно было вообще обнаружить их движение. Иногда, сразу после образования облака мне приходилось видеть капли, которые сперва казались неподвижными, затем начинали медленно падать, затем снова становились неподвижными и, наконец, начинали медленно подниматься. Такое поведение объясняется вероятно тем, что большие капли с несколькими зарядами не находятся в равновесии с малыми каплями вблизи них, имеющими один заряд. Поэтому, вместо того, чтобы испаряться, они некоторое время нарастают за счет их малых соседей. Но как бы то ни было, существенным является тот экспериментальный факт, что имеется довольно продолжительный период, в течение которого капли остаются почти неподвижными. Благодаря этому, в измерениях скорости падения ошибка от испарения совершенно ничтожна по сравнению с другими ошибками наблюдения. Кроме того, производя такого рода измерения, наблюдатель может с той же степенью вероятности заметить каплю, не достигшую устойчивого состояния, как и каплю, только что перешедшую через устойчивое состояние. Таким образом среднее из большого числа наблюдений будет даже с теоретической точки зрения совершенно свободно от ошибки, происходящей от испарения.

Метод наблюдения.

Наблюдения над скоростью падения производились при помощи короткофокусного телескопа T (см. рис. 2), расположенного на расстоянии около 2 футов от пластин. В окуляре телескопа были помещены на одинаковом расстоянии друг от друга три перекрестия, при чем расстояние между крайними перекрестиями соответствовало около одной трети расстояния между пластинами. Небольшая часть пространства между пластинами освещалась узким пучком света от дуги, при чем тепловое излучение дуги поглащалось тремя поставленными один за другим сосудами с водой. Воздух между пла-

стинами подвергался ионизации при помощи 200 *мг* радия активности 20000, расположенного сбоку от пластин на расстоянии от 3 до 10 *см* от них. Приблизительно через секунду после расширения радий удалялся или заслонялся свинцовым экраном, и электрическое поле включалось от руки посредством двойного переключателя. Если взвешенных капелек не оказывалось, то изменялась разность потенциалов или расширение воздуха, пока они не появлялись. Перекрестия устанавливались около нижней пластины, и как только удавалось заметить неподвижную каплю где-нибудь около верхнего перекрестия, за этой каплей производилось наблюдение в течение нескольких секунд, с целью убедиться в ее неподвижности. Затем поле выключалось, и пластины соединялись на-коротко, чтобы быть уверенным в том, что на них не оставалось заряда. После этого при помощи точных часов с арретиром (stop-watch) отмечалось время прохождения капли через три перекрестия, при чем одна из стрелок часов останавливалась в момент прохождения капли мимо среднего перекрестия, а другая стрелка — в момент прохождения мимо нижнего перекрестия. Ясно, что этот метод наблюдения позволяет вдвойне контролировать испарение капли. В самом деле, если капля первоначально неподвижна, то испарение ее настолько медленно, что не влияет на отсчет скорости ее падения; если бы она начала заметно испаряться до того, как произведен последний отсчет. то время затраченное на прохождение через второй промежуток оказалось бы больше времени затраченного на прохождение через первый промежуток. Из приведенных ниже наблюдений видно, что такое испарение, вообще говоря, не имело места.

Весьма интересно и поучительно следить за тем, как одна из этих капель начинает двигаться, затем останавливается, или даже меняет направление движения при включении поля. Мне часто удавалось поймать каплю, слишком легкую, для того чтобы оставаться неподвижною, и заставить ее четыре или пять раз двигаться между теми же двумя перекрестиями, наблюдая то ее свободное падение при отсутствии поля, то ее подъем, когда поле включалось. Точность и надежность определения моментов прохождения капли через перекрестия получались те же, что и при наблюдении прохождения звезды через перекрестия пассажного инструмента.

Далее, так как наблюдения над величинами, входящими в уравнение (4) [см. ур. (8). стр. 41 настоящей книги], производились все над одной и той же каплей, то этим самым устранялись все сомнения, связанные с вопросом о возможности точного воспроизведения всех условий образования последовательных облаков. Единственное теоретическое сомнение, которое могло остаться при этом методе, есть сомнение в приложимости закона Стокса к скорости падения этих капель под действием силы тяжести. Единственной экспериментальной погрешностью является погрешность в определении промежутков времени от 3 до 5 секунд; это в том случае, когда наблюдается движение одной яркой точки. Другими словами, если измеряемый промежуток времени равен, скажем, 5 секундам (как в некоторых из приведенных ниже наблюдений), то у опытного наблюдателя с хорошими арретирными часами ошибка отдельного наблюдения никогда не превзойдет $\frac{2}{50}$. Очевидно, что средняя ошибка большого числа согласных между собою наблюдений будет еще гораздо меньше.

Так как при нашем способе наблюдения величина v_2 уравнения (5) [ур. (8) этой книги] равна нулю и так как F отрицательно, то уравнение (5) приводится к простому виду.

$$e = 3{,}422 \times 10^{-9} \times \frac{g}{F} v_1^{\frac{3}{2}} \text{ [1]}. \tag{6}$$

Мы приведем здесь две таблицы из цитированной статьи с целью дать более точное представление об этих опытах, которые являются первыми измерениями зарядов, несомых отдельными частицами.

Таблица II.

Серия 1. (Уравновешенные положительные капли воды).

Расстояние между пластинами . . . . . 0,545 *см*.
Измеренное расстояние, пройденное за время падения . 0,155 „

Вольты	Время прохождения одного промежутка	Время прохождения двух промежутков
2285	2,4 *сек.*	4,8 *сек.*
2285	2,4 „	4,8 „
2275	2,4 „	4,8 „
2325	2,4 „	4,8 „
2325	2,6 „	4,8 „
2325	2,2 „	4,8 „
2365	2,4 „	4,8 „
2312	2,4 *сек*	4,8 *сек*

Среднее время для 0,155 *см* = 4,8 *сек.*

$$e_1 = 3{,}422 \times 10^{-9} \times \frac{980{,}3}{14{,}14} \times \left(\frac{0{,}155}{4{,}8}\right)^{\frac{3}{2}} = 13{,}77 \times 10^{-10}.$$

Отсюда

$$e = 13{,}77 \times 10^{-10} : 3 = 4{,}59 \times 10^{-10}.$$

[1]) Я изменил постоянную в уравнении Вильсона с 3,1 до 3,422 на основании тщательных измерений температуры в камере, где образуется облако, через 10 секунд после расширения и на основании новых измерений вязкости насыщенного воздуха.

Серия 2. (Уравновешенные положительные капли воды).

Расстояние между пластинами . . . . . 0,545 *см*.
Измеренное расстояние, пройденное за время падения . 0,155 „

Вольты	Время прохождения одного промежутка	Время прохождения двух промежутков
2365	1,8 *сек*	4,0 *сек*
2365	1,8 „	4,0 „
2365	2,2 „	3,8 „
2365	1,8 „	4,0 „
2395	2,0 „	4,0 „
2395	2,0 „	4,0 „
2395	2,0 „	3,8 „
2365	1,8 „	4,0 „
2365	1,8 „	4,0 „
2365	1,8 „	4,0 „
2374	1,90 *сек*	3,96 *сек*

Среднее время для 0,155 *см* = 3,91 *сек*.

$$e_4 = 3{,}422 \times 10^{-9} \times \frac{980{,}3}{14{,}52} \times \left(\frac{0{,}155}{3{,}91}\right)^{\frac{3}{2}} = 18{,}25 \times 10^{-10}.$$

Отсюда

$$e = 18{,}25 \times 10^{-10} : 4 = 4{,}56 \times 10^{-10}.$$

Таблица III.

Серия	Заряд	Значение e	Приписанный вес
1	$3e$	4,59	7
2	$4e$	4,56	7
3	$2e$	4,64	6
4	$5e$	4,83	4
5	$2e$	4,87	1
6	$6e$	4,69	3

Простое среднее . . . . . $e = 4{,}70 \times 10^{-10}$.
Среднее, вычисленное с принятием во внимание веса . . $e = 4{,}65 \times 10^{-10}$.

В связи с этими опытами мне удалось наблюдать явление, которое меня тогда очень заинтересовало, так как оно открывало совершенно новые возможности. Работая над этими „взвешенными каплями“, я несколько раз забывал заслонять их от лучей радия. Тогда мне случалось замечать, что время от времени одна из капель внезапно изменяла свой заряд и начинала двигаться вдоль поля или против него, очевидно, захватив в первом случае положительный, а во втором случае отрицательный ион. Это открывало возможность измерять с достоверностью не только заряды отдельных капель, как это я делал до тех пор, но и заряд отдельного атмосферного иона. В самом деле, измеряя скорость одной и той же капли два раза, один раз до, а второй раз после захвата иона, я, очевидно, мог совершенно исключить свойства капли и свойства среды и оперировать с величиной, пропорциональной только заряду захваченного иона.

Сообразно этому, в течение 1909 года я предпринял новую серию опытов, описанную в следующей главе.

Работы над водяными капельками дали почти полное решение задачи, так что успех казался обеспеченным. Нужно было только получить в пространстве между пластинами горизонтального воздушного конденсатора заряженную каплю, которая бы не испарялась, и затем, включая и выключая электрическое поле, заставить ее двигаться вверх и вниз между пластинами до тех пор, пока она не захватит атмосферного иона, совершенно так, как это делали наблюдавшиеся мною водяные капли. Изменение скорости при включении поля должно быть тогда в точности пропорционально заряду захваченного иона.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

ОБЩЕЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО АТОМНОЙ ПРИРОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА.

Только-что описанный „метод уравновешения капель“ исключил главные источники ошибок, встречавшихся в предыдущих работах по определению e и позволил утверждать с большой степенью вероятности, что элементарный заряд представляет реальную физическую сущность, а не только некоторое „статистическое среднее“. Тем не менее, этот метод еще далеко нельзя было считать точным методом изучения свойств газовых ионов. Присущие ему ошибки и неточности происходили от следующих причин: во первых, от недостатка неподвижности воздуха, через который двигалась капля; во вторых, от недостаточной однородности употреблявшегося электрического поля; в третьих, от постепенного испарения капель; вследствие этого нельзя было наблюдать данную каплю дольше минуты или наблюдать за скоростью ее свободного падения в продолжение промежутка времени, превышавшего пять или шесть секунд; наконец, в четвертых, от предположения справедливости закона Стокса.

Новый метод, придуманный для замены предыдущего, был совершенно свободен от всех этих ограничений. Мало того, он дал совершенно новый способ изучения ионизациии, при помощи которого сразу же были достигнуты важные успехи в нескольких направлениях. Настоящая глава посвящена изложению некоторых из этих побочных результатов определения e—результатов, представляющих больший интерес и имеющих более важное значение, чем простое определение точной величины заряда электрона.

I. Изолирование отдельных ионов и измерение их относительных зарядов.

Для сравнения зарядов отдельных ионов применялась следующая процедура. При помощи обыкновенного продажного распылителя в камеру C (рис. 3) впускалась струя масла. Воздух, посред-

ством которого вдувалась струя, освобождался сперва от пыли путем пропускания через трубку со стеклянной ватой. Капельки масла, составлявшие струю, были весьма малы; радиус большинства их был порядка одной тысячной миллиметра. Эти капельки медленно падали в камере *C*, и иногда некоторые из них проходили сквозь маленькое отверстие *p* в центре круглой латунной пластинки *M* диаметром в 22 *см*, составлявшей одну из пластин воздушного конденсатора. Другая пластина, *N*, была укреплена на 16 миллиметров ниже первой при помощи трех эбонитовых стоек *a*. Пластины эти

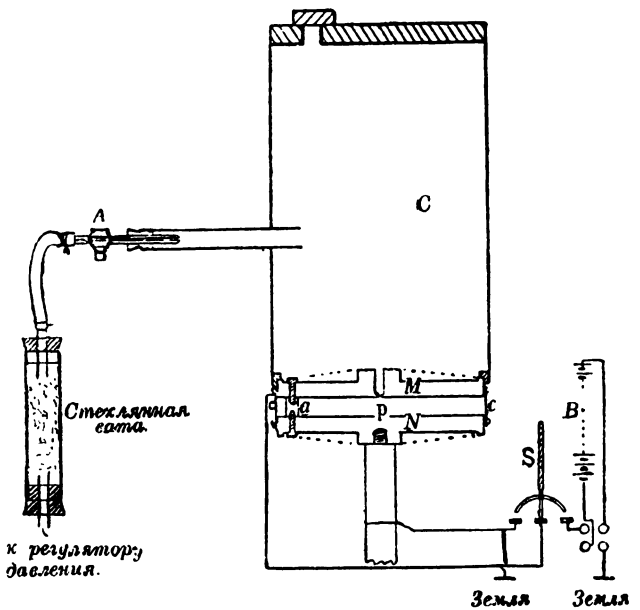

Рис. 3.

могли заряжаться, одна положительно, а другая отрицательно, при помощи переключателя *S*, соединявшего их с полюсами 10 000-вольтной аккумуляторной батареи *B*. Поворачивая переключатель в другую сторону (налево), можно было замкнуть их на короткую и сделать поле между ними равным нулю. Капельки масла, появлявшиеся вблизи *p*, освещались сильным пучком света, проходившего сквозь два окошечка, расположенные в эбонитовом кольце *c* одно против другого. Если смотреть через третье окошечко *c*, направленное к читателю, капля представляется яркой звездочкой на темном фоне. Капли, проходившие через отверстие *p*, оказывались обыкно-

венно сильно заряженными вследствие трения при вдувании струи, так что при включении поля в надлежащем направлении они притягивались к верхней пластине *M*. Перед тем моментом, как наблюдаемая капля должна была достигнуть *M*, пластины замыкались на короткую, и капля начинала свободно падать пока она не приближалась к пластине *N*; в этот момент направление ее движения изменялось на обратное путем включения поля. Таким образом можно было заставить каплю странствовать вверх и вниз между пластинами. При первом испытании установки опыта капля была захвачена уже через несколько минут. В том, что она действительно была захвачена, можно было убедиться, наблюдая изменение скорости ее восходящего движения в присутствии поля. Чтобы оценить значение этого опыта, лучше всего ознакомиться с протоколом одного из первоначальных опытов, когда время отмечалось при помощи простых арретирных часов.

Столбец, озаглавленный t_g, дает последовательные промежутки времени, в течение которых капля падала от одного перекрестия

Таблица IV.

t_g	t_F	t_g	t_F
13,6	12,5	13,8	34,6
13,8	12,4	13,7	34,8
13,4	21,8	13,8	16,0
13,4	34,8	13,6	34,8
13,6	84,5	13,5	34,6
13,6	85,5	13,4	21,9
13,7		13,8	
13,5		13,4	
13,5		Среднее 13,595	

телескопа до другого. Расстояние между перекрестиями соответствовало в этом случае истинному расстоянию в 0,5222 *см*. Мы видим, что все эти числа в пределах ошибок измерения арретирными часами одинаковы между собой. Столбец, озаглавленный t_F, дает промежутки времени, затраченные каплей на подъем под действием электрического поля, которое в этом случае соответствовало разности потенциалов между пластинами *M* и *N* в 5051 вольт. Мы видим,

что после второго подъема время изменилось с 12,4 до 21,8. Так как в данном случае капля была положительной, то это указывает на захват отрицательного иона из воздуха. Следующее число 34,8 указывает на захват второго отрицательного иона. Следующее число 84,5 указывает на захват еще одного отрицательного иона. Этот заряд держался в продолжение двух подъемов, после чего скорость опять изменилась до 34,6, что указывает на захват положительного иона с точно таким же зарядом, как и тот отрицательный ион, который был захвачен перед тем, т. е. при переходе от 34,8 к 84,5.

Для вывода некоторых важных заключений из этого и других аналогичных опытов достаточно сделать предположение, что скорость движения капли пропорциональна действующей на нее силе и не зависит от несомого каплей электрического заряда. К счастью, это предположение можно, как будет сейчас показано, подвергнуть весьма точной экспериментальной проверке, но на этот раз мы введем его, вместе с Тоунсендом, Томсоном и Вильсоном, в качестве простого предположения. Мы получим тогда

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{mg}{Fe_n - mg},$$

или (9)

$$e_n = \frac{mg}{Fv_1}(v_1 + v_2).$$

Отрицательный знак в знаменателе поставлен потому, что мы будем для удобства считать v_2 положительным, когда капля движется вверх в направлении поля F, v_1 будет считаться положительным, когда капля движется вниз в направлении силы тяжести g; e_n означает заряд капли, и его не следует смешивать с зарядом иона. Если теперь, после захвата иона, заряд капли меняется с e_n на $e_{n'}$, то величина захваченного заряда e_i будет

$$e_i = e_{n'} - e_n = \frac{mg}{Fv_1}(v'_2 - v_2). \qquad (10)$$

А так как $\frac{mg}{Fv_1}$ для данной капли постоянно, то всякий захваченный ею заряд будет всегда пропорционален $(v'_2 - v_2)$, т. е. изменению скорости в поле F вследствие захвата иона. Последовательные значения v_2 и $v'_2 - v_2$ показаны в таблице V.

Таблица V.

v_2	$v_2' - v_2$
$\frac{0,5222}{12,45} = 0,041\,96$	
	0,018 06 : 2 — 0,009 03
$\frac{0,5222}{21,8} = 0,023\,90$	
	0,008 85 : 1 0,008 85
$\frac{0,5222}{34,7} = 0,015\,05$	
	0,008 91 : 1 0,008 91
$\frac{0,5222}{85,0} = 0,006\,14$	
	0,008 91 : 1 — 0,008 91
$\frac{0,5222}{34,7} = 0,015\,05$	
	0,017 59 : 2 — 0,008 80
$\frac{0,5222}{16,0} = 0,032\,64$	
	0,017 59 : 2 = 0,008 80
$\frac{0,5222}{34,7} = 0,015\,05$	
	0,008 91 : 1 = 0,008 91
$\frac{0,5222}{21,85} = 0,023\,90$	

Последний столбец показывает, что в пределах ошибки измерения арретирными часами все захваченные заряды имеют одну и ту же величину за исключением трех случаев. В этих случаях захваченные заряды ровно вдвое больше, чем в остальных. Оказалось, что такого рода соотношения имеют место всегда без всякого исключения, независимо от того, какие именно капли употреблялись для захвата ионов и в каком газе взвешены эти капли. Во многих случаях капля наблюдалась в течение пяти или шести часов, и за это время она захватывала не восемь или десять ионов, как в описанном опыте, но сотни их. В общей сложности я наблюдал таким путем захват многих тысяч ионов, и во всех случаях захваченный заряд, определенный, как указано выше, был либо в точности равен наименьшему из всех захваченных зарядов, либо он равнялся небольшому целому кратному этой величины. В этом заключается прямое и неопровержимое доказательсто того, что электрон не есть „статистическое среднее“, но что все электрические заряды на ионах либо в точности равны заряду электрона, либо представляют небольшие целые кратные этого заряда.

II. Доказательство того, что все электростатические заряды на проводниках и изоляторах состоят из электронов.

Описанные опыты приводят, однако, к заключениям, еще более важным, чем те, которые были рассмотрены в предыдущем отделе. Заряд капли, только что попавшей в поле наблюдения, был получен ею не захватом ионов из воздуха, а благодаря трению, которое имело место при вдувании струи. Поэтому, если обыкновенные электростатические заряды также составлены из электронов, то и первоначальный заряд капли должен быть точным кратным заряда иона. Заряд этот пропорционален скорости, которая, на основании заслуживающих полного доверия измерений, приведенных в таблице V, равна 0,008 91. Как видно из уравнений (9) и (10), первоначальный заряд капли e_n так относится к v_1+v_2, как относится заряд иона $e_n'-e_n$ к $v_2'-v_2$. Но $v_1=\frac{0,5222}{13,595}=0,038\,42$, отсюда $v_1+v_2=$ $=0,038\,42+0,041\,96=0,080\,38$. Разделив это на 9, мы получим число 0,008 931, которое с точностью до 0,2% равно приведенному в последнем столбце табл. V числу, которое соответствует наименьшему заряду иона. Наши опыты впервые дали возможность сравнивать заряд, полученный от трения, с зарядом иона. При этом оказывается, что в данном частном случае заряд, полученный от трения, содержит ровно 9 электронов. Мы сейчас изложим более точный способ сравнения зарядов обоих родов. Пока же заметим следующее. Опыты, подобные описанному, были проделаны над тысячами капель в самых различных срединах, при чем некоторые капли состояли из непроводников, как например масло, некоторые из полупроводников, как например глицерин, а некоторые из очень хороших металлических проводников, как например ртуть. Во всех случаях, без всякого исключения, оказывалось, что как первоначальный заряд, возникший на капле вследствие трения, так и многочисленные заряды, захваченные каплей у ионов, равны точным кратным наименьшего заряда, захваченного из воздуха. Некоторые из этих капель не имели первоначально никакого заряда, а затем захватывали один, два, три, четыре, пять, шесть или семь элементарных зарядов или электронов. Другие капли первоначально имели семь или восемь, иногда двадцать, иногда пятьдесят, иногда сто, иногда сто пятьдесят элементарных единиц и захватывали в каждом случае один или несколько десятков элементарных зарядов впродолжение наблюдений. Таким

образом наблюдались капли со всевозможным числом электронов между одним и ста пятьюдесятью, и число электронов на каждой капле подсчитывалось по описанному способу. Когда число их не превышает пятидесяти, то ошибка тут так же невозможна, как и при счете собственных пальцев. Однако, при подсчете электронов в заряде, в котором их содержится свыше ста или двухсот, нельзя быть уверенным в отсутствии ошибки. Это происходит по той простой причине, что наш метод измерения не позволяет обнаружить разность между 200 и 201, другими словами, мы не можем измерять $v_2' - v_2$ с точностью, превышающей 0,5%. Но совершенно невозможно себе представить, чтобы большие заряды, как, например, те, с которыми мы имеем дело в технических применениях электричества, были построены по существу иначе, чем те малые заряды, которые мы можем сосчитать. С другой стороны, определенно доказано, что электрический ток есть ни что иное, как движение электрического заряда вдоль проводника или сквозь него. Поэтому очевидно, что рассмотренные нами опыты, во первых, дают самое прямое и непосредственное доказательство того, что все электрические заряды построены из тех самых единиц, с которыми мы имеем дело в этих опытах, как с индивидуумами, и, во вторых, они показывают, что всякого рода электрический ток состоит в простом переносе этих электронов сквозь проводящее тело.

С целью показать всю красоту и точность, с которой проявляется во всех опытах закон кратных отношений, мы поместим здесь таблицу, соответствующую более точным измерениям, чем рассмотренные до сих пор.

Время падения и подъема, показанное в первом и во втором столбцах, отсчитывалось при помощи хроноскопа Гиппа (Hipp) с точностью до одной тысячной секунды. Третий столбец дает обратные величины этих времен. Они поставлены вместо скоростей, так как длина падения или подъема была всегда одна и та же. Четвертый столбец дает последовательные изменения скорости, происходящие от захвата иона; они также выражены в виде обратных величин времени. По причинам, которые будут изложены в следующем отделе, каждое из этих изменений может соответствовать захвату не одного, а нескольких различных ионов. В пятом столбце поставлены те небольшие целые числа, на которые надо разделить числа четвертого столбца, чтобы получить числа шестого столбца. Как видно, последние в пределах ошибок наблюдений все одинаковы между собой. Средний вывод из чисел шестого столбца,

Таблица VI.

t_g сек	t_F сек	$\frac{1}{t_F}$	$\left(\frac{1}{t'_F}-\frac{1}{t_F}\right)$	n'	$\frac{1}{n'}\left(\frac{1}{t'_F}-\frac{1}{t_T}\right)$	$\left(\frac{1}{t_g}+\frac{1}{t_F}\right)$	n	$\frac{1}{n}\left(\frac{1}{t_g}+\frac{1}{t_F}\right)$
11,848	80,708	0,012 36		—	—	0,096 55	18	0,005 366
11,890	22,366		0,032 34	6	0,005 390	—	—	—
11,908	22,390	0,044 70		—	—	0,128 87	24	0,005 371
11,904	22,368		0,037 51	7	0,005 358	—	—	—
11,882	140,565	0,007 192		—	—	0,091 38	17	0,005 375
11,906	79,600	0,012 54	0,005 348	1	0,005 348	—	—	—
11,838	34,748			—	—	0,096 73	18	0,005 374
11,816	34,762	0,028 70	0,016 16	3	0,005 387	—	—	—
11,776	34,846			—	—	0,112 89	21	0,005 376
11,840	29,286		—	—	—	—	—	—
11,904	29,236	0,034 14		—	—	—	—	—
11,870	137,308	0,007 268	0,026 872	5	0,005 375	0,118 33	22	0,005 379
11,952	34,638	0,028 84		—	—	—	—	—
11,860	—	—	0,021 572	4	0,005 393	0,091 46	17	0,005 380
11,846	22,104			—	—	—	—	—
11,912	22,268	0,045 07	0,016 23	3	0,005 410	0,113 03	21	0,005 382
11,910	500,1	0,002 000		—	—	—	—	—
11,918	19,704		0,043 07	8	0,005 384	0,129 26	24	0,005 386
11,870	19,668	0,050 79		—	—	—	—	—
11,888	77,630		0,048 79	9	0,005 421	0,086 19	16	0,005 387
11,894	77,806	0,012 85		—	—	—	—	—
11,878	42,302	0,023 64	0,038 74	7	0,005 401	0,134 98	25	0,005 399
				—	—	—	—	—
			0,010 79	2	0,005 395	0,097 04	18	0,005 390
						0,107 83	20	0,005 392
11.880	—	Среднее	—	—	0,005 386	—	—	0,005 384

Продолжительность опыта . . . . . 45 *мин*

Расстояние между пластинами . . . . . 16 *мм*

Расстояние, на протяжении которого наблюдалось падение 10,21 „

Напряжение в начале опыта . . . . . 5088,8 *вольт*

Напряжение в конце опыта . . . . . 5081,2 „

Температура . . . . . 22,82° Ц.

Давление . . . . . 75,62 *см*.

Плотность масла . . 0,9199

Коэффициент внутреннего трения воздуха $1,824 \times 10^{-7}$

Радиус (a) . . . . 0,000276 *см*

$\frac{l}{a}$ [1]) 0,034

Скорость падения . . 0,08584 $\frac{см}{сек}$

$e_1 = 4,991 \times 10^{-10}$.

[1]) l — средняя длина свободного пути.

помещенный в конце него, соответствует поэтому наименьшему из всех зарядов, захваченных из воздуха, т. е. элементарному заряд ионов. Седьмой столбец дает последовательные значения (v_1+v_2), выраженные в обратных величинах времени. Эти числа соответствуют поэтому последовательным величинам полного заряда, несомого каплей. В восьмом столбце поставлены целые числа, на которые нужно разделить числа седьмого столбца, чтобы получить числа девятого столбца. Как видно, они также все одни и те же. Средний вывод в конце последнего столбца поэтому дает меру одной из тех единиц электричества, из которых составлен заряд капли, появившийся вследствие трения. Как видно, эта величина одинакова с соответствующей мерой заряда иона, которая приведена в конце шестого столбца.

Быть может, небезынтересна будет и следующая таблица (Таблица VII), расположение которой несколько иное. Она составлена с целью показать ту логическую необходимость, с которой следует атомная природа электричества из опытов, подобных рассмотренным.

Таблица VII.

n	$4{,}917 \times n$	Наблюденный заряд	n	$4{,}917 \times n$	Наблюденный заряд
1	4,917	--	10	49,17	49,41
2	9,834		11	54,09	53,91
3	14,75	--	12	59,00	59,12
4	19,66	19,66	13	63,92	63,68
5	24,59	24,60	14	68,84	68,65
6	29,50	29,62	15	73,75	—
7	34,42	34,47	16	78,67	78,34
8	39,34	39,38	17	83,59	83,22
9	44,25	44,42	18	88,51	—

В этой таблице число 4,917 получено совершенно так же, как и раньше, из изменения скорости вследствие захвата ионов. Это число пропорционально для данного опыта заряду иона. В столбце, озаглавленном $4{,}917 \times n$, приведены все целые кратные этого числа от 1 до 18. Столбец, озаглавленный „наблюденный заряд", дает последовательные наблюденные значения (v_1+v_2). Из таблицы видно, что за время наблюдения, т. е. за четыре часа, капля несла все целые кратные элементарного заряда от 4 до 18, кроме 15. Закон кратных отношений проявляется здесь с неменьшею точностью, чем в данных, относящихся к хими-

ческим соединениям и послуживших основанием для атомной теории материи.

Таблицы, подобные этой — а их можно привести множество — доказывают с неоспоримостью следующее утверждение. Где бы ни встречался электрический заряд, — на изоляторах или на проводниках, в электролитах или в металлах, — везде он обладает резко выраженным зернистым строением. Он состоит из целого числа единиц электричества (электронов), которые все одинаковы. В электростатических явлениях эти электроны рассеяны по поверхности заряженного тела, а в электрическом токе они движутся вдоль проводника. Максвелл думал, что мы будем когда-нибудь принуждены оставить „временную гипотезу молекулярных зарядов"; но вместо этого мы принуждены теперь истолковывать все электрические явления — как металлические, так и электролитические — в духе этой гипотезы.

III. Механизм изменения заряда капли.

Все изменения зарядов, показанные в таблице IV, были изменениями внезапными. Мы предполагали, что все они обусловлены захватом ионов из воздуха. Когда скорость отрицательно-заряженной капли в электрическом поле внезапно увеличивается, т. е. когда капля захватывает заряд того же знака, что и ее собственный, — в этом случае упомянутый способ изменения заряда представляется единственно возможным. Но, когда заряд внезапно уменьшается, нельзя решить a priori вопрос, обусловлено ли изменение прямой потерей некоторой части заряда, или же нейтрализацией того же количества электричества посредством захвата заряда противоположного знака.

Предположение, что изменения происходят (в отсутствии рентгеновых или радиоактивных лучей) исключительно вследствие захвата ионов из воздуха, подтверждается тем фактом, что не слишком сильно заряженные капли обнаруживают в среднем одинаковую тенденцию как к увеличению, так и к уменьшению заряда. Дело обстояло бы иначе, если бы уменьшение заряда могло происходить от двух причин: от прямой потери заряда и от захвата противоположных ионов, тогда как увеличение заряда могло происходить от одной причины — от захвата ионов. Вопрос о том, какое из этих двух предположений соответствует действительности, вполне разъяснился после того, как были произведены наблюдения при весьма малых давлениях, именно от 2 до 3 *мм* ртутного столба.

Так как число ионов в газе вообще говоря прямо пропорционально давлению, то при этих низких давлениях внезапное изменение заряда не должно почти никогда происходить; в самом деле, было найдено, что капли могли держаться в течение нескольких часов без всякого изменения. С уменьшением давления изменения происходят все реже и реже, как это и должно быть, если они обусловлены захватом ионов. В самом деле, число ионов, образуемых данным источником ионизации, должно быть пропорционально давлению.

С другой стороны, изменения, вообще говоря, не происходят при наличии электрического поля, ибо тогда ионы по мере их образования притягиваются к пластинам со скоростью, скажем, в 10 000 *см* в секунду, так что они не могут скопиться в пространстве между пластинами в сколько-нибудь значительном количестве. В отсутствии поля они, напротив, скопляются, пока число их не достигнет примерно 20 000 на кубический сантиметр (для обыкновенного воздуха). Эти ионы, обладая кинетической энергией беспорядочного движения, характерной для данной температуры, быстро носятся в газе и, при столкновении с каплей, соединяются с ней. Таким именно образом и произошли все изменения заряда, отмеченные в таблице IV.

Существует, однако, возможность, контролировать изменения так, чтобы на каплю попадали электроны желаемого знака и — в пределах ошибок — в желаемом числе. Если, например, желательно поместить на каплю положительный электрон, то каплю следует держать при помощи электрического поля вблизи отрицательной верхней пластины; затем вводят источник ионизации — рентгеновы лучи или радий — так, чтобы весь газ между пластинами был равномерно ионизован. Так как в этом случае все положительные ионы движутся вверх, а отрицательные — вниз, то капля находится под градом положительных ионов, и при достаточно сильной ионизации можно быть уверенным, что один из них попадет на каплю. Таким путем можно поместить на каплю положительный заряд почти любой желаемой величины.

Аналогично, чтобы поместить на каплю отрицательный ион или несколько таких ионов, ее следует держать при помощи поля вблизи нижней, т. е. положительной, пластины, под градом отрицательных ионов, производимых рентгеновыми лучами. Таким именно образом и произошло большинство изменений, указанных в таблице VI. Это объясняет тот факт, что в некоторых случаях изменения соответствуют захвату многих, до шести, электронов.

В том случае, когда рентгеновы лучи падают непосредственно на каплю, изменение заряда может произойти не только вследствие захвата иона, но и потому, что лучи вырывают из молекул капли частицы β, т. е. отрицательные электроны. То, что в наших опытах действительно происходили изменения по этой причине, было окончательно доказано в 1910 году следующим образом. Если поддерживать весьма низкое давление и заставить рентгеновы лучи проходить через воздух, в котором находится капля, то последняя легко претерпевает изменения в направлении увеличения положительного или уменьшения отрицательного заряда; изменения же в противоположном направлении не происходят почти никогда. Это объясняется тем, что при низких давлениях лучи могут ионизовать только немногие молекулы газа, тогда как они отрывают от капли отрицательные электроны столь же свободно, как и при атмосферном давлении. Этот опыт дал прямое доказательство того, что заряд иона в газах одинаков с зарядом частиц β, из которых составлены катодные лучи.

В тех случаях, когда нужно было устранить потерю каплей отрицательных электронов, мы ставили свинцовые экраны так, чтобы сама капля не освещалась лучами, тогда как газ под нею ионизовывался [1]).

IV. Прямое наблюдение кинетической энергии беспорядочного движения молекулы.

Я уже указывал, что когда капля несет небольшое число электронов, то она, повидимому, захватывает ионы одинакового знака столь же быстро, как и противоположного знака. Этот результат может на первый взгляд показаться странным, так как ионы противоположного знака должны притягиваться, а ионы одинакового знака — отталкиваться. В таком случае откуда же берет ион энергию, позволяющую ему преодолевать электрическое отталкивание и прикрепляться к капле, уже сильно заряженной электричеством того же знака? Он не может брать ее из поля, так как явление захвата происходит в отсутствии поля. Он не может также получать ее из какого-нибудь процесса, аналогичного взрыву, который освобождал бы ион от молекулы в момент ее ионизации; в самом деле, в этом случае ионы захватывались бы одинаково или почти одинаково часто как в присутствии поля, так и в отсутствии его

[1]) См. „Phil. Mag.“, XXI (1911). 757.

Здесь мы имеем таким образом самое непосредственное доказательство того, что ион должен обладать кинетической энергией беспорядочного движения, достаточной для преодоления электростатического отталкивания зарядом капли и приближения к ее поверхности.

Эту энергию легко вычислить следующим образом. Возьмем каплю, подобную тем, какими мы пользовались в описанных опытах, а именно, с радиусом 0,000197 *см*. Можно показать, что потенциал на поверхности заряженного шара равен заряду, деленному на радиус. Величина элементарного электрического заряда, полученная из лучших наблюдений описанного типа, равна $4{,}774 \times 10^{-10}$ абсолютным электростатическим единицам. Энергия, необходимая, чтобы приблизить ион с зарядом e к поверхности шара радиуса r несущего 16 элементарных зарядов, равна поэтому

$$\frac{16e^2}{r} = \frac{16 \times (4{,}774 \times 10^{-10})^2}{0{,}000\,197} = 1{,}95 \times 10^{-14} \text{ эргов.}$$

Далее, на основании полученного здесь значения e и уравнения кинетической теории $p = \frac{1}{3} nm\overline{c^2}$, кинетическая энергия беспорядочного движения молекулы равна $5{,}75 \times 10^{-14}$ эргов. Закон Максвелла—Больтцмана, дающий распределение энергии, несомненно приложим к газам. На основании этого закона полученное нами число должно быть равно кинетической энергии беспорядочного движения иона. Мы видим, что эта энергия приблизительно втрое больше энергии, необходимой для того, чтобы приблизить один ион к поверхности нашей капли. Таким образом, электростатические силы 16 электронов капли оказываются слишком слабыми, чтобы оказать заметное влияние на движение приближающегося иона. Положим, что нам удалось зарядить каплю отрицательным электричеством до такой степени, чтобы потенциальная энергия ее заряда была примерно втрое больше полученной в нашем примере. Заряженная таким образом капля уже не могла бы захватывать новых отрицательных ионов, за исключением разве того случая, когда энергия беспорядочного движения какого-нибудь иона окажется значительно больше ее среднего значения. На деле постоянно наблюдалось, что более сильно заряженные капли имеют гораздо меньшую склонность захватывать новые отрицательные ионы, чем капли, заряженные слабее. Так, например, в одном случае мы наблюдали в течение четырех часов отрицательно заряженную каплю

радиуса 0,000 658 *см*. Заряд этой капли менялся от 126 до 150 элементарных единиц, так что потенциальная энергии ее заряда (вычисленная, как и раньше, в предположении равномерного распределения) колебалась от $4{,}6 \times 10^{-14}$ до $5{,}47 \times 10^{-14}$ эргов. За все время эта капля захватила только один отрицательный ион в отсутствии поля, несмотря на то, что ионизация была в несколько раз сильнее, чем в случае капли таблицы I. Положительные ионы захватывались почти при каждом спуске. (Сильный отрицательный заряд поддерживался тем, что капля держалась, при помощи поля, среди большого числа отрицательных ионов, как было объяснено выше).

V. Положительный и отрицательный электроны в точности равны между собой.

В связи с попытками объяснения сил химического сродства и сцепления с точки зрения электростатических притяжений, неоднократно высказывалась мысль, что, быть может, положительные и отрицательные заряды в так называемом нейтральном атоме не вполне одинаковы; другими словами, что в действительности не существует нейтральных атомов или молекул. Оказывается, что проверка этой гипотезы сопряжена с большими трудностями. Наши опыты дали возможность сделать проверку следующего рода. Я заряжал данную каплю сперва отрицательными электронами и наблюдал десять или двенадцать подъемов или падений. Затем, пользуясь рентгеновыми лучами (по способу, указанному в последнем отделе), я менял знак заряда капли на обратный и наблюдал такое же число подъемов и падений. Таким образом я измерял сперва величину отрицательного, а затем положительного электрона. Таблица VIII дает ряд таких наблюдений, произведенных в воздухе, при чем было сделано все, чтобы выяснить поставленный вопрос со всею достижимой точностью. Аналогичные, хотя и менее тщательные, наблюдения были произведены в водороде и дали тот же результат. В первом столбце таблицы указан знак заряда. Второй столбец дает продолжительность свободного падения. Третий дает продолжительность подъема в поле F. В четвертом указано число электронов, несомых каплей при каждом t_F. В пятом — число, характерное для данной капли и пропорциональное заряду одного электрона. Число это получено так же, как и в двух предыдущих таблицах, путем нахождения общего наибольшего делителя в последовательных значениях $(v_1 + v_2)$; число это умножено на произвольную постоянную, которая нас здесь не интересует (См. главу V).

Таблица VIII.

Знак заряда	t_g в *сек*	t_F в *сек*	n	e
—	63,118	—	—	$e_1 = 6{,}713$
	63,050	—	—	
	63,186	41,728	8	
	63,332	41,590		
	62,328	—	—	
	62,728	25,740	11	
	62,926	25,798		
	62,900	25,510		
	63,214	25,806		
Среднее = 62,976		—	—	—
+	63,538	22,694	12	$e_1 = 6{,}692$
	63,244	22,830		
	63,114	25,870	11	
	63,242	25,876		
	63,362	25,484		
	63,136	10,830	22	
	63,226	10,682		
	63,764	10,756		
	63,280	10,778		
	63,530	10,672		
	63,268	10,646		
Среднее = 63,325		—	—	

Знак заряда	t_g в *сек*	t_F в *сек*	n	e
+	63,642	—	—	$e_1 = 6{,}702$
	63,020	71,664	6	
	62,820	71,248		
	63,514	52,668	7	
	63,312	52,800		
	63,776	52,496		
	63,300	52,860		
	63,156	71,708	6	
	63,126	—	—	
Среднее = 63,407		—	—	—
—	63,228	42,006	8	$e_1 = 6{,}686$
	63,294	41,920		
	63,184	42,108		
	63,260	53,210	7	
	63,478	52,922		
	63,074	53,034		
	63,306	53,438		
	63,414	12,888	19	
	63,450	12,812		
	63,446	12,748		
	63,556	12,824		
Среднее = 63,335		—	—	—

Продолжительность опыта = 1 *ч* 40 *мин*. Напряжение в начале опыта = 1723,5 *вольт*. Напряжение в конце опыта 1702,1 *вольт*. Давление = 53,84 *см*. Среднее $e_+ = 6{,}697$. Среднее $e_- = 6{,}700$.

Из таблицы видно что даже в том случае, когда капля несет одно и то же число электронов, время падения и подъема чуть-чуть меняется вследствие весьма слабого испарения и вследствие падения потенциала батареи. Тем не менее, эта таблица показывает, что среднее значение положительного электрона, именно 6,697, согласуется со средним значением отрицательного электрона, равным 6,700, с точностью до $\frac{1}{2000}$. Так как это число находится в пределах ошибки опыта $\left(\text{вероятная ошибка, вычисленная по способу наименьших квадратов, равна } \frac{1}{1500}\right)$, то мы можем с несомненностью заключить, что разность между значениями положительного и отрицательного электронов не превышает этого числа. Это — лучшее из известных мне доказательств полной нейтральности обыкновенных молекул газа. Эта нейтральность, если она действительно полная, повидимому, исключает возможность объяснить тяготение действием каких-либо электростатических сил. но для этой цели можно, тем не менее, воспользоваться электромагнитным эффектом движения зарядов.

VI. Сопротивление среды движению капли не зависит от того, заряжена капля или нет.

Таблица VIII дает возможность вывести еще одно столь же важное заключение. Из столбца, озаглавленнного „*n*“, видно, что в течение всего времени, соответствующего третьей (первой справа) группе наблюдений, капля несла 6 или 7 электронов; между тем, в течение второй половины наблюдений второй группы капля несла втрое больше, именно 22 электрона. Тем не менее, для обеих групп средняя продолжительность свободного падения совпадает с точностью до $\frac{1}{1000}$. При этом оказывается, что продолжительность падения капли с бо́льшим зарядом в данном случае меньше. Отсюда мы заключаем, что в наших опытах сопротивление среды движению тела не увеличивается заметным образом, когда тело получает электрический заряд. Этим доказывается на опыте точная справедливость в наших условиях предположения, сделанного на стр. 54, что скорость капли строго пропорциональна действующей на нее силе, независимо от того, заряжена капля или нет.

Этот результат кажется на первый взгляд несколько странным. В самом деле, согласно ионной теории предложенной Сутерлэндом (Sutherland), малая подвижность или способность к диффузии заряженных молекул в сравнении с незаряженными обусловливается добавочным сопротивлением среды, которое встречает в своем движении заряженная молекула. Это добавочное сопротивление происходит потому, что заряд молекулы заставляет сталкиваться с нею бо́льшее число молекул, чем столкнулось бы при отсутствии заряда. Но размеры тех капель, которыми мы пользовались ($a = 50 \times 10^{-6}$ *см*) были довольно велики по сравнению с размерами молекул. Поэтому у нас полное число столкновений молекул с поверхностью капли было настолько велико, что хотя небольшое число зарядов на ней и могло бы повлечь несколько лишних столкновений, число этих новых столкновений было бы ничтожно мало в сравнении с полным их числом. Во всяком случае, опыт с несомненностью показывает, что присутствие зарядов на наших каплях масла не влияет на сопротивление среды движению капли. Мы могли бы вывести это заключение уже на основании данных, содержащихся в таблице VI. Полная справедливость этого заключения доказывается еще более убедительным образом путем сравнения капель, несших только 1 заряд, с каплями, несшими целых 68 зарядов. Кроме того, я наблюдал скорость свободного падения капель, совершенно лишенных заряда, и во всех без исключения случаях я нашел, что эта скорость в точности одинакова, в пределах ошибок отсчета времени, со скоростью тех же капель, когда они несли от 8 до 10 зарядов.

VII. Капли действуют подобно твердым шарам.

Для работы, изложение которой будет дано в следующей главе, важно было выяснить следующий вопрос: претерпевают ли капли по той или иной причине заметное отклонение от шарообразной формы, которую должна принимать свободно взвешенная капля жидкости. Причиной могло бы служить либо самое движение через сопротивляющуюся среду, либо присутствие электрического поля. Мы получим полный экспериментальный ответ на этот вопрос, если обратим внимание на следующее обстоятельство: средние выводы из чисел последнего и шестого столбца таблицы VI совпадают. Такие же совпадения наблюдаются во многих других таблицах, которые можно найти в оригинальных статьях [1]). Так как в данном случае

[1]) „Phys Rev.“, Series 1, XXXII (1911), 349; Series 2, II (1913), 109.

$\frac{1}{t_g}$ велико в сравнении с $\frac{1}{t_F}$, то величина общего наибольшего делителя в конце последнего столбца таблицы VI определяется почти исключительно скоростью свободного падения частицы в отсутствии поля; с другой стороны, скорость в конце шестого столбца представляет разность двух скоростей в сильном электрическом поле. Поэтому, если бы капли в электрическом поле претерпевали изменения формы, так что сопротивление среде оказывалось бы поверхностью бо́льшей, чем у шара, то скорость под действием данной силы (т. е. скорость, указанная в конце шестого столбца) была бы меньше скорости, соответствующей шарообразной форме и приведенной в конце последнего столбца.

Далее, если бы форма капель менялась вследствие движения в среде, то это изменение формы для больших скоростей было бы больше, чем для малых. Такого изменения этих чисел в зависимости от скорости не наблюдается, однако, ни в таблице VI, ни в других аналогичных таблицах.

Точность и неизменность закона кратных отношений, которому подчиняются разности и суммы скоростей в шестом и последнем столбцах таблицы VI, дает нам полное экспериментальное доказательство того факта, что капли, с которыми мы оперировали, действуют во всех случаях, как неизменяемые шары. Интересно следующее обстоятельство. Гадамар (Hadamard) [1]), профессор университета в Париже, и Лунн (Lunn) [2]), профессор университета в Чикаго, оба показали, на основании теоретических соображений, что для случая капель масла таких (малых) размеров, с какими мы имеем дело в описанных опытах, неизменность формы капель должна действительно иметь место. Таким образом мы можем считать наше заключение весьма прочно обоснованным как со стороны опыта, так и со стороны теории.

---

[1]) „Comptes rendus“ (1911), 1735.

[2]) „Phys. Rev.“, XXXV (1912), 227.

ГЛАВА ПЯТАЯ.

ТОЧНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ *e*.

I. Обнаружение неточности закона Стокса.

В предыдущей главе мы констатировали факт, что сумма скоростей $v_1 + v_2$, а также разность $(v_2' - v_2)$ всегда являются целыми кратными одной определенной скорости. Напомним, что $v_1 + v_2$ измеряет полный заряд данного тела, а разность $v_2' - v_2$ измеряет изменение заряда этого тела. Скорость, представляющая общий наибольший делитель всех наблюденных скоростей, меняется, однако, от капли к капле. Хотя упомянутый факт вполне доказывает атомное строение электричества, тем не менее наши исследования остаются не вполне завершенными. Нам остается еще найти множитель пропорциональности между скоростью и зарядом и таким образом выразить общий наибольший делитель в электрических единицах. Мы должны, разумеется, ожидать, что когда это будет сделано, то заряд окажется универсальной постоянной, не зависящей от размеров и природы капли, над которой производились опыты. Сперва я попытался применить для этого метод, основаннный на предположении справедливости закона Стокса, метод которым я уже пользовался нри опытах с каплями воды. Замечу здесь, что справедливость закона Стокса не подвергалась сомнению. Моя попытка привела к интересному результату, указывающему, что этот закон не верен [1]). Согласно этому закону, скорость v_1 свободного падения шаровидной капли равна

$$v_1 = \frac{2}{9} \cdot \frac{ga^2}{\eta} (\sigma - \varrho), \tag{11}$$

где η есть вязкость (коэффициент внутреннего трения) среды, a —

---

[1]) Кённингэм (Cunningham) „Proc. Roy. Soc.“, LXXXIII (1910), 357 и автор пришли независимо один от другого к заключению о неточности закона Стокса, он — на основании теоретических соображений, развитых им около того же времени, я — на основании своих опытов.

радиус, σ — плотность капли, и ϱ — плотность среды. Этой последней величиной мы пренебрегали в формуле (6) стр. 41, потому что при тех грубых измерениях, которые были тогда возможны, бесполезно было бы принимать эту величину во внимание. Но в наших опытах над каплями масла в сухом воздухе все другие входящие в формулу величины известны с большой точностью, так что пренебрегать величиною ϱ уже нельзя.

Предположим, что предыдущее уравнение Стокса справедливо, и сопоставим его с уравнением (5) стр. 41, справедливость которого была доказана в последней главе. Пользуясь чисто геометрическим соотношением $m = \frac{4}{3}\pi a^3(\sigma - \varrho)$, мы получим следующее выражение для заряда e_n, несомого каплей, заряженой n электронами (при этом предполагается, что электроны подсчитываются по способу, описанному выше):

$$e_n = \frac{4\pi}{3}\left(\frac{9}{2}\eta\right)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{1}{g(\sigma - \varrho)}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{(v_1 + v_2)\, v_1^{\frac{1}{2}}}{F}. \tag{12}$$

Чтобы получить элементарный заряд e_1, нужно подставить в эту формулу общий наибольший делитель для всех наблюденных серий значений $(v_1 + v_2)$ и $(v_2' - v_2)$. Обозначая его через $(v_1 + v_2)_0$, мы будем иметь

$$e_1 = \frac{4\pi}{3}\left(\frac{9}{2}\eta\right)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{1}{g(\sigma - \varrho)}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{(v_1 + v_2)_0\, v_1^{\frac{1}{2}}}{F}. \tag{13}$$

Но когда это уравнение было применено к различным каплям, то оказалось следующее. Когда различные капли падали с одной и той же скоростью, это уравнение давало вполне согласные между собой результаты. В тех же случаях, когда мы пользовались каплями, имевшими различные скорости, а значит и различные размеры, значения e_1 получились тем больше, чем меньше была скорость свободного падения. Так, например, для капли, скорость которой $v_1 = 0{,}010\,85$ *см/сек*, e_1 получилось равным $5{,}49 \times 10^{-10}$, а для другой капли с той же почти скоростью $v_1 = 0{,}011\,76$ получались e_1, равное $5{,}482 \times 10^{-10}$. Когда же были взяты две капли, скорость которых была в пять раз больше, именно 0,0536 и 0,0553, e_1 получилось равным соответственно 5,143 и $5{,}145 \times 10^{-10}$. Это означало, что закон Стокса становится неверным для капель таких размеров, какими мы пользовались (напр., с радиусом $a = 0{,}0002$ *см*, см. отдел IV. Относительно причины неверности закона Стокса,

возникла следующая догадка. При выводе закона Стокса среда, сквозь которую происходит движение тела, предполагается непрерывной и однородной; в данном же случае в виду малости капель воздух не мог уже считаться абсолютно однородной средой. Возможно, что закон становится неверным, как только неоднородности среды, т. е. расстояния между молекулами, переставали быть малыми по сравнению с размерами капли. Далее, легко видеть, что как только пустоты в среде перестают быть малыми по сравнению с размерами капли, скорость последней должна увеличиться, ибо она как бы приближается к тому состоянию, когда она может падать без сопротивления сквозь пустоты в среде. Это проявилось бы в том, что по мере уменьшения размеров капли наблюдаемая скорость все больше и больше превышала бы скорость, вычисленную на основании закона Стокса. Но, как видно из уравнеиия (13), кажущаяся величина заряда электрона e_1 прямо пропорциональна скорости $(v_1 + v_2)_0$, сообщенной данной силой. Следовательно, e_1 должно получиться тем больше, чем меньше будет радиус капли, т. е. чем меньше скорость ее свободного падения; именно это и наблюдалось на всех изученных каплях масла. Таким образом мы, повидимому, нашли не только неверность закона Стокса, но также и путь, по которому следовало итти, чтобы исправить его.

Чтобы получить в этом полную уверенность, мы должны были, однако, предпринять целую серию новых и довольно сложных опытов.

Целью этих опытов было, во первых, нахождение коэффициента внутреннего трения воздуха при тех условиях, когда его можно было считать вполне однородной средой, и, во вторых, нахождение тех границ, в пределах которых можно считать закон Стокса справедливым.

II. Коэффициент внутреннего трения воздуха.

Опыты по определению коэффициента внутреннего трения воздуха были выполнены в Райерсоновской лаборатории доктором Л. Гильхристом (Lachen Gilchrist) (ныне в университете в Торонто) и доктором И. Раппом (J. M. Rapp), (ныне в университете в Оклагоме—Oklahoma). Д-р Гильхрист пользовался методом [1]) во многих отношениях новым и в значительной мере свободным от принципиальных недостатков методов, употреблявшихся ранее. Гильхрист полагал, что погрешность его результата не могла превы-

[1]) „Phys. Rev.", I (1913). 124.

шать 0,1% или 0,2%. Д-р Рапп пользовался видоизменением обыкновенного метода капиллярных трубок, но при условиях, которые, повидимому, давали возможность более точного, чем раньше, определения абсолютного значения η для воздуха.

Таблица IX.

Исследователи и методы	η_{23} для воздуха
Rapp, метод капиллярных трубок, 1913 („Phys. Rev.", II, 363)	0,000 182 27
Gilchrist, метод постоянного отклонения, 1913 („Phys. Rev.", I, 124).	0,000 182 57
Hogg, затухание колеблющихся цилиндров, 1905 (Proc. Am. Acad.", XL, 611)	0,000 182 29
Tomlinson, затухание маятника, 1886 („Phil. Trans.", CLXXVII, 767)	0,000 182 58
Grindley и Gibson, истечение через трубки, 1908, („Proc. Roy. Soc.", LXXX, 114)	0,000 182 32
Среднее . . .	0,000 182 40

Измерения продолжались свыше двух лет. Когда результаты их были опубликованы, то оказалось, что средние выводы, полученные обоими авторами, находятся в полном согласии как между собой, так и с наиболее тщательными из предшествовавших определений. Как видно из таблицы IX, каждый из пяти различных методов, употреблявшихся для абсолютного определения η для воздуха, приводит к числу, которое отличается менее, чем на $\frac{1}{1000}$ долю, от следующего среднего числа: $\eta_{23} = 0{,}000\,182\,40$. Отсюда можно было вывести заключение, что при условиях наших опытов величина η для воздуха известна нам по крайней мере с точностью до $\frac{1}{1000}$ доли. Совсем недавно д-р Гаррингтон (E. Harrington) еще более усовершенствовал аппарат, придуманный Гильхристом и автором. С этим аппаратом он произвел в Райерсоновской лаборатории определение η, которое, по моему мнению, является единственным в своем роде по своей надежности и точности. Я придаю ему больший вес, чем всем прочим работам в этой области за последние 50 лет, вместе взятым. Окончательное число, полученное в этом случае:

$$\eta_{23} = 0{,}000\,182\,26,$$

и ошибка едва ли может превышать одну двухтысячную долю этого числа.

III. Пределы применимости закона Стокса.

При теоретическом выводе закона Стокса вводятся следующие пять предположений: (1) что неоднородности среды малы в сравнении с размерами шара; (2) что шар падает так, как если бы среда была неограничена; (3) что шар гладкий и твердый; (4) что отсутствует скольжение среды по поверхности шара; (5) что скорость движения шара настолько мала, что все сопротивление движению происходит вследствие вязкости среды, а не вследствие инерции тех частей среды, которые проталкиваются вперед при движении шара.

При выполнении всех этих условий закон Стокса должен быть верным. Однако вплоть до 1910 года не было произведено опытов, которые бы показывали, что закон Стокса в первоначальном виде может служить для точного предсказания результатов опытов. Поэтому д-р Арнольд (H. D. Arnold) предпринял в Райерсоновской лаборатории исследование, которое имело целью выяснить, с какою точностью этот закон дает скорости падения весьма малых шариков в воде и алкоголе.

Успешность этих опытов была главным образом обусловлена остроумным способом получения в точности шаровидных капелек из металла Роза. Этот металл плавится при температуре около 82° Ц., а при температуре кипения воды он совершенно жидкий, Д-р Арнольд вводил немного этого металла в стеклянную трубку, вытянутую в капилляр на одном конце, и помещал всю эту трубку в другую стеклянную трубку длиной около 70 *см* и диаметром в 3 *см*. Затем он наполнял широкую трубку водой и нагревал ее так, что верхний ее конец поддерживался при температуре 100° Ц., а нижний при 60° Ц. Потом, при помощи сжатого воздуха он заставлял расплавленный металл проходить через капилляр в горячую воду. Металл принимал форму струи, при чем капли, дойдя до конца трубки, охлаждались настолько, что сохраняли свою сферическую форму. Таким путем д-р Арнольд получил шарики размером от 0,002 до 0,1 *см*. При наблюдении под микроскопом оказывалось, что эти шарики — совершенно правильной формы и с совершенно ровной поверхностью. Арнольд нашел, что наиболее медленная из этих капель падала в жидкости со скоростью, которая совпадала с вычисленной по закону Стокса с точностью до нескольких десятых процента, и он определил на опыте пределы для скорости, в которых закон Стокса оставался справедлив.

Из пяти предположений, лежащих в основе закона Стокса, первое, третье и четвертое были несомненно выполнены в опытах д-ра Арнольда. Что касается второго предположения, то оно, как было найдено, выполнялось в достаточной степени только для самых малых. капель, но не для более крупных. Но еще до того Ладенбург (Ladenburg)[1]) с большим искусством исследовал вопрос о влиянии сосуда на движение капель через жидкость, заключенную в этом сосуде. Ладенбург работал с чрезвычайно вязким маслом, именно с венецианским терпентином, и получил формулу, посредством которой можно было исключить влияние стенок сосуда на движение. Пусть жидкость или газ заключается в цилиндре, поперечное сечение которого есть круг радиуса R, и длина которого равна L. Тогда, по Ладенбургу, нужно видоизменить обыкновенную формулу Стокса следующим образом

$$v = \frac{2}{9} \frac{ga^2(\sigma - \varrho)}{\eta\left(1 + 2{,}4\frac{a}{R}\right)\left(1 + 3{,}1\frac{a}{L}\right)}.$$

Арнольд нашел, что эта формула точно передавала результаты всех его опытов, в которых стенки сосуда могли оказывать какое либо влияние на движение. Таким образом он работал в условиях когда можно было быть спокойным за первые четыре предположения, лежащие в основе закона Стокса. Это дало ему возможность показать, что закон Стокса оставался вполне верен во всех тех случаях, когда выполнялось пятое предположение. Уже Стокс нашел[2]) из теоретических соображений, что закон будет верен только в том случае, когда радиус шара мал по сравнению с $\frac{\eta}{v\varrho}$, где ϱ есть плотность, а η вязкость среды, и v скорость шара. Этот радиус называется критическим радиусом. Но оставалось неизвестным, насколько можно было приближаться к этому критическому радиусу. Опыты Арнольда показали, что инерция среды не оказывает заметного влияния на скорость шара, пока радиус его не превышает 0,6 критического радиуса.

Прилагая этот результат к движению наших капель масла, мы выяснили, что даже самые быстрые из наблюдавшихся капель падали настолько медленно, что инерция среды не могла служить источником

---

[1]) „Ann. der Phys.“. XXII (1907). 287; XXIII (1908). 447.

[2]) „Math. and Phys. Papers“, III, 59.

даже малейшей ошибки. Это значило, что пятое условие, необходимое для приложимости закона Стокса, у нас выполнялось. Кроме того, наши капли были настолько малы, что второе условие также выполнялось; это вытекало из работ Ладенбурга и Арнольда. Что касается третьего условия, то в последней главе указывается, что оно тоже выполнялось. Но, как показали работы Арнольда, при выполнении всех пяти условий закон Стокса вполне справедлив. Поэтому задача нахождения формулы, которая бы заменила закон Стокса для случая наших опытов над каплями масла, приводилась к следующему. Нужно было найти, как именно влияло на движение капель невыполнение условий (1) и (4).

IV. Поправка закона Стокса на неоднородность среды.

Прежде всего нам предстояло найти точную величину отступлений от закона Стокса для наших капель. Для этого мы нанесли

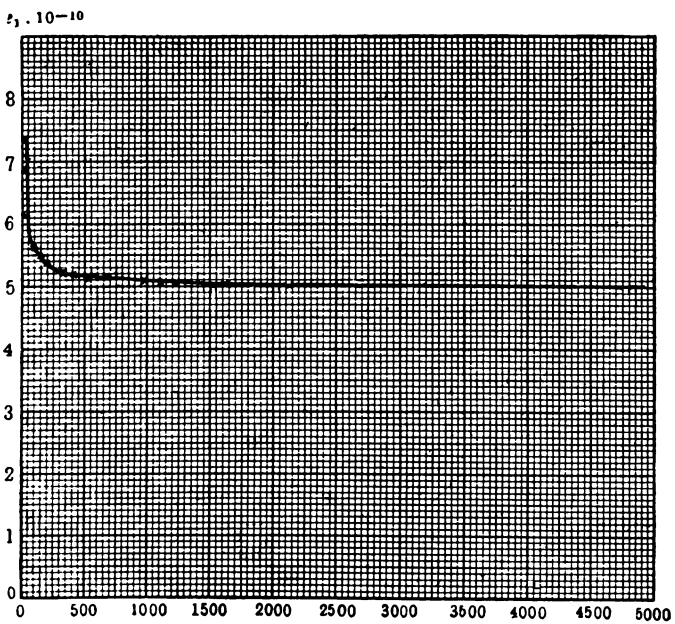

Рис. 4.

Числа на оси абсцисс, умноженные на 10^{-4}, дают в *см/сек* скорости падения капель под влиянием силы тяжести.

в качестве ординат и абсцисс кажущуюся величину электрона e_1 и наблюденную скорость свободного падения; таким образом мы получили кривую, показанную на рис. 4. Кривая эта показывает, что

хотя для очень малых скоростей e_1 изменяется с изменением скорости довольно быстро, для скоростей, превышающих ту, которой соответствует абсцисса „1000“, зависимость e_1 от скорости становится весьма малой. Эта абсцисса соответствует скорости, равной 0,1 *см/сек*. Мы можем отсюда заключить, что для капель, настолько больших, чтобы падать со скоростью свыше 0,1 *см/сек*, закон Стокса требует лишь незначительной поправки на неоднородность воздуха.

Чтобы найти точное выражение для этой поправки, можно поступать следующим образам. Мерой пустоты в газообразной среде может, очевидно, служить среднее расстояние, пробегаемое молекулой газа в промежутке между двумя столкновениями. Величина эта хорошо известна и измерена с достаточной точностью; она называется „средним свободным пробегом“ молекулы газа. Причиной отклонения от закона Стокса при достаточно малой величине капли является то, что среда перестает быть однородной, если ее рассматривать с точки зрения капли. Это означает просто, что радиус капли начинает приближатся к средним размерам пустот; последнюю же величину мы решили измерять средним свободным пробегом l. Увеличение скорости падения сравнительно с той, которая дается законом Стокса, должно быть поэтому некоторой функцией от отношения $\frac{l}{a}$. Формула

$$v_1 = \frac{2}{9}\frac{ga^2}{\eta}(\sigma - \varrho),$$

дающая скорость падения, была проверена Арнольдом для того случая, когда пустоты ничтожно малы, как, например, при падении капли сквозь жидкость. В данном же случае, истинное выражение для скорости v_1 капли, падающей сквозь газ, должно быть вида

$$v_1 = \frac{2}{9}\frac{ga^2}{\eta}(\sigma - \varrho)\left[1 + f\left(\frac{l}{a}\right)\right]. \tag{14}$$

Не зная вида функции $f\left(\frac{l}{a}\right)$, мы можем тем не менее выразить ее в виде ряда с неопределенными постоянными A, B, C, и т. д.

$$f = A\frac{l}{a} + B\left(\frac{l}{a}\right)^2 + C\left(\frac{l}{a}\right)^3 + \cdots$$

Кроме того, из рис. 4 видно, что отклонения от закона Стокса для большинства наших капель весьма малы. Но для малых отсту-

плений мы можем пренебречь членами второго порядка относительно $\frac{l}{a}$ и будем иметь поэтому

$$v_1 = \frac{2}{9} \cdot \frac{ga^2}{\eta} (\sigma - \varrho) \left(1 + A \frac{l}{a}\right); \tag{15}$$

пользуясь этой исправленной формулой закона Стокса, а также уравнением (9) (стр. 54), мы получим для заряда e_n точно такое же выражение, как и (13), но с заменой скорости v выражением $\frac{v}{1 + A \frac{l}{a}}$

Мы обозначим теперь через e абсолютное значение заряда электрона, а через e_1 кажущееся значение, получаемое в предположении справедливости закона Стокса, т. е. из формулы (13). Так как скорость капли входит в эту формулу в етепени $\frac{3}{2}$, мы получим теперь

$$e = \frac{e_1}{\left(1 + A \frac{l}{a}\right)^{\frac{3}{2}}} \tag{16}$$

В этом уравнении e_1 может быть получено из (13), и величина l известна; но e, A и a нам неизвестны. Если бы мы знали a, то наши наблюдения позволили бы непосредственно определить e и A, как будет подробно показано в отделе VI этой главы (см. стр. 80).

То обстоятельство, что, зная a, мы можем определить и e, будет ясно из общих соображений, без подробных вычислений. В самом деле, определение радиуса капли равносильно нахождению ее веса, так как плотность ее известна. Но зная вес капли мы можем определить заряд на ней; это вытекает из того простого соображения, что скорость падения капли под действием силы тяжести пропорциональна ее весу, тогда как скорость в электрическом поле данной силы пропорциональна ее заряду. Так как обе эти скорости измеряются нами независимо, то мы можем либо определить вес, зная заряд, либо определить заряд, зная вес [см. уравнение (9) стр. 54].

V. Взвешивание капли.

Первоначально для определения веса капли мы просто решали относительно a непоправленную формулу Стокса [ур. (11) стр. 69] для каждой капли. Кривая рис. 4 показывает, что отступления от закона Стокса малы за исключением случая весьма медленных капель;

кроме того, величина a входит в формулу (11) во второй степени. Поэтому ясно, что если мы оставим в стороне самые медленные капли, то формула (11) должна дать значения a, весьма близкие к истинным. После этого, пользуясь методом, изложенным в сладующих отделе, мы можем определить приближенное значение A, а зная A, мы можем решить формулу (15) относительно исправленной величины a. Изложенный прием представляет метод последовательных приближений, который, теоретически говоря, дает a и A с любой желаемой степенью точности. На практике оказывается, что весь поправочный член $A \times \frac{l}{a}$ настолько мал, что более двух приближений никогда делать не приходится. Эти два приближения дают a с гораздо большей точностью, чем это требуется для определения e.

Зная же с достаточной точностью величину e, мы можем произвенепосредственное взвешивание чрезвычайно малых тел с большой сти достоверностью и с весьма высокой степенью точности. В самом деле, мы показали на опыте справедливость уравнения

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{mg}{Fe_n - mg}. \tag{17}$$

Это уравнение не требует никаких предположений относительно формы, размеров или материала частицы. Решая его относительно веса частицы mg, мы получим

$$mg = Fe_n \frac{v_1}{v_1 + v_2}. \tag{18}$$

Здесь e_n известно с той же точностью, как и e, ибо мы знаем, как сосчитать n. Мы покажем ниже, что e известно теперь, вероятно, с точностью до одной тысячной доли. Таким образом, mg может быть определено с той же точностью для всякого тела, если только мы можем зарядить это тело подсчитанным числом n электронов и затем заставить его подниматься против силы тяжести посредством электрического поля, или, если угодно, уравновесить его по способу, которым мы пользовались при опытах над каплями воды и масла [1]). Этот прием представляет просто электрические весы вместо механических, и при помощи него можно легко взвесить тело с точностью до одной десятимиллиардной доли миллиграмма.

[1]) См. „Phil Mag.“, XIX (1910), 216; XXI (1911), 757.

Пятьдесят лет тому назад триумфом инструментального искусства считались весы, которые были настолько чувствительны, что можно было взвесить кусок бумаги, затем написать на ней твердым карандашом свое имя и определить рязность между новым весом и старым —вес собственного имени. Это значило, что можно было определить вес в одну десятую или в одну сотую миллиграмма. Около пяти лет назад Рамзэй и Спенсер (Ramsay, Spencer) в Лондоне построили весы из весьма тонких кварцевых нитей и поместили их в пустоту. На этих весах можно было взвесить предметы в одну миллионную долю миллиграмма, так что названным ученым удалось осуществить взвешивание предметов в десять тысяч раз более легких, чем раньше, т. е. отодвинуть предел в 10 000 раз. Рассматриваемые нами исследования отодвинули этот предел еще по крайней мере в 10 000 раз; они позволили производить взвешивание предметов настолько малых, что они остаются невидимыми невооруженному глазу. Чтобы определить вес такого предмета нужно проделать следующие манипуляции: во первых, заставить предмет повиснуть в воздухе; во вторых, осветить его так, чтобы его можно было видеть в отраженном свете в ультрамикроскоп того типа, каким мы пользовались; в третьих, зарядить его электричеством посредством захвата ионов; в четвертых, сосчитать по описанному методу число электронов его заряда; и, наконец, в пятых, изменять потенциал, приложенный к пластинкам, или заряд тела, пока вес его не уравновесится силой поля, стремящеюся сообщить ему восходящее движение. Вес тела будет тогда в точности равен произведению его заряда на силу электрического поля. После того, как мы определили e с достаточной точностью, мы производили все взвешивания капель и определения их радиусов именно таким путем[1]). Такими весами можно пользоваться для довольно точного определения радиуса шарообразной капли еще до того, как получено вполне точное значение e. В самом деле, заменяя в уравнении (18) m на $\frac{4}{3}\pi a^3(\sigma-\varrho)$ и решая относительно a, получим

$$a=\sqrt[3]{\frac{3Fe_n}{4\pi g(\sigma-\varrho)}\,\frac{v_1}{v_1+v_2}}. \tag{19}$$

Это уравнение показывает, что a пропорционально корню кубиче-

[1]) „Phys. Rev.“, II (1913), 117. Содержание этой статьи было доложено в Deutsche physikalische Gesellschaft (Немецкое Физическое Общество) в Берлине в июне 1912 г.

скому из e. Поэтому подстановка в уравнение приближенного значения e даст величину a с относительной ошибкой, равной только одной трети ошибки принятого значения e. В виду достигнутого в настоящее время точного определения e, этот метод может быть рекомендован ныне для определения веса или размеров всякого достаточно малого тела, ибо он совершенно не зависит от природы тела или от среды, в которую оно погружено. Этот способ взвешивания тела является столь же непосредственным и надежным, как если бы оно было взвешено на механических весах.

VI. Вычисление величин e и A.

Когда известны e_1 и $\frac{l}{a}$, мы можем легко определить e и A из уравнения

$$e = \frac{e_1}{\left(1 + A\frac{l}{a}\right)^{\frac{3}{2}}}.$$

В самом деле, перепишем это уравнение в виде

$$e^{\frac{2}{3}}\left(1 + A\frac{l}{a}\right) = e_1^{\frac{2}{3}} \tag{20}$$

и будем откладывать наблюденные значения $e_1^{\frac{2}{3}}$ в качестве ординат, а соответствующие значения $\frac{l}{a}$ в качестве абсцисс. Тогда мы должны получить прямую линию, если только наш исправленный закон Стокса правильно передает явление падения капель в пределах рассматриваемых значений $\frac{l}{a}$. Если бы такого линейного соотношения найдено не было, то это значило бы, что уравнение вида (15) не пригодно для описания явления в данных переделах. На деле оказалось, что такого рода линейная зависимость действительно имеет место, и притом в гораздо более широких пределах значений $\frac{l}{a}$, чем это можно было ожидать. Как видно из уравнения (20), ордината пересечения этой прямой с осью ординат, т. е. значение $e_1^{\frac{2}{3}}$, соответствующее $\frac{l}{a} = 0$, равно $e^{\frac{2}{3}}$. Таким образом, достаточно возвести это число в степень $\frac{3}{2}$, чтобы получить абсолютную величину e. То же уравнение (20) показывает, что A равно

угловому коэффициенту прямой, деленному на ординату пересечения с осью $e_1^{\frac{2}{3}}$.

Чтобы проделать это на практике, необходимо менять $\frac{l}{a}$ и определять соответствующие значения e_1. Это может быть сделано двумя способами. Во первых, мы можем сохранять давление постоянным и наблюдать капли все меньших и меньших размеров. Во вторых, мы можем пользоваться каплями приблизительно одинаковых размеров и изменять давление газа, в котором они взвешены, так как очевидно, что средний свободный пробег l обратно пропорционален давлению.

Мы пользовались обоими способами. Оказалось, что данному значению e_1 всегда соответствует определенное значение $\frac{l}{a}$, так что результат получается одинаковый как в том случае, когда l оставлено тем же, но a уменьшено в 10 раз, так и в том случае, когда a оставлено прежним, а l в 10 раз увеличено. Результаты целого ряда довольно сложных наблюдений были в первый раз доложены в июне 1912 года Германскому Физическому Обществу (Deutsche Physikalische Gesellschaft), а затем в сентябре 1912 года Британской Ассоциации (British Association) в Дэнди (Dundee) [1]). Эти результаты представлены на рисунках 5 и 6. Числовые данные, на основании которых построены эти диаграммы, приведены почти полностью в таблице X. Мы видим, что этот ряд наблюдений обнимает собою изучение 58 капель. Эти капли представляют все без исключения капли, изученные в течение 60 дней подряд. При этом величина $\frac{l}{a}$ изменялась в 30 раз (с 0,016 для капли № 1 до 0,444 для капли № 58), давление p изменялось в 17 раз (с 4,46 *см* для капли № 56 до 76,27 *см* для капли № 10), величина a изменялась в 12 раз (с $4{,}69 \times 10^{-5}$ *см* для капли № 28 до $58{,}56 \times 10^{-8}$ *см* для капли № 1), и, наконец, число свободных электронов, несомых каплей, изменялось с 1 для капли № 28 до 136 для капли № 56.

Установка опыта показана на рис. 7. Латунный сосуд D был построен для работ с любыми давлениями до 15 атмосфер, но так как в настоящих наблюдениях работы производились при давлениях начиная с 76 *см* и ниже, то давление измерялось посредством тщательно изготовленного ртутного манометра m, который при атмо-

---

[1]) „Phys. Rev.", II (1913), 136.

сферном давлении давал показания, в точности совпадавшие с показаниями нормального барометра. Полная неподвижность воздуха

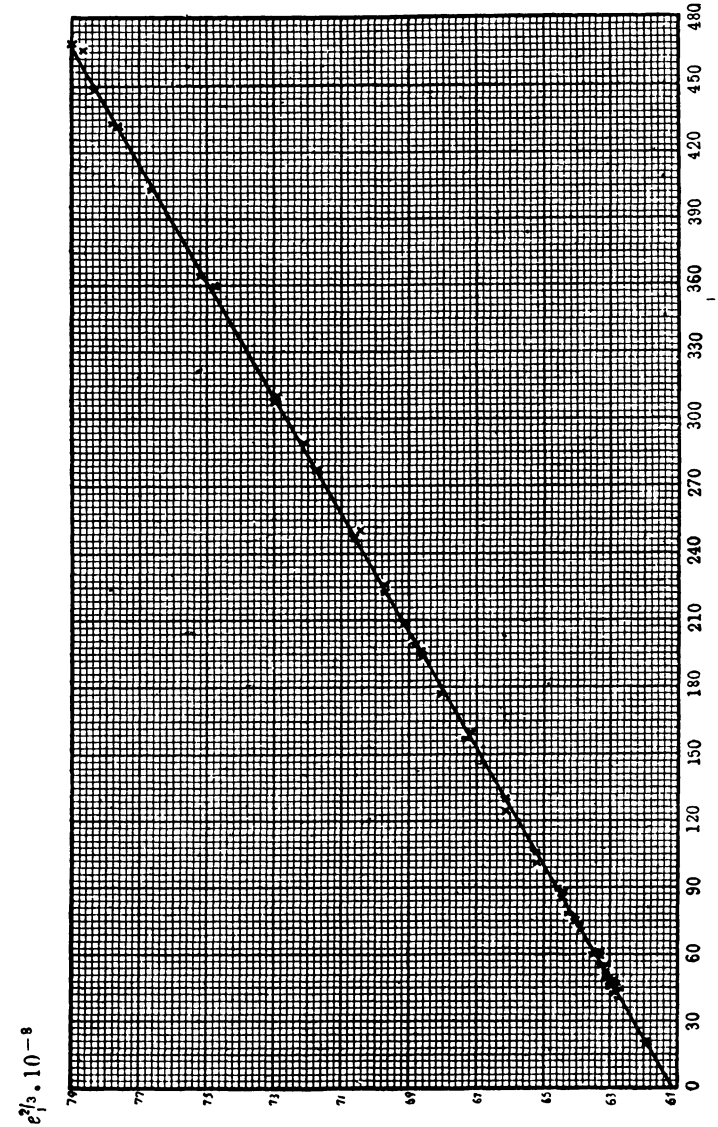

Рис. 5.

На оси абсцисс отложены значения $\frac{1}{p \cdot a}$; p — давление (p обратно пропорционально среднему свободному пробегу l); a — радиус капли.

между пластинами конденсатора M и N достигалась двумя средствами. Во первых, вся лучистая теплота от дуги a поглощалась посредством сосуда с водой w длиною в 80 *см* и сосуда с хлористой

медью d. Во вторых, весь сосуд D погружался в ванну G из газолинового масла (40 литров), так что вообще колебания температуры

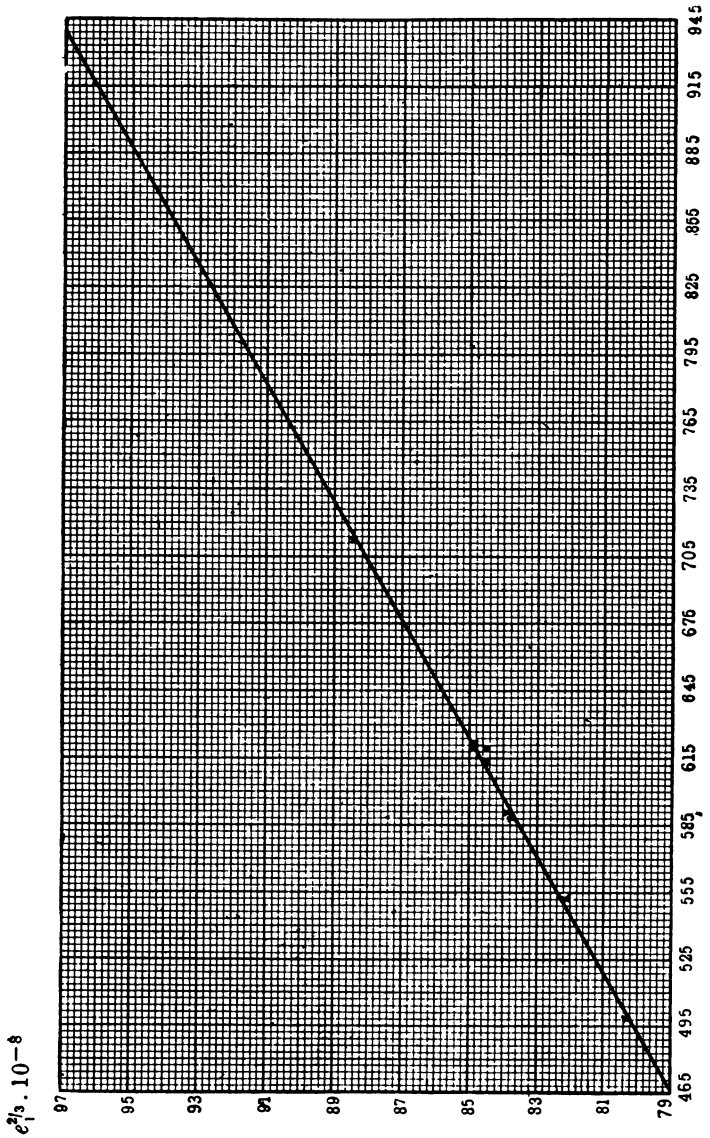

Рис. 6.
По оси абсцисс отложены значения дроби $\frac{1}{p.a}$.

в продолжение наблюдений не превышали 0,02° Ц. Эта ванна с постоянной температурой являлась существенным условием для достижения такой согласованности наблюдений, какая была здесь достиг-

Таблица X.

№	Темпер. °Ц.	Разн. потенц. (вольты)	t_g (сек)	v_1 см/сек	$(v_1+v_2)_0$	n	$a\times10^5$ см	p см ртути	1 ра	l а	$e_1\times10^{10}$	$e_1^{\frac{2}{3}}\times10^8$	$e^{\frac{2}{3}}\times10^8$
1	23,00	5168	4,363	0,235 7	0,003 293	77-102	58,56	75,80	22,52	0,016 15	4,877	61,90	61,14
2	22,80	5120	8,492	0,120 2	0,004 670	27-36	32,64	75,00	40,85	0,029 33	4,981	62,82	61,26
3	23,46	5100	9,905	0,103 2	0,004 996	22-27	30,29	73,71	44,88	0,032 12	4,971	62,75	61,04
4	22,85	5163	10,758	0,094 89	0,005 211	18-36	28,94	75,20	45,92	0,032 88	5,001	63,00	61,24
5	23,08	5072	10,663	0,095 75	0,005 176	20-30	29,14	73,25	46,85	0,033 53	4,982	62,82	61,13
6	22,82	5085	11,880	0,085 84	0,005 497	17-24	27,54	75,62	48,11	0,034 37	4,991	62,93	61,09
7	23,79	5090	11,950	0,083 68	0,005 480	19-22	27,57	75,10	48,44	0,034 66	4,981	62,82	61,07
8	23,50	5158	12,540	0,081 41	0,005 623	16-19	26,90	75,30	49,52	0,035 44	5,016	63,12	61,23
9	22,87	5139	13,562	0,073 75	0,005 962	19-23	25,71	75,00	51,73	0,037 02	5,016	63,13	61,15
10	23,25	5015	15,380	0,066 41	0,006 174	13-22	24,31	76,27	54,09	0,038 71	5,010	63,08	61,02
11	23,01	5066	15,193	0,067 20	0,006 087	11-14	24,36	73,90	55,52	0,039 73	5,015	63,12	61,00
12	23,00	5080	15,985	0,063 75	0,006 416	12-16	23,70	75,14	56,15	0,040 18	5,028	63,24	61,10
13	23,00	5024	15,695	0,054 63	0,006 873	9-15	21,91	76,06	59,94	0,042 90	5,043	63,35	61,06
14	23,09	5077	18,730	0,054 51	0,006 988	8-16	21,85	75,28	60,78	0,043 48	5,064	63,53	61,21
15	23,85	5078	18,950	0,052 74	0,006 966	8-18	21,78	75,24	61,03	0,043 68	5,040	63,33	61,07
16	23,70	5103	18,738	0,054 49	0,007 005	9-16	21,87	74,68	61,33	0,043 90	5,065	63,54	61,21
17	23,06	5060	18,415	0,055 45	0,006 890	9-18	22,06	73,47	61,69	0,044 11	5,054	63,43	61,00
18	22,83	5093	26,130	0,039 07	0,008 339	5-13	18,45	75,54	71,74	0,051 34	5,098	63,82	61,08
19	22,95	5033	28,568	0,035 70	0,008 651	5-9	17,63	75,87	74,77	0,053 50	5,120	64,00	61,12
20	23,00	5094	9,480	0,107 72	0,005 058	23-32	30,54	41,77	78,40	0,056 12	5,145	64,22	61,23
21	23,08	5018	35,253	0,028 93	0,009 660	4-11	15,80	74,32	85,08	0,060 89	5,166	64,36	61,11
22	23,22	5005	40,542	0,025 15	0,010 332	3-9	14,75	76,42	88,70	0,063 50	5,168	64,30	61,01
23	22,76	5098	39,900	0,025 54	0,010 510	3-6	14,85	75,40	89,35	0,063 95	5,190	64,59	61,18
24	23,16	5050	12,466	0,081 89	0,005 896	15-28	26,44	37,19	101,8	0,072 83	5,269	65,24	61,35
25	22,98	5066	15,157	0,067 37	0,006 399	12-17	24,01	38,95	107,2	0,076 60	5,278	65,28	61,20
26	23,20	4572	7,875	0,129 80	0,004 324	33-40	33,07	24,33	124,4	0,088 92	5,379	66,06	61,31
27	23,18	4570	9,408	0,108 5	0,004 730	23-29	30,23	25,37	130,4	0,093 30	5,381	66,16	61,18
28	23,00	5145	84,270	0,121 1	0,015 95	1-4	4,69	75,83	130,3	0,093 22	5,379	66,14	61,16

29	22,99	5073	23,223	0,043 93	0,008 488	6-12	19,06	33,47	156,8	0,111 7	5,529	67,36	61,37
30	23,19	5090	26,830	0,038 01	0,009 111	5-10	17,77	35,18	160,2	0,114 7	5,507	67,18	61,06
31	22,80	5098	38,479	0,026 49	0,011 180	3-5	14,71	36,51	176,5	0,126 3	5,621	68,12	61,38
32	23,06	5070	14,060	0,072 46	0,006 762	12-17	24,29	21,12	195,0	0,139 4	5,692	68,67	61,22
33	23,07	4582	18,229	0,056 01	0,006 981	10-13	21,33	23,86	196,6	0,140 5	5,687	68,64	61,13
34	23,06	5061	38,010	0,026 82	0,011 205	3-8	14,72	34,01	199,8	0,142 9	5,714	68,84	61,20
35	23,00	4246	9,265	0,110 32	0,004 653	27-34	29,84	16,00	209,5	0,149 9	5,739	69,07	61,07
36	22,91	4236	9,879	0,103 40	0,004 863	24-28	28,74	15,67	222,0	0,158 9	5,820	69,71	61,23
37	23,06	4236	12,040	0,084 96	0,005 362	18-24	26,27	16,75	227,5	0,162 5	5,821	69,72	61,03
38	22,94	2556	10,657	0,095 81	0,003 109	32-43	27,49	14,70	247,5	0,177 1	5,935	70,61	61,16
39	23,00	5054	19,950	0,051 15	0,008 370	8-15	20,12	19,73	251,8	0,180 2	5,910	70,41	60,79
40	23,09	5058	21,130	0,048 30	0,008 865	7-9	18,38	18,54	278,3	0,199 3	6,076	71,72	61,09
41	23,05	5062	24,008	0,042 54	0,009 496	6-8	18,16	19,01	289,6	0,207 3	6,110	72,03	60,97
42	22,94	4238	18,347	0,055 64	0,007 110	9-17	20,60	15,72	308,8	0,221 0	6,224	73,04	61,24
43	23,18	3254	13,909	0,073 40	0,004 729	16-28	23,70	13,55	311,0	0,222 7	6,214	72,83	60,95
44	23,04	4231	29,114	0,035 03	0,009 273	5-9	16,16	17,17	360,6	0,257 9	6,466	74,77	61,00
45	22,97	3317	29,776	0,034 25	0,007 430	5-12	15,90	17,27	364,2	0,260 6	6,537	75,30	61,39
46	22,81	3401	25,909	0,039 37	0,007 311	6-19	16,90	14,68	403,3	0,288 6	6,719	76,71	61,30
47	22,83	2550	12,891	0,079 21	0,003 935	18-42	23,80	9,70	432,8	0,309 7	6,841	77,66	61,13
48	22,80	2559	32,326	0,031 50	0,006 286	7-14	15,01	15,35	433,8	0,310 4	6,866	77,85	61,28
49	23,02	3370	14,983	0,068 15	0,011 353	8-9	22,00	10,10	448,8	0,322 1	6,936	78,36	61,22
50	23,45	2535	11,659	0,087 57	0,003 783	25-30	24,88	8,60	466,7	0,334 0	6,978	78,67	60,85
51	23,48	2539	10,924	0,093 46	0,003 615	27-34	25,69	8,26	470,7	0,336 8	7,024	79,02	61,04
52	22,98	3351	50,400	0,020 21	0,010 775	2-6	11,83	16,95	498,5	0,356 8	7,210	80,40	61,36
53	23,16	2451	33,379	0,030 55	0,006 623	5-10	14,39	12,61	551,3	0,394 5	7,470	82,19	61,13
54	23,46	2533	19,227	0,053 47	0,005 314	11-17	18,87	9,03	587,8	0,411 2	7,661	83,73	61,18
55	22,90	2546	24,254	0,042 06	0,006 041	9-18	16,72	10,11	591,5	0,423 3	7,672	83,82	61,22
56	23,21	1700	5,058	0,202 56	0,001 861	117-136	36,53	4,46	614,2	0,439 6	7,777	84,57	61,11
57	23,12	2321	15,473	0,065 99	0,004 360	18-24	20,85	7,74	619,7	0,443 5	7,774	84,54	60,87
58	23,03	3388,5	24,33	0,041 96	0,008 183	6-10	16,62	9,070	620,2	0,443 9	7,810	84,83	61,14

Среднее из всех чисел последнего столбца = 61,138

„ „ первых 23 чисел „ „ = 61,120

нута. Долгие поиски причин небольших неправильностей показали всю важность этого условия постоянства температуры, и после установки ванны все неправильности исчезли. Распылитель A приводился в действие воздухом, тщательно высушенным и освобожденным от пыли, который вводился через кран e. Воздух вокруг капли p по желанию ионизовался при помощи рентгеновых лучей от трубки X, проходивших через окошко g; если лучи падали непосредственно на капли, то от последних отрывались электроны. Трем окошечкам g в латунном сосуде D (из них показаны только два) соответствуют, конечно, три окошка в эбонитовой прокладке c окружающей пластины конденсатора M и N. Капля наблюдалась через третье око-

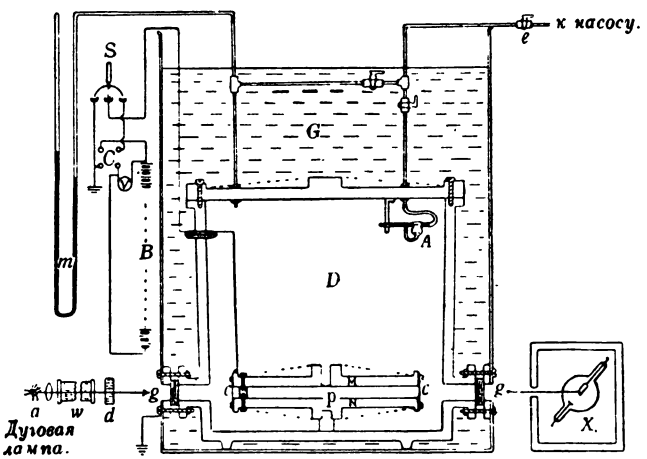

Рис. 7.

шечко, лежащее в одной горизонтальной плоскости с прямой Xpa и отстоящее на 28^0 от этой прямой. Наблюдение производилось при помощи короткофокусного телескопа со шкалой в окуляре, которая была помещена там, чтобы сделать возможным точное измерение скорости капли-звездочки.

Нанося на бумагу результаты наблюдений, я пользовался вместо l обратной величиной давления $\frac{1}{p}$; делал я это потому, что l представляет теоретическую величину, которая необходимо должна быть пропорциональна $\frac{1}{p}$, тогда как фактически измеряется p. Это сводится к тому, что мы пишем поправочный член в формуле Стокса

в виде $1 + \frac{b}{pa}$, вместо того, чтобы его писать в виде $1 + A\frac{l}{a}$; теперь неизвестной и подлежащей определению постоянной является уже не A, как раньше, а b; эта величина определяется делением углового коэффициента прямой на ординату пересечения с осью игреков.

Тем не менее, в целях достижения большей наглядности, в таблице X приведены все значения величины $\frac{l}{a}$, соответствующие последовательным значениям $\frac{1}{pa}$. На рис. 5 изображена кривая, показывающая зависимость $e_1^{\frac{2}{3}}$ от $\frac{1}{pa}$ для первых 51 капель таблицы X, а на рис. 6 эта кривая продолжена для вдвое больших значений $\frac{1}{pa}$ и $e_1^{\frac{2}{3}}$. Мы видим, что здесь нет ни малейшего указания на отступление от линейной зависимости между $e_1^{\frac{2}{3}}$ и $\frac{1}{pa}$ вплоть до значения $\frac{1}{pa} = 620{,}2$, которое соответствует значению $\frac{l}{a} = 0{,}4439$ (см. каплю № 58 таблицы X). Масштаб на рис. 5 таков, что отклонение на одно деление вверх или вниз от прямой соответствует в среднем относительной ошибке в $\frac{2}{700}$. Рисунки 5 и 6 показывают, что только для одной капли из всех 58 отклонение от прямой достигло 0,5%. Необходимо при этом иметь в виду, что здесь показана не избранная группа капель, а все капли подряд, которые только были наблюдены в продолжение 60 дней, при чем за это время весь аппарат несколько раз разбирался и собирался вновь. Поэтому представляется несомненным, что уравнение вида (15) действительно остается справедливым вплоть до $\frac{l}{a} = 0{,}4$. Последняя капля на рис. 6 как будто указывает начало отклонения от этой линейной зависимости. Но в виду того, что это отклонение не имеет отношения к определению e, мы здесь его рассматривать не будем, хотя оно и представляет большой интерес для молекулярной теории.

В главе IV был поставлен попрос о возможной зависимости сопротивления, оказываемого капле средой, от заряда капли, а также

о возможном изменении плотности капли в зависимости от радиуса. Отметим здесь, что рисунки 5 и 6 дают полные ответы на эти вопросы. Рассмотрим, например, капли № 27 и № 28. Значения величины $\frac{1}{pa}$ для них почти одинаковы; но тогда как капля № 28 несла одно время только один заряд (см. таблицу X), капля № 27 была заряжена в 29 раз сильнее, а диаметр ее приблизительно в 7 раз больше.

Допустим теперь, что малая капля плотнее большой, или что сопротивление среды более сильно заряженной капле больше, чем сопротивление капле, заряженной слабее. Если бы эти причины действительно существовали, то обе они оказывали бы на каплю № 27 более сильное влияние, чем на каплю № 28, так что замедление капли № 27 сравнительно с нормальным ее движением было бы больше такого же замедления для капли № 28. Поэтому для № 27 e_1 получилось бы меньше, чем для № 28. Оказалось однако, что оба значения e_1 получились настолько близкими, что их невозможно обозначить в принятом нами масштабе двумя раздельными точками; отсюда следует, что предположенной зависимости не существует. Капли № 52 и № 56 дают этому заключению еще более разительное подтверждение. Для обеих капель отношение $\frac{l}{a}$ приблизительно одинаково, и обе лежат почти в точности на прямой; между тем, капля № 56 несла одно время в 68 раз больший заряд, чем капля № 52, и радиус ее был втрое больше радиуса последней. Вообще, из рис. 5 и 6 нельзя усмотреть никакой тенденции очень малых или очень больших капель отклоняться в ту или другую сторону от прямой. Этот факт служит экспериментальным доказательством справедливости допущения постоянства плотности капель и независимости сопротивления среды от их заряда.

Значения $e^{\frac{2}{3}}$ и b, полученные графическим путем из рисунка 5, равны: $e^{\frac{2}{3}} = 61{,}13 \times 10^{-8}$ и $b = 0{,}000625$, при чем p измерялось в данном случае в сантиметрах ртутного столба при 23^0 Ц., a в сантиметрах. Значение величины A уравнений (15) и (16) (стр 77), соответствующее этому значению b, равно $A = 0{,}874$.

Но можно достигнуть большей точности, если, вместо такого графического определения e, выражать каждый раз e_1 через e и взять затем среднее.

Напомним, что связь между e_1 и e дается формулой

$$e^{\frac{2}{3}}\left(1+\frac{b}{pa}\right)=e_1^{\frac{2}{3}},$$

где величина b нам теперь известна. Числа, полученные таким путем для e, приведены в последнем столбце таблицы X; они дают весьма наглядное представление о хорошем взаимном согласии этих наблюдений. Наибольшее отклонение чисел таблицы от среднего достигает всего лишь 0,5%, и вычисленная по обычному способу вероятная ошибка окончательного среднего равна $\frac{16}{61\,000}$ долям измеряемой величины.

С целью получить наиболее достоверное значение e, нам представлялось предпочтительным поступать следующим образом. Мы произвели большое число наблюдений при атмосферном давлении над каплями, достаточно малыми, чтобы можно было определять время t_g с большой точностью, и вместе с тем достаточно большими, чтобы весь поправочный член к закону Стокса достигал лишь немногих процентов. В самом деле, в таком случае даже довольно значительная ошибка в определении постоянной b, входящей в поправочный член, мало повлияла бы на окончательное значение e. Первые 23 капли таблицы X представляют такого рода наблюдения. Мы видим, что они согласуются между собой несколько лучше, чем остальные числа таблицы; для этих капель изменения, вносимые поправочным членом, лежат между 1,3% (капля № 1) и 5,6% (капля № 23). Поэтому, даже в том случае, если бы ошибка в b достигала 3% (фактически она не превышает 1,5%), то и тогда неточность в определении e была бы всего лишь 0,1%. Среднее значение $e_1^{\frac{2}{3}}$, полученное из первых 23 капель, равно $61{,}12\times10^{-8}$, число, отличающееся от среднего из всех капель на $\frac{1}{3400}$ долю.

Если принять во внимание, что числа таблицы X были получены в предположении $\eta=0{,}000\,1825$ (значение η_{28}, принятое в 1913 году, когда эта работа была впервые опубликована) вместо $\eta=0{,}000\,1824$ (см. отдел II этой главы), то окончательное среднее значение $e_1^{\frac{2}{3}}$, получаемое из первых 23 капель, будет $61{,}085\times10^{-8}$. Этому соответствует

$$e=4{,}774\times10^{-10}\text{ эл. ст. ед.}$$

Я уже указывал, что когда известно e, можно вычислить с тою же точностью: 1) число молекул в данном весовом количестве любого вещества, 2) абсолютный вес любого атома или молекулы, 3) среднюю кинетическую энергию беспорядочного движения атома или молекулы при любой температуре и еще целый ряд важных молекулярных и радиоактивных постоянных. Кроме того, недавно было найдено, что наиболее точные методы определения постоянных теории излучения, а также длин волн рентгеновых лучей, основаны на знании величины e. Важнейшие из этих постоянных суть: постоянная Планка h, постоянная Стефана-Больцмана σ и постоянная Вина c_2. Таким образом по общему признанию величина e не только является наиболее важной из всех химических и физических постоянных, но и играет огромную роль при численном решении задач современной физики. Поэтому представлялось желательным увеличить до пределов возможного точность разработанного здесь метода для определения этой величины. С этой целью я построил два года назад новый конденсатор, поверхности которого были отполированы оптическим способом, так что отклонение их от плоскости не превышало двух длин волн натриевого света. Диаметр этих пластин был равен 22 *см*; они отделялись друг от друга тремя пластинками, взятыми из ступенчатого спектроскопа, толщиною в 14,9174 *мм*, которые также были отшлифованы плоско-параллельно оптическим способом. Поэтому неправильность в размерах конденсатора не могла ввести ошибку, превышающую $\frac{1}{10\,000}$ долю. Напряжение в вольтах измерялось после каждого отсчета при помощи нормального элемента Вестона; неточность не превосходила здесь $\frac{1}{3000}$ доли. Время отсчитывалось по самопищущему хронографу исключительной точности, построенному фирмой Вильям Гертнер и К°. Хронограф контролировался нормальными астрономическими часами и прямо отпечатывал время в сотых долях секунды. Все другие условия поставленной проблемы регулировались с тщательностью, которая была результатом пятилетнего опыта с измерениями этого рода. Настоящий вид аппарата показан схематически на рис. 8, а рис. 9 представляет фотографию, снятую до того, как прибор был покрыт газолиновой ванной. Работа была закончена в августе 1916 г.; она продолжалась в течение двух лет. Окончательная таблица результатов и соответствующий график приведены в таблице XI и на

рис. 10. Мы видим, что окончательное значение $e^{\frac{2}{3}}$, вычисленное в предположении $\eta_{23} = 0{,}0001824$, равно теперь $61{,}126 \times 10^{-8}$ вместо $61{,}085 \times 10^{-8}$, т. е. на $0{,}07\%$ больше числа, полученного в 1913 году. Но полученное д-ром Гаррингтоном новое значение $\eta_{23} = 0{,}00018226$ заслуживает бо́льшего доверия, чем старое значение; оно меньше старого на $0{,}07\%$. Так как η входит в выражение для $e^{\frac{2}{3}}$ в первой степени, то получается следующий интерес-

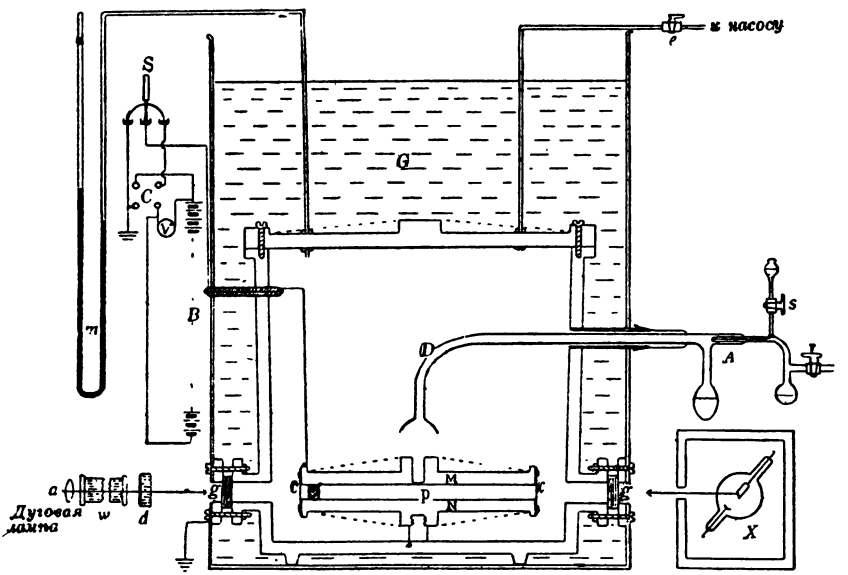

Рис. 8.

A — распылитель, вдувающий масло в цилиндр D; G — масляная ванна, служащая для поддержания постоянства температуры в D; M и N — медные пластины воздушного конденсатора; p — маленькое отверстие в верхней пластинке M, через которое проходят капли масла; B — батарея в 10000 вольт; a — дуговая лампа; w и d — сосуды с жидкостями, поглощающими тепловые лучи; X — рентгенова трубка.

ный результат. Новое значение[1]) e, полученное при помощи нового аппарата, при чем все факторы были определены заново, совпадает с точностью до четырех знаков с числом, найденным в 1913 г., именно

$$e = 4{,}774 \times 10^{-10} \text{ абс. эл. ст. ед.}$$

Соответственные значения b и A будут теперь 0,000617 и 0,863.

[1]) За подробностями отсылаем к Millikan. „Phil. Mag.“, июнь 1917.

Величина постоянной Фарадея условно установлена международным соглашением [1]); она равна 9650 абсолютным электромагнитным единицам. Так как это число равно числу молекул N в одной граммолекуле, умноженному на элементарный электрический заряд, то мы имеем

$$N \times 4{,}774 \times 10^{-16} = 9650 \times 2{,}9990 \times 10^{10},$$
$$N = 6{,}062 \times 10^{23}.$$

Если вычислить на основании таблицы XI вероятную ошибку этого числа по способу наименьших квадратов, то она получится равной

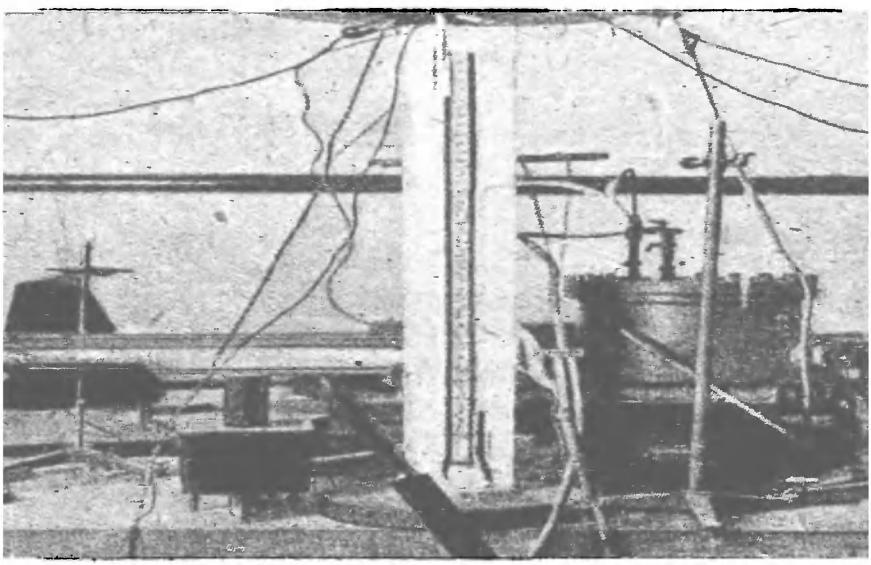

Рис. 9.

$\frac{1}{4000}$ доле. Однако, было бы ошибочно заключить, что e и N известны ныне с этой степенью точности. В самом деле, все числа таблицы XI множатся на четыре постоянных множителя, при чем вводятся следующие погрешности. Во первых, коэффициент внутренняго трения η, которой входит в степени $\frac{3}{2}$, вводит в числа e и N погрешность, во всяком случае не превышающую 0,1%; мы при-

[1]) Атомный вес серебра = 107,88; электрохимический эквивалент серебра = 0.01118

мем ее равной 0,07%. Далее, расстояние между перекрестиями известно с точностью до $\frac{1}{2000}$; оно входит в степени $\frac{3}{2}$ и вводит погреш-

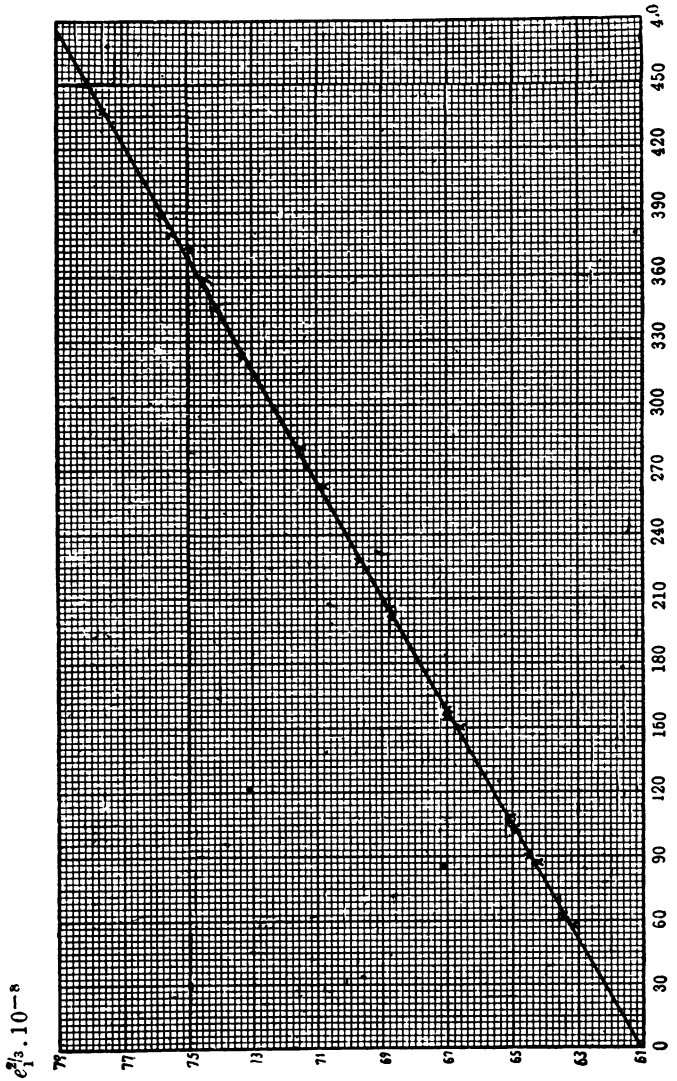

Рис. 10.

По оси абсцисс отложены значения $\frac{1}{p.a}$.

ность, не превышающую 0,07%. Все другие множители, как например напряжение в вольтах и расстояние между пластинами конденсатора, вводят ошибки, которыми в сравнении с предыдущими можно пренебречь. Таким образом погрешность в числах e и N обуслов-

лена двумя множителями, при чем максимальная погрешность каждого множителя равна 0,07%. Следуя обычному методу, мы можем считать, что погрешность e и N равна корню квадратному из суммы квадратов этих двух погрешностей, т. е. что она равна около одной тысячной доли. Мы имеем, следовательно,

$$e = (4{,}774 \pm 0{,}005) \times 10^{-10},$$
$$N = (6{,}062 \pm 0{,}006) \times 10^{23}.$$

Быть может, эти числа будут непонятны читателю — неспециалисту, незнакомому ни с какими единицами электричества, кроме тех, в которых ему подаются ежемесячные счета за электрическое освещение. Если эти счета кажутся ему чрезмерными, то он, может быть, утешится, если мы ему дадим представление о числе электронов, содержащихся в том количестве электричества, которое проходит ежесекундно сквозь нить обыкновенной 16-ти свечной электрической лампочки и за которое мы платим $\frac{1}{100000}$ цента[1]). Число это настолько велико, что если бы все два с половиной миллиона жителей Чикаго принялись считать эти электроны и успевали бы сосчитывать по 2 электрона в секунду, не останавливаясь, чтобы поесть, поспать или умереть, то им потребовалось бы для окончания подсчета ровно двадцать тысяч лет.

Припомним теперь, имея перед собой рисунки 5 и 10, наиболее существенные этапы при измерении e. Прежде всего мы обнаруживаем, что электричество обладает атомным строением, и выражаем заряд электрона через скорость, характерную для каждой капли. Чтобы перейти от этих единиц скорости к электрическим единицам и получить абсолютную величину e, необходимо знать связь между размерами капли и скоростью ее движения, обусловленною данным зарядом, в поле данной силы и в данной среде. Для того случая, когда пустоты в среде сравнительно с радиусом капли, т. е. величина $\frac{l}{a}$, весьма мала, эта связь известна с достаточной точностью из теории Стокса и из опытов Арнольда. Когда же $\frac{l}{a}$ велико, эта связь остается нам неизвестной. Остается, следовательно, один только

---

[1]) 1 цент = 2 коп. золотом. В России тариф на электричество значительно дороже, и это количество обходится в $\frac{1}{10\,000}$ коп. зол. *Прим. перев*

Таблица XI.

№	Температура °Ц.	Разность потенциалов (в *вольтах*)	t_g (в *сек*)	v_1 *см/сек*	n	$a \times 10^5$ *см*	p (*см* ртути)	$\frac{1}{pa}$	$\frac{l}{a}$	$e_1^{\frac{2}{3}} \times 10^8$	$e^{\frac{2}{3}} \times 10^8$
1	23,07	6650	16,50	0,061 94	7-13	23,40	74,49	57,45	0,041 11	63,21	61,03
2	23,00	6100	16,76	0,060 99	8-11	23,22	75,00	57,5	0,041 15	63,204	61,03
3	23,05	5308	19,73	0,051 80	7-15	21,34	74,49	63,0	0,045 09	63,54	61,16
4	23,08	4132	37,82	0,027 03	4-6	15,33	75,37	86,7	0,062 05	64,27	60,97
5	23,06	4661	40,09	0,025 21	3-6	14,84	75,00	90,6	0,064 84	64,63	61,21
6	23,12	4111	51,53	0,019 83	3-4	13,05	75,77	101,3	0,065 02	65,02	61,19
7	23,08	5299	51,48	0,019 85	2-5	13,05	74,98	102,4	0,073 29	65,07	61,20
8	23,01	6661	56,06	0,018 23	2-3	12,50	75,40	106,3	0,076 08	65,13	61,11
9	23,00	6082	59,14	0,017 28	1-4	12,17	75,04	109,7	0,078 50	65,19	61,05
10	23,10	4077	57,46	0,017 79	3-8	12,34	75,67	107,3	0,076 80	65,21	61,16
11	23,13	4663	16,58	0,061 65	10-12	22,72	29,26	150,6	0,107 8	66,70	61,01
12	23,11	4661	29,18	0,035 02	5-7	17,08	36,61	160,1	0,114 6	67,12	61,07
13	22,98	4687	18,81	0,054 32	8-10	21,26	30,27	155,6	0,111 4	67,14	61,26
14	23,12	4651	47,65	0,021 45	2-7	13,20	36,80	206,4	0,147 7	68,90	61,11
15	23,10	4648	32,72	0,031 29	4-6	15,92	31,35	200,7	0,143 7	68,97	61,39
16	23,15	3393	18,34	0,055 72	12-16	21,11	20,58	227,8	0,163 0	69,88	61,27
17	23,12	4669	46,82	0,022 94	2-4	13,12	29,10	262,4	0,187 8	70,85	60,94
18	23,12	4691	26,62	0,038 19	5-7	17,32	20,54	281,4	0,201 4	71,60	60,98
19	23,10	3339	14,10	0,072 49	15-19	23,00	13,24	321,4	0,229 7	73,34	61,20
20	23,14	4682	39,24	0,026 05	3-5	14,00	20,72	345,4	0,247 2	74,27	61,22
21	23,14	3550	18,30	0,055 85	10-13	20,47	13,62	359,1	0,257 0	74,54	60,97
22	23,00	3370	43,88	0,023 29	3-6	13,17	20,47	371,5	0,265 9	75,00	60,97
23	23,13	3381	46,90	0,021 79	3-6	12,69	20,74	380,6	0,272 4	75,62	61,24
24	23,09	3345	19,65	0,052 01	9-12	19,65	13,12	388,5	0,278 1	75,92	61,24
25	23,15	3344	26,76	0,038 19	6-9	16,57	13,80	438,3	0,313 7	77,74	61,18

Среднее чисел последнего столбца = 61,126.

возможный способ определения e, и он заключается в следующем. Нужно найти из опыта, как изменяется кажущаяся величина e, т. е. e_1, в зависимости от $\frac{l}{a}$ или от $\frac{1}{pa}$, и из графика, дающего эту связь, нужно определить, к какому значению приближается e_1 с приближением $\frac{l}{a}$ или $\frac{1}{pa}$ к нулю. Анализ показывает, что если мы хотим, чтобы зависимость от $\frac{l}{a}$ или от $\frac{1}{pa}$ была линейной, мы должны откладывать не e_1, а $e_1^{\frac{2}{3}}$. Мы вычислим тогда e, найдя на нашей диаграмме ординату пересечения определенной из опыта прямой с осью y. Это равносильно тому, что мы приводим скорости наших капель к тем значениям, которые бы они приняли, если бы давление было настолько велико, или $\frac{1}{pa}$ настолько мало, что пустоты в среде замкнулись бы. Для этого и только для этого случая мы знаем из работ Стокса и Арнольда точный закон движения капли.

ГЛАВА ШЕСТАЯ.

МЕХАНИЗМ ИОНИЗАЦИИ ГАЗОВ РЕНТГЕНОВЫМИ ЛУЧАМИ И ЛУЧАМИ РАДИЯ.

I. Прежние опыты.

До 1908 года опыты Тоунсенда[1]), относящиеся к 1900 году, были единственными опытами, могущими служить для выяснения вопроса о том, в чем именно состоит акт ионизации газа. На основании теории, изложенной на стр. 27, и на основании своих измерений коэффициентов диффузии, а также подвижностей газовых ионов Тоунсенд заключил, что в газах как положительный, так и отрицательный ион несут единицу заряда. Это заключение было основано на том, что величина ne уравнения $ne = \frac{v_0 P}{D}$ получалась близкой к $1{,}23 \times 10^{10}$ электростатическим единицам, т. е. к числу, получающемуся при электролизе водорода.

В 1908 г. Тоунсенд[2]) придумал метод для непосредственного измерения отношения $\frac{v_0}{D}$ и подвергнул свои первоначальные заключения пересмотру. Существенные черты его метода состояли в следующем. Ионы первоначально образовывались под непосредственным действием рентгеновых лучей в пространстве между пластинами A и B (рис. 11); затем их заставляли посредством электрического поля итти сквозь сетку в пластине B. После этого наблюдалось, какая доля этих ионов уносилась установившимся между пластинами B и C полем к центральному диску D, и какая доля проникала вследствие диффузии к охранному кольцу C.

Пользуясь таким методом, Тоунсенд нашел, что для отрицательных ионов ne было в точности равно $1{,}23 \times 10^{10}$, но для по-

1) „Phil. Trans.", CXCIII (1900), 129.

2) „Proc. Roy. Soc.", LXXX (1908), 207

ложительных ионов ne оказалось равным $2{,}41 \times 10^{10}$. Отсюда он заключал, что при ионизации рентгеновыми лучами все положительные ионы оказываются бивалентными, т. е. что вероятно акт ионизации рентгеновыми лучами состоит в вырывании из нейтральной молекулы двух элементарных электрических зарядов.

Тот факт, что предыдущие опыты не обнаружили для положительных ионов столь большого значения ne, объяснялся Тоунсендом при помощи следующего предположения. Пока двукратно-заряженные положительные ионы достигали трубки, где измерялся коэффициент D, большинство из них теряло один заряд вследствие того, что они привлекали к себе однократно-заряженные отрицательные ионы, с которыми они были перемешаны. Эта гипотеза находила себе некоторое оправдание в том, что в прежних опытах среднее значение ne для положительных ионов действительно получилось процентов на 15 или 20 больше числа $1{,}23 \times 10^{10}$. Сперва эту разность приписывали ошибкам наблюдения; действительно, ее можно было бы свободно приписать им в виду разноречивости наблюдений над различными газами.

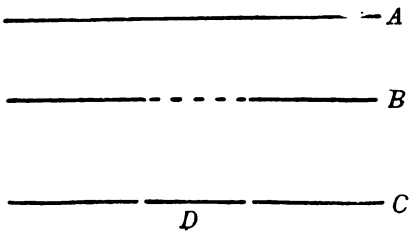

Рис. 11.

В 1909 году Франк и Вестфаль [1]) вновь определили ne, при чем они пользовались несколько видоизмененным первоначальным методом Тоунсенда и измеряли величины v_0 и D независимо одну от другой. Они разделяли положительные и отрицательные ионы посредством электрического поля так, чтобы сделать невозможным их воссоединение (рекомбинацию), наличие которого предполагалось Тоунсендом. Оказалось, во первых, что величина D получается та же, что и при отсутствии разделения, и во вторых, что величина ne для положительных ионов, производимых рентгеновыми лучами, была равна $1{,}4 \times 10^{10}$, а не $2{,}41 \times 10^{10}$. Так как это число хорошо согласовалось со значением, полученным Тоунсендом первоначально, то авторы заключили, что лишь небольшая доля — около 9% — положительных ионов, образованных рентгеновыми лучами, состоит из двойных или кратных ионов, и что, следовательно, остальные ионы являются простыми. В своих опытах

[1]) „Verh. d. deutsch. phys. Ges.", 5 марта 1909 года.

над ионизацией, производимой лучами α, β и γ, они не нашли никаких указаний на существование ионов с двумя зарядами.

Резюмируя, мы можем сказать следующее. Хотя Тоунсенд, Франк и Вестфаль заключили, что в газах, ионизованных рентгеновыми лучами, двойные ионы существуют, в их опытах было столько противоречий и неясностей, что вопрос оставался открытым. Что касается газов, ионизованных не рентгеновыми лучами, а другими ионизаторами, то здесь никто не находил никаких указаний на существование ионов, несущих больше одного заряда.

II. Опыты с каплями масла над валентностью ионов при ионизации газов.

Метод масляных капель способен дать прямой и безошибочный ответ на следующий вопрос: в чем состоит акт ионизации газа рентгеновыми лучами и другими ионизаторами? Именно, вырываются ли при этом из одной нейтральной молекулы один, два или несколько электронов? В самом деле, этот метод позволяет поймать остаток такой молекулы в тот самый момент, как она ионизовалась, и непосредственно сосчитать число зарядов на нем. Первоначальные результаты, полученные по этому методу, повидимому, благоприятствовали той точке зрения, что акт ионизации может состоять в вырывании целого ряда электронов из одной молекулы. В самом деле, неоднократно наблюдалось, что заряд уравновешенной капли масла оставался при прохождении рентгеновых лучей между пластинами в течение нескольких секунд неизменным, а затем капля внезапно получала скорость, соответствовавшую изменению ее заряда на несколько электронов сразу.

Однако, с самого начала было ясно, что очень трудно различить между почти одновременным соприкосновением с каплей двух или трех отдельных ионов и соприкосновением одного иона, но с двойным или тройным зарядом. В рассматриваемых опытах ионы захватывались довольно редко, именно, одно изменение происходило приблизительно за 10 секунд; в этом можно было усмотреть указание на малую вероятность того, что немногочисленные наблюденные в присутствии поля двойные, тройные или четверные захваты могут соответствовать одновременному соприкосновению с каплей нескольких раздельных ионов. Было, однако, очевидно, что вопрос мог быть окончательно решен исследованиями над каплями все меньших и меньших размеров. В самом деле, относительное число двойных или тройных захватов, сделанных в поле силою от 1000 до 6000 вольт

на сантиметр, не должно зависеть от размера капель, если только двойные захваты соответствуют прикосновению иона с двойным зарядом; если же, напротив, они соответствуют одновременному прикосновению нескольких раздельных ионов, то число их должно уменьшаться пропорционально квадрату радиуса капли.

В виду этого, г. Гарвей Флетчер (Harvey Fletcher) и автор[1]) произвели следующие опыты. По методу, описанному в предыдущей главе, очень малая положительно заряженная капля уравновешивалась в верхней части поля, между M и N (рис. 12); с этой целью менялся либо заряд капли, либо сила поля, пока капля не оказывалась уравновешенной. Ниже капли мы получали при помощи рентгеновых лучей ионизованный слой. Установка показана на рисунке; M и N обозначают пластины описанного ранее конденсатора, а L и L' толстые свинцовые экраны. При такой установке положительные ионы

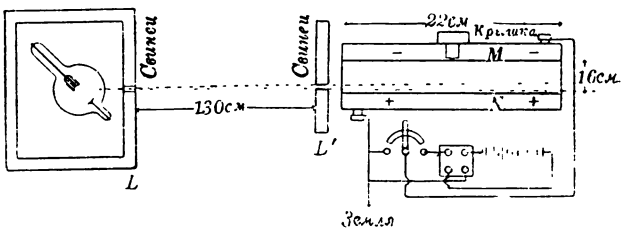

Рис. 12.

отбрасываются почти в самый момент их образования к верхней пластине. Когда один из них сталкивается с каплей, он увеличивает положительный заряд на ней, и величина добавочного заряда может быть вычислена на основании наблюденного изменения скорости капли.

Для удобства измерения скоростей в окуляре телескопа на катетометре была помещена шкала с 70 равными делениями. Линейное увеличение телескопа было в этом случае 15-тикратное. Метод измерения заключался в следующем. Во первых, нужно было уравновесить каплю, стряхнув ее первоначальный заряд; для этого к камере, где наблюдалась капля, приближалось немного радия. Во вторых, нужно было включить посредством переключателя рентгеновы лучи, пока внезапное изменение скорости капли не обнаружит факт захвата иона. В третьих, нужно было выключить лучи и отмечать время, необходимое для прохождения каплею десяти делений. Затем—вклю-

[1]) „Phil. Mag.", XXIII (1911), 753.

чить лучи снова до нового увеличения скорости, затем опять измерить эту скорость, и действовать так, не выключая поля совсем, пока капля не станет слишком близкой к верхней пластине. После этого лучи выключаются, и капле предоставляется свободно упасть на желаемое расстояние от верхней пластины. Чтобы удалить избыток положительного заряда, полученного каплей вследствие ее частых захватов, к камере приближалось немного радия, и поле выключалось на небольшую долю секунды. Как было объяснено в предыдущих главах, ионы захватываются во много раз быстрее в отсутствии поля, чем в присутствии его. Поэтому, вообще говоря, было нетрудно вернуть положительно заряженную каплю к ее уравновешенному состоянию или же к какой-нибудь из небольшого числа скоростей, которыми капля может обладать, и затем возобновить описанный выше ряд захватов ионов. Таким путем мы держали каплю под наблюдением в продолжение нескольких часов, и в одном случае мы отметили 100 последовательных захватов ионов данной каплей и определили в каждом случае, несет ли заряженный ион простой или кратный заряд.

Процедура этого определения чрезвычайно проста и весьма надежна. В самом деле, в виду того, что электричество обладает атомным строением, капля может иметь только несколько, например, три определенных скорости, соответствующих одному, двум или трем элементарным зарядам. Весьма нетрудно получить условия, в которых значения этих скоростей сильно отличались бы друг от друга, так что их можно безошибочно опознать, даже не прибегая к помощи часов. Самый факт существования немногих отличных друг от друга скоростей служит прекрасной иллюстрацией атомного строения электричества. После того, как все эти скорости размещены по порядку, достаточно следить за тем, не перескочила ли скорость при захвате нового иона через одну, чтобы узнать, был ли захваченный ион простым или двойным. Таблица XII представляет результаты опытов, произведенных с весьма жесткими рентгеновыми лучами, полученными посредством сильной тридцатисантиметровой индукционной катушки, ртутного прерывателя и Шейделевской трубки с эквивалентным искровым промежутком около 13 *см*. При этом мы не стремились к точному определению скоростей, так как большая точность измерения не была нужна для поставленной нами цели. Таблица XII хорошо иллюстрирует характер наблюдений. Продолжительность свободного падения, озаглавленная „t_g“, слегка меняется как вследствие ошибок наблюдения, так и вследствие Броуновского

Таблица XII.

Расстояние между пластинами . . . . . = 1,6 *см*
Расстояние, пройденное за время падения . = 0,0975 *см*
Напряжение . . . . . = 1015 *вольт*
Температура . . . . . = 23° Ц.
Радиус капли . . . . . = 0,000 063 *см*

t_g	t_F	Число зарядов на капле	Число зарядов на захваченном ионе	t_g	t_F	Число зарядов на капле	Число зарядов на захваченном ионе
19,0	100,0	1 +		20,0	10,0 *	1 —	
	16,0	2 +	1 +		20,0 *	0	1 +
	8,0	3 +	1 +		100,0	1 +	1 +
20,0	16,0	2 +			20,0 *	0	1 —
	8,0	3 +	1 +		100,0	1 +	1 +
	100,0	1 +			16,0	2 +	1 +
	17,0	2 +	1 +		8,0	3 +	1 +
	8,2	3 +	1 +		104,0	1 +	
	6,0	4 +	1 +		15,0	2 +	1 +
	7,0 *	2 —			9,0	3 +	1 +
	9,8 *	1 —	1 +		6,0	4 +	1 +
	7,0 *	2 —	1 —		6,5 *	2 —	
21,0	20,0 *	0			10,0 *	1 —	1 +
	95,0	1 +	1 +		20,0 *	0	1 +
	16,5	2 +	1 +		100,0	1 +	1 +
	8,0	3 +	1 +		15,5	2 +	1 +
	6,0	4 +	1 +		8,0	3 +	1 +
	100,0	1 +			6,0	4 +	1 +
	16,0	2 +	1 +		100,0	1 +	
	8,4	3 +	1 +		16,5	2 +	1 +
20,0	106,0	1 +			20,0 *	0	
	16,0	2 +	1 +		100,0	1 +	1 +
	8,4	3 +	1 +		16, 6	2 +	1 +
	10,0 *	1 —			8,8	3 +	1 +
	20,0 *	0	1 +		5,7	4 +	1 +
	100,0	1 +	1 +		100,0	1 +	
	16,0	2 +	1 +		20,0 *	0	1 —
	100,0	1 +			10,0 *	1 —	1 —
	16,0	2 +	1 +		20,0 *	0	1 +
	8,0	3 +	1 +				

44 захвата, все одиночные

движения. В столбце, озаглавленном „ t_F “, приведены различные наблюденные значения продолжительности подъема на 10 делений шкалы окуляра. Звездочка (*), поставленная рядом с числом этого столбца, означает, что капля двигалась вниз, а не вверх. Обыкновенно мы начинали с капли либо совсем нейтральной (так что она падала с одинаковой скоростью как в присутствии поля, так и без него), либо имевшей только один положительный заряд; затем ей сообщались положительные заряды, пока ее скорость не достигала значения, соответствующего 6 секундам. После этого капля опять нейтрализовалась при помощи радия и всё начиналось снова.

Из таблицы XII видно, что в 4 случаях из 44 был захвачен отрицательный заряд, хотя установка, изображенная на рис. 12, показывает, что капля, казалось бы, могла захватывать только положительные заряды. Эти отрицательные заряды несомненно обусловлены вторичными лучами, которые излучаются во всех направлениях молекулами воздуха, освещаемыми первичными рентгеновыми лучами.

В конце таблицы XII находится интересный ряд наблюдений. В начале этого ряда капля была заряжена двумя отрицательными зарядами, которые придавали ей в направлении силы тяжести скорость в 6,5 *см/сек*. До выключения поля она захватила последовательно шесть одиночных положительных зарядов. Соответствующие продолжительности были 6,5*; 10*; 20*; 100; 15,5; 8,0; 6,0. Чтобы произвести захват, рентгеновы лучи должны были в этих опытах действовать в среднем в течение 6 секунд, хотя в некоторых случаях требовалось около минуты. Бóльшая часть времен, приведенных в столбце t_F, действительно измерялась арретирными часами, как было указано; но так как нельзя было ошибиться в 100-секундной скорости, то она измерялась только 4 или 5 раз. Таблица XII показывает, что среди 44 захватов ионов, произведенных жесткими рентгеновыми лучами, нет ни одного двойного захвата. Приступая к исследованию, мы имели в виду доказать существование валентности в газовой ионизации; в результате наблюдения от 500 до 1000 захватов, произведенных так, как показано в таблице XII, мы пришли вместо этого к противоположному заключению. Мы получили прямое и безошибочное доказательство того, что акт ионизации молекул воздуха первичными и вторичными рентгеновыми лучами самой разнообразной жесткости, а также лучами β и γ, всегда и при всех условиях, какие только мы могли

осуществить, состоит в вырывании из нейтральной молекулы одного и *только одного* элементарного электрического заряда.

III. Новые данные, относящиеся к характеру ионизации, производимой волнами эфира.

Хотя Тоунсенд, а также Франк и Вестфаль не присоединились к предыдущему заключению, все данные, полученные после того, повидимому подтверждают его. Так, Салль (Salles) [1]), пользуясь новым методом, предложенным Ланжевеном (Langevin) для непосредственного измерения отношения $\left(\frac{v_0}{D}\right)$ подвижности к коэффициенту диффузии, пришел к заключению, что когда ионизация производится лучами γ, то не бывает ионов с кратными зарядами. С другой стороны, Ч. Вильсоном (C. T. R. Wilson) были получены в лаборатории Кэвендиша весьма замечательные фотографии (см. рис. 18, 19, 20 и т. д.) следов, оставляемых рентгеновыми лучами при прохождении сквозь газы; эти фотографии не дают никаких указаний на преобладание отрицательно заряженных капель над положительными. Между тем, если бы акт ионизации состоял в вырывании двух или нескольких электронов из нейтральной молекулы, то такое преобладание должно было бы наблюдаться. Далее, если бы первоначальный акт ионизации рентгеновыми лучами состоял в вырывании двух или нескольких корпускул (электронов) из одного атома, то в фотографиях Вильсона должны были бы встречаться разветвления, состоящие из группы зигзагообразных линий, исходящих из общей точки. Взгляд на фотографии показывает, что такого явления не наблюдается, и что каждая зигзагообразная линия исходит из своей особой точки.

Существуют два других типа опытов, которые могут пролить свет на этот вопрос.

Если в опытах над капельками дать рентгеновым лучам падать непосредственно на каплю, то, как мы видели, они вырывают из нее отрицательные электроны. Если давление газа настолько низко, что вероятность захвата иона каплей очень мала, то практически все изменения заряда капли обусловлены именно этой причиной. Насколько мне удалось заметить, при этих условиях изменения заряда всегда единичны; впрочем, я пока не производил систематического

1) „Le Radium“. X (1913). 113. 119

и исчерпывающего изучения этого вопроса. Что касается изменений, производимых падением на каплю ультрафиолетового света, то, поскольку дело идет об опытах, произведенных в лаборатории Райерсона, эти изменения обыкновенно, хотя и не всегда, соответствуют потере только одного электрона. То же можно сказать относительно опытов А. Иоффе[1]), который тщательно изучал этот вопрос. Мейер и Герлях (Meyer u. Gerlach)[2]) наблюдали, однако, довольно часто изменения, соответствующие, повидимому, одновременной потере нескольких электронов.

Необходимо, однако, отметить, что их капли заряжены обыкновенно весьма сильно и несут от 10 до 30 электронов. При таких условиях потеря одного только электрона производит весьма малое изменение скорости; весьма вероятно, что этого изменения не удавалось, да и невозможно было заметить, пока оно не становилось более резко выраженным вследствие потери нескольких электронов. Поэтому, чтобы получить здесь надежные результаты необходимо при изучении этого вопроса работать с электрическим полем, достаточно сильным, чтобы уравновесить каплю только одним или двумя свободными электронами. Я не усматриваю поэтому в опытах Мейера и Герляха никаких указаний на то, чтобы при акте ионизации ультрафиолетовым светом из каждого атома вырывалось более одного электрона. Впрочем, и сами авторы не утверждают этого. Опытный материал, накопляющийся в Райерсоновской лаборатории, хотя еще и не достаточно полный, дает другой ответ на этот вопрос.

Таблица XIII содержит ряд наблюдений, произведенных с моим аппаратом г. Пирсоном (P. J. Pierson). В первом столбце указаны вольты, приложенные к пластинам конденсатора, изображенного на рис. 7 стр. 86. Напряжение было переменным, так что всегда можно было заставить каплю медленно подниматься, даже когда ее положительный заряд непрерывно увеличивался. Во втором и третьем столбцах указано время, затраченное на прохождение одного сантиметра при свободном падении и при действии поля. В четвертом столбце указаны промежутки времени от одной перемены заряда до другой; перемены заряда происходили под влиянием постоянного источника ультрафиолетового света—кварцевой ртутной

[1]) „Sitzungsber d k Bayerischen Akad. d. Wiss“ (1913), p. 19.
[2]) „Ann. d Phys“. XLV, (1914), 177; XLVII (1915), 227.

Таблица XIII.

Капля ртути радиуса $a = 8 \times 10^{-5}$ *см*, принимающая элементарные заряды под действием ультрафиолетового света.

Вольты	t_g в *сек* на *см*	t_F в *сек* на *см*	Промежуток времени между изменениями заряда, в секундах	$e_n \times 10^{10}$	Изменение в e	Изменение в n
			Капля № 1			
2260	11,0	1200		49,4		
3070	11,0	+ 32,8	11	50,5	4,4	1
1960	11,0	194	12,8	54,4	6,4	1
1960		+ 190	23	60,8	4,2	1
1820	11,2	+ 220	40	65,0	4,8	1
1690		+ 230	15,2	69,8	5,3	1
1550		+ 332		75,1		
			Капля № 2			
3040	10,4	+ 98	5,6	43,5	5,9	1
2540		+ 200	18,6	49,4	5,8	1
2230		+ 300	35,0	55,2	5,5	1
2230		+ 76	42	60,7	4,3	1
1930		+ 200	54	65,0	4,6	1
1810		176	70	69,6	5,6	1
1650		+ 250	45	75,2	4,2	1
1520		+ 500	98	79,4	5,5	1
1520		+ 119		85,1		
		Среднее	29		5,1	

дуги. В пятом столбце указан полный заряд капли, вычисленный из уравнения (12) стр. 70. В шестом столбце указаны изменения заряда, вычисленные на основании уравнения (10) стр. 54. Эти изменения можно считать постоянными, если принять во внимание Броуновское движение и неточность измерения вольтов и секунд. Среднее значение e_1 равно, как видим, $5{,}1 \times 10^{-10}$. Если воспользоваться уравнением (16) стр. 77 и вставить значение A, найденное для капель масла, получим число $e = 4{,}77 \times 10^{-10}$, которое находится в наилучшем согласии с результатами, найденными из опытов с каплями масла. В рассматриваемых опытах свет был слабый, так что изменения происходили в среднем через каждые 29 секунд; мы видим, что все они представляют *простые* (не кратные) изменения. При бо́льшей интенсивности света мы иногда получали двойные, а в одном случае даже тройное изменение. Но так как такие изменения регулярно получаются тем реже (т. е. процент кратных изменений тем меньше), чем меньше заряд и чем больше промежуток времени между захватами ионов, то отсюда неизбежно следующее заключение. В тех случаях, когда кратные изменения повторяются часто, как это было в работе Мейера и Герляха, происходит это потому, что некоторые из изменений скорости ускользают от внимания наблюдателя.

Итак, рассматривая ионизацию нейтральных атомов, происходящую вследствие поглощения волн эфира (какого угодно рода), мы можем сказать следующее. Акт ионизации всегда состоит в вырывании из атома одного и только одного отрицательного электрона; как мы увидим в главе X, энергия, с которой электрон вырывается из атома, зависит весьма простым и определенным образом от частоты выбрасывающей его волны эфира.

IV. Ионизация лучами β.

Когда ионизация происходит вследствие прохождения через материю лучей β, то результаты опытов с каплями масла, а также опытов Ч. Вильсона (C. T. R. Wilson) (см. гл. IX), фотографировавшего траектории лучей β, показывают, что и в этом случае акт ионизации состоит в вырывании только одного электрона из одного атома. В данном случае для лучей β этот результат вполне понятен. В самом деле, фотографии Вильсона непосредственно доказывают факт, давно известный из других опытов, а именно, что луч β, вообще говоря, ионизует весьма малую долю из числа тех атомов, сквозь которые он проходит прежде, чем исчерпается его энер-

гия. Положим, что луч β пролетает через атом или достаточно близко к одному из электронов этого атома. Если вероятность вырвать этот электрон равна одной тысячной или одной миллионной, то вероятность пройти настолько близко к двум электронам одного и того же атома, чтобы быть в состоянии вырвать оба, будет уже ничтожно мала. Эти рассуждения основываются, однако, на предположении, что корпускулы (электроны) внутри атомов не связаны друг с другом; предположение же это не является необходимым. Поэтому вопрос может быть, в конце концов, решен только опытом.

Различие между актом ионизации лучом β и волной эфира сводится, повидимому, целиком к различию в энергии, с которой оба эти агента вырывают электрон из материнского атома. Фотографии Вильсона показывают, что лучи β не выбрасывают из атомов электронов с заметными скоростями, тогда как волны эфира могут выбрасывать их с колоссальной энергией. Некоторые, весьма интересные, фотографии Вильсона, показывающие эффект прохождения рентгеновских лучей сквозь воздух, воспроизведены на рис. 18, 19 и 20.

Первоначальный пучек рентгеновых лучей выбросил с большой скоростью электроны из небольшого числа атомов газа. Изображенные на фотографии причудливые линии представляют траектории этих электронов, когда они пролетают через атомы газа, ионизуя их на пути. Таким образом бо̀льшая часть ионизации, производимой рентгеновыми лучами, представляет вторичный эффект, который обусловлен отрицательными электронами, т. е. лучами β, выбрасываемыми рентгеновыми лучами. Если бы эти лучи β могли в свою очередь выбрасывать электроны со скоростями, достаточными, чтобы произвести ионизацию, то каждое из пятен на траекториях этих лучей β послужило бы началом новой ветвистой линии, подобной первоначальной; но на деле так не происходит. Мы можем представлять себе, что лучи β просто вытряхивают электронную пыль из некоторых атомов, через которые они проходят, тогда как рентгеновы лучи каким-то образом наталкиваются на отрицательные электроны внутри атома и выбрасывают их с колоссальной энергией.

V. Ионизация лучами α.

Но что же происходит с входящими в состав атома электронами, когда мимо них пролетает частица α, т. е. атом гелия? Некоторые опыты Брэгга (Bragg) и фотографии Вильсона показы-

вают, что частицы α прежде, чем остановиться, пронизывают по прямой линии от 3 до 7 *см* воздуха. Мы должны поэтому заключить, что атом построен с такими большими пустотами, что другой атом при достаточной скорости может его пронизать по прямой не разрушая, а только вырвав из него иногда один или два электрона. Линии, показанные на рис. 14 и 15 представляют снятые Вильсоном фотографии траекторий частиц α, испускаемых радием. Эти частицы ионизуют на своем пути такое большое число атомов, что отдельные капельки воды, которые образуются вокруг ионов, появляющихся на пути луча, и которые собственно и представляют объекты, изображаемые на фотографии,—эти капельки сливаются друг с другом так, что их нельзя различить каждую в отдельности. Внезапное изменение направления луча в конце траектории представляет убедительное доказательство того, что частица α действительно пронизывает атом, а не отталкивает его в сторону, как отталкивает пуля. Представим себе, что одна солнечная система пролетает с колоссальной скоростью свозь другую, подобную, систему, но так, чтобы их центральные тела не столкнулись. В таком случае отклонение от прямой линии, претерпеваемое первой системой, может быть ничтожно малым, если только скорость ее достаточно велика. Происходит это по той простой причине, что обе системы будут находиться одна вблизи другой недостаточно продолжительное время, чтобы могло произойти отклонение. Выражаясь специальными терминами, интеграл по времени от силы будет ничтожно мал. Чем меньше, однако, будет скорость, тем больше будет это время и тем больше, следовательно, и отклонение. Ядра атомов, сквозь которые проходит частица α, могут оказаться в состоянии отклонить ее от прямого пути только тогда, когда она уже потеряла бо̀льшую часть своей скорости, т. е. к концу пути. Если бы она отталкивала молекулы в сторону, как это делает пуля, а не пронизывала их насквозь, то сопротивление ее движению было бы наибольшим при наибольшей скорости. Между тем, в действительности происходит как раз наоборот. Частица α ионизует в несколько раз сильнее в конце своего пути, чем в начале, а значит, она теряет энергию при медленном движении скорее, чем при быстром. Кроме того, как показывает фотография, при медленном движении она легче отклоняется. Все это так и должно быть, если частица α пронизывает молекулы, а не отталкивает их в сторону.

Фотографии Вильсона представляют поэтому самое убедительное доказательство того, что атом является чем-то подобным

звездной системе в миниатюре. При этом несомненно, что тела, составляющие атом, так же малы по сравнению с полным его объемом, как малы солнце, планеты и другие тела солнечной системы по сравнению с объемом, занимаемым ею. Когда две молекулы газа движутся так же медленно, как и при обыкновенном тепловом беспорядочном движении, т. е. со скоростью около одной мили в секунду, то, если их центры сблизятся на известное расстояние — около 0,2 $\mu\mu$ (миллионных долей миллиметра), они оттолкнутся, и обе системы не проникнут одна в другую. Так будет обстоять дело при обыкновенном столкновении молекул. Но если сообщить одной из них достаточно большую скорость, то она пронижет другую, вырывая при этом иной раз отдельный электрон. Так будет в случае частицы α, летящей через воздух.

Но вопрос, на который мы попытаемся здесь найти ответ, состоит, собственно, в следующем. Вырывает ли частица α при прохождении сквозь атом или молекулу больше одного электрона, т. е. может ли атом получить при этом двойной или тройной заряд? Метод масляных капель при малых давлениях дал на этот вопрос вполне определенный отрицательный ответ. Мы перепробовали множество газов и паров, включая ртутные соединения; но ни в одном из них частица α не вырывала из одного атома больше, чем один электрон.

Дж. Дж. Томсон привел, однако, данные, указывающие на то, что положительные остатки атомов, летящие в разрядных трубках в направлении, противоположном направлению катодных лучей, вырывают из некоторых атомов по нескольку электронов. По мнению Томсона, имеется достаточно данных, чтобы утверждать, что ионизация атома ртути состоит либо в вырывании одного отрицательного электрона, либо в вырывании восьми таких электронов. Эти данные представляются и мне вполне убедительными, и, действительно, медленный положительный луч может разрушить атом сильнее, чем луч α, движущийся с большой скоростью.

VI. Сводка.

Результаты исследований, рассмотренных в этой главе, могут быть резюмированы следующим образом.

1) Акт ионизации лучом β, повидимому, состоит в удалении одного единственного электрона из молекулы, встреченной лучем β на своем пути, при чем энергия освобожденного электрона незначительна. Чем быстрее луч β, тем реже он ионизует.

2) Акт ионизации волнами эфира, т. е. рентгеновыми или световыми лучами, повидимому, состоит в вырывании одного единственного электрона из молекулы, встреченной на своем пути волной, при чем энергия, сообщенная электрону, может быть весьма велика, но зависит от частоты падающей волны.

3) Акт ионизации быстро движущимися частицами α состоит в освобождении одного единственного электрона из атома, сквозь который проходит частица [1]), но медленно движущийся положительный луч может, повидимому, удалять из одного атома несколько электронов.

---

[1]) См Gottschalk и Kelly, „Phys. Rev.", 1917

ГЛАВА СЕДЬМАЯ.

БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ В ГАЗАХ

I. Исторический обзор.

В 1827 г. английский ботаник Роберт Броун (Robert Brown) [1]) впервые указал на то, что, наблюдая в микроскопе под большим увеличением очень маленькие частицы неживого вещества, взвешенные в какой-нибудь жидкости, можно заметить, что они производят неправильные быстрые движения, очень похожие на движения живых организмов. Хотя это явление изучалось многими наблюдателями и сделалось известным под названием Броуновского движения, тем не менее оно оставалось совершенно не объясненным целых пятьдесят лет. Первый человек, сделавший предположение, что это движение происходит благодаря непрерывной бомбардировке взвешенных частиц молекулами окружающей их среды при их тепловом движении, был бельгиец Карбонэль (Carbonelle). Его труд был впервые издан его сотрудником Тирьоном (Thirion) в 1880 г. [2]); хотя за три года перед тем Дэзо (Delsaulx) [3]) высказал подобные же взгляды, но признал первенство Карбонэля в принятии их. В 1881 г. Бодашевский (Bodaszewski) [4]) изучал Броуновское движение частиц дыма и других частиц, взвешенных в воздухе, и видел в этих движениях „приближенную картину движений газовых молекул, постулируемую кинетической теорией газов". Другие, особенно Гуи (Gouy) [5]), в течение следующих двадцати лет предлагали такую же интерпретацию; однако, путь для количественной проверки этой гипотезы был найден лишь в 1905 году. Эта проверка сделалась возможной, благодаря блестящей теоретической работе

---

[1]) „Phil. Mag.", IV (1828), 161.

[2]) „Revue des questions scientifiques", Louvain, VII (1880), 5.

[3]) Ibid, II (1877), 319.

[4]) „Dinglers polyt. Joun.", CCXXXIX (1881), 325.

[5]) „Joun. de phys.", VII (1888), 561; „Comptes rendus", CIX (1889), 102.

Эйнштейна (Einstein),[1]) из Берна, в Швейцарии. Этот автор исходил из простого предположения, что средняя кинетическая энергия частицы, взвешенной в жидкости, должна равняться средней кинетической энергии движения газовой молекулы при той же температуре; при помощи безупречного анализа он вывел выражение для среднего расстояния, на которое такая частица будет смещена за данное время, в данной среде, благодаря этому движению. Это расстояние можно было наблюдать непосредственно и сравнить его с теоретическим значением. Так, предположим, что в микроскоп наблюдают одну из совершающих беспорядочное движение частиц и в некоторый момент замечают ее положение на окулярной шкале; по истечении τ (напр., 10) секунд снова замечают ее положение и записывают ее смещение Δx за это время, вдоль одной какой-либо оси. Положим, что записано большое число таких смещений Δx, через промежутки времени τ, каждое из Δx возведено в квадрат и взято среднее из этих квадратов, $\overline{\Delta x^2}$. Эйнштейн показал, что теоретическое значение этого среднего должно быть

$$\overline{\Delta x^2} = \frac{2RT}{NK}\tau, \tag{21}$$

где R универсальная газовая постоянная для граммолекулы, а именно, $831{,}5 \times 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{градус}}$, T абсолютная температура, N число молекул в одной граммолекуле, K множитель, зависящий от вязкости среды и от величины капли и представляющий собою отношение силы, приложенной к частице в любом направлении, к скорости, вызванной этой силой. Если закон Стокса, т. е. $F = 6\pi\eta a v$, был бы справедлив для движения частицы внутри среды, тогда K, равное $\frac{F}{v}$, равнялось бы $6\pi\eta a$, так что формула Эйнштейна обратилась бы в такую:

$$\overline{\Delta x^2} = \frac{RT}{N3\pi\eta a}\tau; \tag{22}$$

это — форма, которую Эйнштейн первоначально придал своему уравнению; Ланжевэн (Langevin)[2]) дал очень простой вывод его. Главные основы этого вывода можно найти в приложении C.

---

[1]) „Ann. de Phys.", (4), XVII (1905), 549, XIX (1906), 371; XXII (1907), 569.

[2]) „Comptes rendes", CXLVI (1908) 530.

Первая тщательная проверка уравнения Эйнштейна была произведена Перрэном (Perrin)[1]) над частицами, взвешенными в жидкостях. Он применил его для вычисления N, числа молекул в грамм-молекуле и получил среднее значение $N = 68{,}2 \times 10^{22}$, что, в виду неточности измерений как K, так и Δx^2, может считаться доказательством справедливости уравнения Эйнштейна, по крайней мере в пределах ошибок измерений Перрэна, отличающихся друг от друга более чем на 30%.

II. Количественные измерения в газах.

До 1909 года не существовало ни одной количественной работы, касающейся Броуновского движения в газах. Бодашевский дал полное описание и правильное истолкование его еще в 1881 г. В 1906 г., Смолуховский (Smoluchowski)[2]) вычислил, каково должно быть среднее смещение в воздухе для частиц радиуса $a = 10^{-4}$ *см*, а в 1907 г. Эренгафт[3]) (Ehrenhaft) наблюдал смещения того же порядка, как и вычисленные, для частиц, величину коих он, однако, и не пытался измерить, так что множитель сопротивления K остался неизвестным. Следовательно, в его работе не было никаких существенных количественных данных.

В марте 1908 г. де Брольи (De Broglie)[4]), в Париже, сделал следующий важный шаг вперед. Он втягивал в стеклянную коробку металлическую пыль, образующуюся при конденсации паров, выделяющихся в электрической дуге, или искре, между металлическими электродами (это явление было открыто Гемсалеком (Hemsalech) и де Ватевиллем (de Watteville)[5]); частицы делались видимыми благодаря пучку света, шедшему горизонтально и освещавшему Броуновские частицы в фокальной плоскости объектива микроскопа, поставленного вертикально. Де Брольи укрепил две параллельные вертикальные металлические пластинки, по одной с каждой стороны от частиц, и заметил, что, если приложить к этим пластинкам разность потенциалов, то часть частиц, под влиянием поля, двигается к одной пластине, часть остается в покое, тогда как остальные двигаются

---

[1]) Ibid, p. 967; CXLVII (1908), 475, 530, 594; CLII (1911), 1380 1569; смотри также Perrin, „Brownian movements and molecular reality". англ. пер. Soddy, 1912. (Ср. также Ж. Перрэн, „Атомы").

[2]) „Ann. d. Phys.", (4), XXI (1906), 756

[3]) „Wiener Berichte", CXVI (1907), II, 1175

[4]) „Comptes rendus", CXLVI (1908), 624, 1010

[5]) Ibid, CXLIV (1907), 1338.

ко второй пластине; это показывает, что часть этих частиц заряжена положительно, а часть отрицательно. В этой статье он обещал изучить заряды таких частиц. В мае 1909 года, исполняя это обещание [1]), он произвел первое количественное исследование Броуновского движения в газах. Частицы, которые он наблюдал, были крошечные капли воды, конденсированные на табачном дыме. Определялась приблизительная скорость, с которой эти частицы двигались в горизонтальном электрическом поле. Уравнение этого движения:

$$Fe = Kv. \tag{23}$$

Далее, измерялось среднее $\overline{\Delta x^2}$ для большого числа частиц и подставлялось в уравнение Эйнштейна

$$\overline{\Delta x^2} = \frac{2RT}{NK}\tau.$$

Из этих двух уравнений исключалось K, а e выражалось через N. Вводя Перрэново значение для N, де Брольи получил из одной серии наблюдений $e = 4{,}5 \times 10^{-10}$; из другой серии наблюдений над частицами бо́льших размеров он получил среднее значение в несколько раз больше; этот результат он истолковал, как указание на кратные заряды на больших частицах. Хотя эти результаты и представляют собою только средние значения для большого числа капель, которые могут различаться между собой как по радиусу, так и по заряду, однако их можно считать за первое опытное доказательство того, что уравнение Эйнштейна приблизительно справедливо для газов; это доказательство тем более важно, что не было сделано никаких предположений как относительно размеров капель и их заряда, так и о справедливости закона Стокса в газах, ибо множитель K был исключен. Развитие способа масляных капель дало возможность подвергнуть теорию Броуновского движения более точной и убедительной опытной проверке, чем это было достижимо до сих пор, по следующим причинам:

1. Этот способ позволяет удерживать при помощи вертикального электрического поля одну определенную частицу и наблюдать ее в течение нескольких часов подряд; таким образом можно по ней одной измерить столько смещений, сколько желательно, вместо того, чтобы предполагать тождественность большого числа частиц, как было сделано в случае частиц, взвешенных в жидкости, или в опытах де Брольи в газах.

---

[1]) „Comptes rendus", CXLVIII (1909), 1316.

2. Жидкости гораздо меньше, чем газы, подходят для убедительной проверки какой-либо кинетической теории, по той причине, что до работ о Броуновском движении у нас не было никакой удовлетворительной кинетической теории жидкостей.

3. Абсолютные значения смещений для данной частицы в воздухе в 8 раз, а в водороде в 15 раз больше, чем в воде.

4. Уменьшая давление до малых значений, легко можно сделать смещения в газах в 50 и даже в 200 раз больше, чем в жидкостях.

5. Измерения в газах можно делать независимо от самого неудобного и неточного множителя, связанного с Броуновским движением в жидкостях, а именно от множителя K, в который входит радиус частицы и закон, управляющий ее движением внутри жидкости.

Сообразно этому, в 1910 году в Райэрсоновской лаборатории была начата серия очень тщательных опытов над Броуновским движением в газах. Сведберг (Svedberg) [1]) в своем обзоре по этому вопросу в 1913 году считает их „единственным точным исследованием количественного Броуновского движения в газах". Краткое изложение метода и сводка результатов были опубликованы автором [2]). Полный отчет был напечатан Гарвэем Флетчером (Mr. Harvey Fletcher) [3]) в мае 1911 года, а дальнейшая работа над изменением Броуновского движения с давлением была представлена автором в следующем году [4]).

Существенный вклад этих работ в отношении методов состоит в следующих двух особенностях:

I. Комбинируя характерное и вполне проверенное уравнение способа масляных капель, а именно

$$e=\frac{mg}{Fv_1}(v_1+v_2)_0=\frac{K}{F}(v_1+v_2)_0\,, \tag{24}$$

с уравнением Эйнштейна для Броуновского движения, т. е.

$$\Delta x^2=\frac{2RT}{NK}\tau\,, \tag{25}$$

можно получить произведение Ne без всякого отношения к размерам частицы или к сопротивлению среды ее движению. Эту величину можно было сравнить с тем же произведением, полученным

---

[1]) „Jahrbuch der Radioaktivität und Electronik", X (1913), 513.

[2]) „Science", February 17, 1911.

[3]) „Phys. Zeitschr.", XII (1911), 202—8; смотри также „Phys. Rev.", XXXIII, (1911), 81.

[4]) „Phys. Rev.", I (1913), 218.

с большой точностью из электролиза. Опыт состоит в том, что сначала уравновешивают данную капельку и измеряют величину $\overline{\Delta x^2}$, как и во всякой работе над Броуновским движением; затем капельку отпускают и измеряют F, v_1 и $(v_1+v_2)_0$. Тогда, комбинируя (24) и (25), получаем

$$\overline{\Delta x^2}=\frac{2RT}{F}\cdot\frac{(v_1+v_2)_0}{Ne}\tau\,. \tag{26}$$

В виду того, что возводить в квадрат каждое смещение Δx, перед тем как брать среднее, довольно неудобно, лучше видоизменить наше соотношение, подставив в него из закона Максвелла, справедливого для Броуновских смещений так же, как для молекулярных скоростей, зависимость

$$\overline{\Delta x}=\sqrt{\frac{2}{\pi}\,\overline{\Delta x^2}}\,.$$

Таким образом мы получаем

$$\overline{\Delta x}=\sqrt{\frac{4}{\pi}\,\frac{RT(v_1+v_2)_0}{F(Ne)}\tau} \tag{27}$$

или

$$Ne=\frac{4}{\pi}\,\frac{RT(v_1+v_2)_0\tau}{F(\overline{\Delta x})^2}\,. \tag{28}$$

Возможность такого исключения размеров частицы, а вместе с тем и сопротивления среды ее движению, делается сразу очевидной из простого соображения, что до тех пор, пока мы имеем дело с одной и той же частицей, отношение K между действующей силой и скоростью должно быть одинаково, независимо от того, происходит ли действующая сила от тяготения, или от электрического поля, как в опытах с масляными, каплями или от столкновения с молекулами, как в работах над Броуновским движением. Если бы наблюдения де Брольи над смещением и подвижностью частиц в электрическом поле были произведены над одной и той же частицей, то он мог бы произвести такое исключение и вычислить Ne; когда же два ряда наблюдений сделаны над различными частицами, такое исключение будет связано с очень шатким предположением о тождественности размеров и зарядов частиц. Хотя де Брольи и сделал это предположение, но он не обработал своих результатов указанным образом; первое опубликование этого способа измерения Ne и первое действительное измерение было сделано нами в статьях, приведенных выше.

Несколько времени спустя Э. Вейсс (E. Weiss) доложил подобную работу Венской Академии [1]).

II. Хотя и возможно проверить Ne только что описанным способом, и хотя это и было сделано для одной или двух капель, Г. Флетчер выработал более удобный способ, связанный с выражением смещений Δx через флуктуации [2]) времени, нужного для того, чтобы частица упала на данное расстояние; это совершенно избавляет от необходимости уравновешивания частицы в электрическом поле. Я приведу другой вывод, очень простой и все таки бесспорно справедливый.

Пусть в уравнении (28) τ есть время, нужное частице для того, чтобы упасть через определенное число равноотстоящих на d одно от другого перекрестий, если бы не было Броуновского движения. Благодаря этому движению, частица за время τ передвинется вверх или вниз на расстояние Δx. Предположим, что она передвинулась вверх. Тогда действительное время падения будет $\tau + \Delta t$, где Δt есть время, за которое частица падает на расстояние Δx. Если теперь Δt мало по сравнению с τ, т. е., если Δx мало по сравнению с d (например, $^1/_{10}$, или меньше), тогда мы сделаем не имеющую значения ошибку (порядка не больше $^1/_{100}$), если мы предположим, что $\Delta x = v_1 \Delta t$, где v_1 средняя скорость падения под влиянием силы тяжести. Заменяя в (28) $\overline{(\Delta x)^2}$ через $v_1^2 \overline{(\Delta t)^2}$, где $\overline{(\Delta t)^2}$ есть квадрат средней разности между наблюденным временем падения и средним временем падения t_g, т. е. квадрат средней флуктуации времени падения на расстояние d, мы получаем, заменив идеальное время τ средним временем t_g^0 [3])

$$Ne = \frac{4}{\pi} \frac{RT(v_1 + v_2)_0 t_g^0}{F v_1^2 \overline{(\Delta t)^2}}. \tag{29}$$

Во всяких действительных наблюдениях $\overline{\Delta t}$ должно быть значительно меньше $^1/_{10}$ среднего времени t_g^0, если неправильности, про-

---

[1]) Доклад был прочитан 6 июля: „Wiener Berichte", CXX (1911), 1021, но в печати появился впервые в номере „Phys. Zeitschr" от 1 августа 1911 г., стр. 630. Статья Флетчера в кратком виде находится в одном из предыдущих номеров того же тома „Phys. Zeitschr.", стр. 203, и была напечатана полностью в июльском номере „Le Radium", VIII (1911), 279.

[2]) Флуктуации — статистические колебания — термин, получивший распространение в связи с работами Эйнштейна и Смолуховского. *Прим. ред.*

[3]) См. выноску [1]) на стр. 119.

исходящие от ошибок наблюдателя, не должны сглаживать неправильностей, происходящих от Броуновского движения, так что (29) достаточно практически для всяких условий опыта [1]).

Исследования Флетчера и автора были произведены обоими способами, представленными уравнениями (28) и (29). 9 капель, описанные в статье Флетчера в 1911 году [2]), дали результаты, приведенные ниже, где n представляет число перемещений употребленных в каждом случае для определения $\overline{\Delta x}$ и $\overline{\Delta t}$.

Таблица XIV.

$\sqrt{Ne} \times 10^7$	n
1,68	125
1,67	136
1,645	321
1,695	202
1.73	171
1,65	200
1,66	84
1.785	411
1,65	85

Если приписать этим данным веса, пропорциональные числу наблюдений, указаному в последнем столбце таблицы XIV, то среднее значение, изображающее собою среднее из 1,735 смещений, дает $\sqrt{Ne} = 1{,}698 \times 10^7$, или $Ne = 2{,}88 \times 10^{14}$ электростатических единиц; значение же, найденное из электролиза, равно $2{,}896 \times 10^{14}$ (стр. 24). Таким образом в этом случае расхождение теории с опытом достигает всего лишь около половины 1 процента, что не выходит из пределов ошибок наблюдения.

Эта работа доказывает правильность уравнения Эйнштейна с гораздо большей точностью, чем было достигнуто в прежних работах по Броуновскому движению, и с минимумом допущений. Уравнение же Эйнштейна, в сущности, есть просто предположение, что частица, взвешенная в газе, движется с некоторой средней поступательной кинетической энергией, являющейся универсаль-

---

[1]) При этом не вводится ошибки, если по предположению, Δt мало по сравнению с t_g. Относительно более точных уравнений смотри Fletcher, „Phys. Rev.“. IV (1914). 442; так же Smoluchowski, „Phys. Zeitschr.“. XVI (1915). 321.

[2]) „Le Radim“, VIII (1911). 279; „Phys. Rev.“, XXXIII (1911), 107.

ной постоянной, зависящей только от температуры; это справедливо для всяких частиц, все равно, большие они, или маленькие, и из чего они состоят. Чтобы показать, насколько хорошо установлен этот вывод, я вкратце укажу на несколько позднейших исследований.

В 1914 г. д-р Флетчер произвел новые и улучшенные измерения Броуновского движения в воздухе, приняв значение K, которое я опубликовал [1]) для масляных капель в воздухе; он решил относительно N первоначальное уравнение Эйнштейна, которое дает, если подставить, как и выше,

$$(\Delta x)^2 = \frac{2}{\pi}\,\overline{\Delta x^2} \quad \text{и} \quad (\overline{\Delta x})^2 = v_1^2\,(\overline{\Delta t})^2$$

$$N = \frac{4}{\pi}\,\frac{RTt_g}{K\,v_1^2\,(\overline{\Delta t})^2}. \tag{30}$$

Он взял в общей сложности 18,837 промежутков времени Δt, не меньше, чем 5900, для каждой капли и получил $N = (60{,}3 \pm 1{,}2) \times 10^{22}$. Это число нельзя, конечно, рассматривать, как совершенно независимое определение N, потому что оно связано с моим значением для K. Однако, в виду того, что оно так хорошо совпадает с моим значением для N, это число показывает с большой убедительностью, что как уравнение Эйнштейна, так и моя исправленная форма уравнения Стокса, точно изображают движение масляных капель данного размера, а именно радиуса от $2{,}79 \times 10^{-5}$ *см* до $4{,}1 \times 10^{-5}$ *см* (280—400 $\mu\mu$).

В 1915 году К. Эйринг (Carl Eyring) проверил при помощи уравнения (29) значение Ne для масляных капель приблизительно такой же величины в водороде; он получил число, отличающееся не больше, чем на 0,6 процента, от значения найденного из электролиза, при чем вероятная ошибка была, однако, около 2 процентов.

Совершенно такие же опыты с веществами другими, чем масло, были проделаны д-ром Вейссом (E. Weiss) [2]) и д-ром К. Пржибрамом (Karl Przibram) [3]). Первый работал с частицами серебра, которые были вдвое меньше упомянутых выше частиц масла, а именно имели радиус от 1×10^{-5} до $2{,}3 \times 10^{-5}$ *см*. Вейсс получил $Ne = 10700$ электромагнитных единиц вместо 9650, получаемых в электролизе. Правда, это число превышает истинное на 11 процентов,

---

[1]) „Phys. Rev.", I (1913), 218.

[2]) „Sitzungsber d. k. Akad. d. Weiss. in Wien", CXX (1911), (2a) 1021.

[3]) Ibid. CXXI (1912), (2a) 950.

но пределы ошибок в опытах Вейсса, по его собственной оценке, были таких же размеров. К. Пржибрам работал с пятью или шестью различными веществами, взвешенными в воздухе, при чем радиусы изменялись от 200$\mu\mu$ до 600$\mu\mu$; хотя его результаты сильно (до 100%) отличались друг от друга, однако его среднее значение отличалось менее, чем на 6 процентов, от числа 9 650. Оба последние наблюдателя брали для каждой капли слишком мало смещений, чтобы можно было положиться на полученную ими среднюю величину смещения; зато они брали так много капель, что их среднее Ne, все таки, имеет некоторое значение.

Поэтому, казалось бы, что справедливость уравнения Эйнштейна для Броуновского движения довольно хорошо установлена для газов. Для жидкостей оно также было недавно подвергнуто гораздо более строгой проверке, чем до сих пор. Нордлунд (Nordlund)[1]) в 1914 г. получил $N = 59{,}1 \times 10^{22}$, наблюдая крошечные частицы ртути в воде и исходя из уравнения Эйнштейна и закона падения Стокса. В 1915 г. Вестгрен[2]) (Westgren) в Стокгольме при помощи большого числа измерений над частицами коллоидального золота, серебра и селена с радиусами от 65 до 130$\mu\mu$ получил результат, который он считает точным до половины процента; его значение $N = 60{,}5 \times 10^{22} \pm 0{,}3 \times 10^{22}$ прекрасно совпадает со значением, полученным мною по методу изоляции и измерения электрона.

Благодаря такому согласию результатов, из научного мира исчезли последние следы недоверия к кинетической и атомной гипотезам строения вещества, и даже Оствальд (Ostwald) счел возможным написать те слова, которые были приведены выше, на стр. 8.

---

[1]) „Zeitschr. f. Phys. Chem.", LXXXVII (1914), 40.

[2]) „Die Brown'sche Bewegung besonders als Mittel zur Bestimmung der Avogadro'schen Konstante", Inaugural-Dissertation. Upsala, Almquist & Wiksells Boktryckeri, 1915.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ.

СУЩЕСТВУЕТ ЛИ СУБ-ЭЛЕКТРОН?

С методами современной науки было бы не совместимо всякое догматическое утверждение о неделимости электрона. Такие утверждения обычно делались до самого последнего времени на лекциях в высшей школе относительно атомов элементов; однако дальновидные физики, вроде Фарадея, всегда старались отрешиться от веры в неделимость химических атомов, и это просто потому, что не было никаких оснований для того, чтобы утверждать что бы то ни было относительно внутреннего строения атома. Мы знали только, что существует какая-то наименьшая единица, вступающая в химические реакции, и мы назвали ее атомом, оставляя его внутреннее строение для будущего.

Совершенно так же, электрон был определен, как наименьшее количество электричества, которое проявляется при электролизе, и ничего не было сказано тогда и не говорится теперь о необходимости его неделимости. Наши опыты, однако, теперь показали, что эту величину можно выделить и точно измерить и что все виды зарядов, которые мы могли исследовать, являются точными его кратными. Величина его равна $4{,}774 \times 10^{-10}$ электростатическим единицам.

I. Второй способ получения *e*.

Я описал один путь для измерения этого заряда; однако существует косвенный способ, которым можно придти к решению этого вопроса, разработанный независимо друг от друга Резерфордом и Гейгером (Geiger) [1]), с одной стороны, и Регенером (Regener) [2]), — с другой Существенная черта этого способа состоит в том, что сосчитывается число частиц α, выбрасываемых в каждую секунду небольшим кусочком радия или поло-

[1]) „Proc. Roy. Soc.", A. LXXXI (1908), 141, 161.

[2]) „Sitzungsber. d. K. Preuss. Akad.", XXXVIII (1909), 948.

ния по направлению данного телесного угла, и отсюда вычисляется число частиц, выделяемых в секунду одним граммом радия, или полония. Регенер производил свое определение, подсчитывая сцинтилляции, появляющиеся на алмазном экране в фокальной плоскости его микроскопа. После этого он ловил в конденсаторе все частицы α, выброшенные в секунду известным количеством полония, и определял полное количество электричества, отданное ими конденсатору. Это количество электричества, деленное на число частиц, выброшенных в одну секунду, давало заряд каждой частицы. В виду того, что частицы α в конце концов оказались атомами гелия [1]) и что величина $\frac{e}{m}$, найденная для них, показала, что, если это атомы гелия, то заряд их должен быть двойной, Регенер разделил свой результат на 2 и получил

$$e = 4{,}79 \times 10^{-10}.$$

Он оценил свою ошибку в 3 процента.

Резерфорд и Гейгер подсчитывали частицы α, впуская их от кусочка радия C в ионизационную камеру, где они при столкновении вызывали ионизацию, достаточную для того, чтобы стрелка электрометра делала скачек каждый раз, когда в камеру попадала одна из них. Полный заряд эти авторы измеряли так же, как это делал Регенер; разделяя на 2 заряд каждой частицы α, они получили

$$e = 4{,}65 \times 10^{-10}.$$

Все определения e из радиоактивных данных связаны с одним из этих двух подсчетов. Так, Болтвуд (Boltwood) и Резерфорд [2]) измеряли полный вес гелия, выделенного в секунду известным количеством радия. Деля это на число частиц α (атомов гелия), полученных из подсчета Резерфорда и Гейгера, они получили массу одного атома гелия, откуда сейчас же получается число атомов в данном весе, или объеме, если известна плотность газа. Эти исследователи получили для числа молекул n в кубическом сантиметре газа, при 0^0 и давлении в 76 *см*, число $n = 2{,}69 \times 10^{19}$, чему соответствует

$$e = 4{,}81 \times 10^{-10}.$$

[1]) Rutherford and Royds, „Phil. Mag.", XVII (1909), 281.
[2]) „Phil. Mag.", (6) XXII (1911), 599.

Последний способ точно также, как и способ Броуновского движения, в действительности есть скорее определение N, чем e, ибо e получается только через посредство соотношения $Ne = 9650$ электромагнитным единицам. Больше того, насколько я знаю, это справедливо относительно всех способов определения e за исключением метода масляных капель и способа Резерфорда-Гейгера и Регенера, а из этих двух последний представляет измерение среднего заряда громадного числа частиц α.

Таким образом нельзя было бы опровергнуть человека, который бы пожелал утверждать, что единичный заряд, появляющийся при электролизе, представляет просто средний заряд, полученный из сильно отличающихся друг от друга индивидуальных зарядов таким же образом, как получается атомный вес неона. Напомним, что недавно было показано, что атомный вес, приписываемый неону, является на самом деле средним из весов по крайней мере двух различных элементов, не разделимых химически. Оспаривать это мнение можно только на основании данных, полученных из опытов с масляными каплями, потому что эти опыты представляют собою единственный найденный до сих пор способ для непосредственного измерения заряда каждого индивидуального иона. Для настоящего же изложения очень интересно и важно, что заряд частицы α был измерен непосредственно, и что он получился, в пределах ошибок измерения, в точности равным двум электронам, как и должно быть, согласно данным, полученным из измерения $\frac{e}{m}$ для частиц α.

II. Показания в пользу существования суб-электрона.

Упомянутое в конце предыдущего отдела утверждение действительно было недавно сделано, и были приведены факты в пользу существования электрических зарядов, гораздо меньших, чем электрон. В виду того, что это затрагивает то, что можно назвать одним из основных вопросов современной физики, эти факты требуют тщательного рассмотрения. Они лучше всего могут быть оценены при помощи краткого исторического обзора их происхождения.

Первые измерения подвижности в электрическом поле роя заряженных частиц микроскопических размеров были сделаны Г. А. Вильсоном (H. A. Wilson)[1]) в 1903 году, как подробно описано в главе III. Эти измерения были повторены с различными

[1]) „Phil. Mag.", (6), V (1903), 429.

видоизменениями другими наблюдателями, включая и нас, в продолжение непосредственно следующих за этим лет. Видоизменение де-Брольи, опубликованное в 1908 г.[1]), состояло в следующем. В фокальную плоскость ультра-микроскопа засасывалось металлическое облако. Такого рода облака, открытые Гемсалеком и де-Ваттевиллем (Hemsalech и De Watteville)[2]), образуются в искре или дуге между металлическими электродами. Движения отдельных частиц в этом облаке наблюдались в горизонтальном электрическом поле, происходящем от разности потенциалов, приложенной к двум вертикальным параллельным пластинам, помещенным перед объективом микроскопа. В упомянутой статье де-Брольи впервые отмечает факт, что некоторые из частиц были заряжены положительно, некоторые отрицательно, а некоторые совсем не заряжены; кроме того он указывает и на дальнейший факт, что приближение радия к камере изменяет заряды частиц. Он обещал произвести количественные измерения самих зарядов. Год спустя он исполнил свое обещание[3]), и практически в то же самое время Эренгафт (Ehrenhaft)[4]) опубликовал подобные же измерения, сделанные с совершенно той же установкой, какую описывал де-Брольи годом раньше. Оба они, как ясно высказал Эренгафт, хотя и наблюдали индивидуальные частицы, получали только средний заряд, потому что различные измерения, входящие в оценку e, были сделаны с различными частицами. Поскольку дело касается e, эти измерения, как всякий согласится, представляют, по существу, только измерения облаков Вильсона.

В течение весны и лета 1909 года я изолировал отдельные капельки воды и определил заряд каждой из них[5]), а в апреле 1910 г. я читал в Американском Физическом Обществе полный доклад о работе с масляными каплями, в котором устанавливались кратные соотношения между зарядами, закон Стокса был исправлен, а e определено с большой точностью[6]). В следующем месяце (май, 1910),

---

[1]) „Comptes rendus", CXLVI (1908), 624, 1010.

[2]) Ibid, CXLIV (1907), 1338.

[3]) Ibid, CXLVIII (1909), 1316.

[4]) „Phys. Zaitschr.", X (1909), 308.

[5]) Эта статья была напечатана в сокращенном виде в „Phys. Rev.", XXX (1909), 560 и „Phil Mag.", XIX (1910), 209.

[6]) Эта статья была напечатана в сокращенном виде в „Phys. Rev.", XXXI (1910), 92; „Science", XXXII (1910), 436; „Phys. Zeitschr.". XI (1910), 1097.

Эренгафт[1]), заметив, что установка с вертикальным конденсатором делает возможным независимое определение заряда каждой индивидуальной частицы,—как это было теоретически и экспериментально показано в статьях 1909 года, упомянутых выше,—доложил свою первую работу, в которой он пользуется этой установкой, вместо установки де-Брольи, бывшей у него раньше. Он доложил о результатах, тождественных во всех существенных особенностях с результатами, опубликованными мною год назад относительно водяных капель, за исключением того, что я получил простые и согласные между собой кратные соотношения между зарядами различных частиц, а он не нашел такого постоянства в этих отношениях. Абсолютные значения элементарных зарядов, полученные в предположении справедливости закона Стокса, колебались около значений, значительно меньших, чем $4{,}6 \times 10^{-10}$. Однако, вместо того, чтобы отнести это на счет закона Стокса, или за счет неправильных предположений о плотности своих частиц, Эренгафт заметил в примечании, что теоретическая поправка Кённингэма (Cunningham) для закона Стокса[2]), о которой он (Эренгафт) только что узнал, сделала бы его значения заряда еще меньше, и что поэтому неточность закона Стокса не может объяснить малости полученных им чисел. Поэтому он считал свои результаты совершенно противоречащими атомной теории электричества и во всяком случае доказывающими существование зарядов гораздо меньших, чем заряд электрона[3]).

Видимое противоречие между этими результатами и моими было выяснено, когда Г. Флетчер и я показали[4]) на опыте, что Броуновское движение может вызвать как раз такие же кажущиеся флуктуации, какие наблюдал Эренгафт, в том случае, когда e вычисляется, как это делалось в его работе, из одиночного наблюдения скорости под влиянием силы тяжести и скорости в электрическом поле. Мы показали дальше, что то обстоятельство, что его значения колебались вокруг слишком маленького среднего, просто означает, что его частицы золота, серебра и ртути менее плотны, чем он

[1]) „Wien. Ber.", CXIX (1910), II, 809. Повидимому это издание вышло не раньше декабря 1910, потому что оно не отмечено в „Naturae Novitates" раньше этой даты.

[2]) „Proc. Roy. Soc.", LXXXIII (1910). 360.

[3]) Эти результаты были представлены и подверглись долгому обсуждению в конце 1910 года; смотри „Phys Zeitschr." XI (1910), 619, 940.

[4]) „Phys Zeitschr", XII (1911). 161; „Phys. Rev.", XXXII (1911). 394.

предполагал, благодаря поверхностному загрязнению, окислению или тому подобному. Правильность такого объяснения была бы почти что доказана, если бы значения Ne, которые были вычислены из уравнений (28) или (29) в главе VII на основании большого числа наблюдений Броуновского движения, всегда получались бы такие же, как из электролиза, потому что в этих уравнениях не надо делать никаких предположений относительно плотности частиц. Действительно, все девять частиц, изученные нами и вычисленные г. Флетчером [1]), дали правильное значение для Ne, тогда как только шесть из них, по моим вычислениям, легли точно или вблизи от линии, изображающей закон падения масляных капель в воздухе (рис. 5, стр. 82). Это последнее обстоятельство не было опубликовано в 1911 году, потому что вплоть до 1913 года я не мог определить с уверенностью полный закон падения капли в воздухе, другими словами, распространить кривые вида, изображенного на рис. 5, на достаточно большие значения $\frac{l}{a}$, сответствующие маленьким частицам, способным производить заметное Броуновское движение. Как только это мне удалось, я перечислил результаты, относящиеся ко всем девяти каплям, для которых получались правильные значения для Ne, и нашел, что две из них упали гораздо ниже кривой, еще одна немного ниже, тогда как одна оказалась значительно выше. Это очевидно означает, что эти четыре частицы не были шариками из одного только масла, потому что две из них падали значительно медленнее, а одна значительно скорее для того, чтобы иметь такое строение. В этом результате не было ровно ничего удивительного, потому что я подробно выяснил в моей первой статье о масляных каплях, что до тех пор, покуда я не принял больших предосторожностей для получения воздуха без пыли, „значения e_1 получались различные даже для капель, обладающих одинаковой скоростью при свободном падении". В работах над Броуновским движением мы не принимали мер для получения воздуха, свободного от пыли, потому что мы хотели проверить справедливоеть уравнений (28) и (29) в общем виде. То обстоятельство, что мы на деле получили в этих опытах две частицы со средней плотностью гораздо меньшей, чем у масла, и одну, которая была значительно тяжелее, было очень удачно, потому что это показало, что наш результат действительно не зависит от вещества.

---

[1]) „Le Radium". VIII (1911). 279; „Phys. Rev.". XXXIII (1911). 107.

Следует заметить, что, вообще, даже при масляных каплях, почти все капли, ведущие себя ненормально, падают слишком медленно, т. е. они падают ниже кривой рис. 5, только изредка одна из них попадает выше нее. Это происходит потому, что пылинки, которые проще всего наблюдать, т. е. те, которые долго остаются взвешенными в воздухе, или вобще легче, чем масло, или обладают большей поверхностью, и значит действуют так, как будто бы они были легче. Если работать с частицами, состоящими из плотных металлов, то это будет еще заметнее, потому всякого рода поверхностные загрязнения уменьшают плотность. Однако возможность освобождения опытов с масляными каплями от всех источников ошибок такого рода видна из того обстоятельства, что, хотя в течение прошлого года я исследовал триста капел, я не могу припомнить ни одного случая, при котором капля не попала бы на кривую рис. 5 с ошибкой меньше 1 процента. В этой главе будет также показано, что, несмотря на неудачу венских экспериментаторов, возможно получить капельки ртути, которые ведут себя даже в отношении закона падения практически во всех случаях вполне нормально и постоянно.

Е. Вейсс в Праге и К. Пржибрам в самой венской лаборатории (как было сказано в главе VII), нашли что все вещества, с которыми они работали (включая и серебряные частицы, подобные тем, которые получал Эренгафт), дают приблизительно правильное значение Ne, хотя применение закона Стокса к падению серебряных частиц и дает слишком малые значения для e.

После этого почти весь ученый мир принял наше объяснение результатов Эренгафта и перестал заниматься мыслью о суб-электроне [1]).

Однако, в 1914 и 1915 годах профессор Эренгафт [2]) и двое из его учеников, Ф. Цернер (F. Zerner) [3]) и Д. Константиновский [4]), опубликовали новые данные в пользу существования такого суб-электрона. Эти данные, кажется, довольно мало поняты и поэтому требуют некоторых пояснений. Названные авторы приводят три довода. Первый довод состоит в том, что теперь они опре-

---

[1]) Смотри R. Pohl. „Jahrbuck d. Radioaktivität und Electronik", VIII (1912), 431.

[2]) „Wien. Stizungsber.", CXXIII (1914), 53—155; „Ann. d. Phys.", XLIV (1914), 657.

[3]) „Phys. Zeitschr.", XVI (1915), 10.

[4]) „Ann. d. Phys.", XLVI (1915), 261.

делили Ne для своих частиц при помощи уравнения (29); хотя во многих случаях они получают то же число, что и из электролиза, в некоторых случаях Ne получается на 20 — 50 процентов, а иногда даже в четыре или пять раз меньше электролитического значения. Вообще же эти авторы имеют обыкновение опубликовывать не значение Ne, а вместо него значение e, вычисленное из Ne при помощи числа N, полученного Перрэном (70×10^{22}), подставляя его в (29) и затем решая относительно e. Это их способ определения e „из Броуновского движения".

Их второй довод тот же, что и выдвинутый первоначально, а именно, что в некоторых случаях, когда e определяется с помощью закона падения Стокса [уравнение (12), стр. 70], даже с поправкой Кеннингама (Cunningham) или с моей [уравнение (15), стр. 77], результат получается значительно меньше, чем $4{,}77 \times 10^{-10}$. Их третий аргумент тот, что значение e, определенное, как сейчас было выяснено, из Броуновского движения, вообще говоря, больше значения, вычисленного из закона падения, и что отклонения делаются все больше и больше с уменьшением капли. Эти наблюдатели заключают отсюда, что мы в Райэрсоновской лаборатории потому не открыли суб-электронов, что наши капли были слишком велики, чтобы обнаружить их существование. Им кажется, что только более мелкие частицы, изучаемые ими, выявляют эти суб-электроны. Другими словами, они думают, что величина наименьшего заряда, который можно поймать в воздухе, фактически оказывается функцией радиуса капли, которой он захвачен, при чем он меньше для маленьких капель, чем для больших.

Эренгафт и Цернер даже разбирают наши статьи о масляных каплях и находят, что в некоторых случаях и здесь можно найти указание на суб-электроны, потому что в руках этих наблюдателей они дают слишком низкие значения e, как расчитанные из Броуновского движения, так и из закона падения. Когда вычисления сделаны последним способом, то, согласно согласно этим авторам, выходит, что e уменьшается с уменьшением радиуса, как и в случае их опытов с частицами ртути и золота.

III. Причины расхождения.

Однако, единственное низкое значение Ne, найденное этими авторами в работе с масляными каплями, получается при вычислении Ne из небольшого числа двадцати пяти наблюдений времен падения,

и такого же числа времен поднятия частиц. Мы привели эти данные до всяких вычислений Ne, только чтобы показать, что Броуновское движение может вызвать как раз такие флуктуации, какие наблюдал Эренгафт, если только условия опыта те же, что у него. Если я вычислю Ne из уравнения (29), пользуясь двадцатью пятью временами падения, я найду значение Ne на 26 процентов слишком малым, совершенно так же, как это находит Цернер. Однако, если я выпущу первый отсчет, то Ne будет меньше только на 11 процентов. Другими словами, опускание одного единственного отсчета изменяет результат на 15 процентов. Далее, Флетчер[1]) только что показал, что те же самые данные, обработанные вполне законно, но при немного другой группировке, чем делает Цернер, могут дать совершенно точное значение Ne. Отсюда ясно вытекает ненадежность проверки статистической теоремы при помощи такого малого числа наблюдений, как двадцать пять; хотя даже это число больше, чем число наблюдений, которым обычно пользуется Эренгафт для своих капель. Далее, я сейчас покажу, что, если только наблюдения производятся не при тщательно выбранных условиях, ошибки самого наблюдателя и медленное испарение капли стремятся сделать Ne, полученное из уравнения (29), слишком низким, и этих ошибок может быть достаточно, чтобы совершенно исказить результат. Таким образом ни в одной работе, сделанной нами до сих пор с масляными каплями, нет ни малейшего указания на то, что Ne получается слишком малым.

Рассмотрим, далее, кажущиеся изменения e, когда его вычисляют из закона падения. Цернер вычисляет e из моего закона падения, для случая девяти капель, опубликованных Флетчером, для которых Ne получилось такое же, как из электролиза; Цернер же находит, что одна из них дает $e = 6{,}66 \times 10^{-10}$, другая $e = 3{,}97 \times 10^{-10}$, третья $e = 1{,}32 \times 10^{-10}$, четвертая $e = 1{,}7 \times 10^{-10}$, тогда как остальные пять дают приблизительно правильную величину, а именно $4{,}8 \times 10^{-10}$. Другими словами (как было указано выше на стр. 127), пять из этих капель в точности падают на мою кривую (рис. 5), одна попадает немного выше, другая немного ниже, тогда как две совсем в стороне и значительно ниже. Отсюда я заключил, что эти две капли совсем не капли масла, а пылинки. Так как Цернер вычисляет радиус

[1]) „Phys. Zeitschr", XVI (1915), 316.

из скорости падения, то у него эти две пылинки, падающие слишком медленно и поэтому дающие слишком низкие значения e, конечно, должны давать соответственно низкие значения и для a. А так как это действительно и получается, то Цернер заключает, что наши масляные капли также, как и ртутные капли Эренгафта, дают убывающие значения e с уменьшением радиуса. Из его собственных таблиц этого не следует. В них просто стоят три неправильных значения для e, из них два очень низких и одно слишком большое. Однако, довольно одного взгляда на остальные, опубликованные мною, данные для масляных капель, чтобы показать полную неправильность такой точки зрения[1]): эти данные показывают, что после того, как я исключил пыль, все мои частицы давали совершенно одинаковые значения „e", независимо от их величины[2]). Следовательно, единственное возможное толкование, которое можно применить к этим двум частицам, давшим правильные значения Ne, и слишком малые скорости падения, это то, которое я к ним и применил, именно, что они не масляные шарики.

Что же касается до венских данных для ртути и золота, то Эренгафт печатает в общей сложности данные относительно только шестнадцати частиц; для своих вычислений Броуновского движения он берет, в среднем, пятнадцать времен падения и пятнадцать времен поднятия для каждой, при чем наименьшее число есть 6, а наибольшее 27. После этого, он вычисляет статистическое среднее $\overline{(\Delta t)^2}$ из наблюдений такого рода. Далее, он принимает значение Перрэна для N, а именно 70×10^{22}, что соответствует значению $e = 4{,}1 \times 10^{-10}$, и вместо этого значения получает по способу Броуновского движения, т. е. „по способу Ne", для e (множитель 10^{-10}, для краткости, опущен): 1,43; 2,13; 1,38; 3,04; 3,5; 6,92; 4,42; 3,28; 0,842. Если зачеркнуть первые три и последнее, то среднее значение e получится как раз около того, что должно быть, а именно, 4,22 вместо 4,1. Далее, первые три частицы самые тяжелые; первая из них падает между перекрестиями 3,6 секунды, а флуктуации ее времени падения составляют от 3,2 до 3,85 секунды, т. е. три десятых секунды в обе стороны от среднего значения. Но ведь эти флуктуации только немного больше тех, которые сделает

---

[1]) „Phys. Rev.", II (1913), 138.

[2]) Там же, 134—35.

средний наблюдатель, отмечающий время прохождения равномерно движущегося тела через равноотстоящие перекрестия. Это значит, что в данном случае действовали две почти одинаково сильные причины, вызывающие флуктуации. Поэтому, конечно, наблюденные величины Δt были больше, чем вызванные одним Броуновским движением, и легко могли стать в случае очень немногих наблюдений раза в два или в три больше. Так как $(\overline{\Delta t})^2$ стоит в знаменателе уравнения (29), то сейчас же видно, что, благодаря ошибкам наблюдателя в отсчете времени, серия наблюденных Δt всегда будет стремиться быть больше действительных Δt, происходящих от одного Броуновского движения, а следовательно, способ Броуновского движения всегда стремится дать слишком малые значения Ne и вместе с тем и слишком низкие значения для e. Только в том случае, когда средней ошибкой наблюдения вполне можно пренебречь по сравнению с флуктуациями Броуновского движения, этот способ не будет давать слишком малых значений для e. Пренебрежение этим обстоятельством, по моему мнению, является одной из причин малых значений e, полученных Эренгафтом.

С другой стороны, в первоначальной работе со ртутными каплями, которые я получил как распылением жидкой ртути, так и сгущением паров кипящей ртути[1]), я заметил, что такие капельки некоторое время испарялись даже быстрее, чем масло; другие наблюдатели, работавшие после меня со ртутью, отметили такое же их поведение[2]). О размерах этого эффекта можно судить по тому обстоятельству, что одна ртутная капля, недавно наблюдавшаяся в моей лаборатории, сначала обладала скоростью в 1 *см* в 20 *сек*, и эта скорость изменилась за первые полчаса до 1 *см* в 56 *сек*. Однако, медленное прекращение испарения показывает, что капля постепенно покрывается пленкой, которая ее защищает. Но если происходит хоть какое-нибудь испарение в то время, когда наблюдают последовательные времена падения, а в той или иной степени изменения от испарения или конденсации происходят всегда, - то кажущееся значение $(\Delta t)^2$ будет больше обусловленного Броуновским движением. Это будет иметь место даже и тогда, когда движения

[1]) „Phys. Rev.", XXXII (1911), 389.

[2]) Смотри Schidlof et Karpowicz, „Comptes rendus", CLVIII (1914), 1912.

достаточно велики, чтобы помешать наблюдателю заметить, что пока он сделал двадцать или тридцать отсчетов, капля все время менялась. Этих изменений, вместе с флуктуациями t, происходящими от ошибок наблюдения, я думаю, достаточно для объяснения всех низких значений e, полученных Эренгафтом по способу Броуновского движения. Действительно, я и сам несколько раз получал Ne меньшим, чем половина настоящей величины, пока я не внес поправки на испарение капли, и это было верно, даже если испарение шло так медленно, что скорость падения менялась только на 1—2 процента за полчаса. Но не только испарение вводит ошибку такого рода. Истощение батареи, уход капли из фокуса, или что бы то ни было, изменяющее время прохождения через равноотстоящие перекрестия,—все стремится уменьшить кажущееся значение Ne. Таким образом, насколько я могу судить, во всех данных, опубликованных до сих пор, нет доказательств того, что способ Броуновского движения дает слишком низкие значения e; с другой стороны, очень много положительных свидетельств того, что это не так, было приведено в предыдущей главе.

Данные Константиновского очень похожи на данные Эренгафта в том смысле, что они допускают слишком низкое значение Ne, благодаря ошибкам наблюдения, испарению и смещению из фокуса; но они заключают еще один источник ошибок, который, повидимому, вводит автора в совершенное заблуждение. Он напечатал наблюденные Ne только для 11 частиц[1]); пять из них дают для e значения между 3,3 и $4{,}2 \times 10^{-10}$, или приблизительно правильные величины, если принять во внимание, что он берет для N значение 70×10^{22}; следующие три дают около 2×10^{-10}, еще две около 1×10^{-10}, тогда как одна дает $0{,}5 \times 10^{-10}$. Его определение ряда кратных отношений, из которого он получает общий наибольший делитель $(v_1 + v_2)_0$ [смотри уравнение (29)], однако, настолько ненадежно, что он поднимает вопрос, существует ли вообще этот общий наибольший делитель, и это несмотря на то, что другие наблюдатели — теперь нас по крайней мере дюжина, в том числе и сам Эренгафт — неизменно находили справедливыми эти кратные отношения. Но погрешность в $(v_1 + v_2)_0$ [смотри уравнение (29)], означает такую же погрешность в Ne. Очень низкие значения Ne, полученные Константиновским (одна десятая нормального значения), по моему мнению, происходят от того, что

[1]) „Ann. d. Phys.", XLVI (1915). 292.

он выбирает неправильное значение для $(v_1+v_2)_0$. Однако, с тем прибором, с которым он работает, и при таких крошечных частицах, совсем не удивительно, что он не может найти общего наибольшего делителя ряда скоростей.

Чтобы с уверенностью указать порядок величины общего наибольшего делителя, нужно, в условиях опытов Константиновского, произвести над каждой частицей гораздо бо̀льшее число наблюдений, чем он обычно делает. Условия же его опытов характеризуются, во первых, большим Броуновским движением частиц и, во вторых, слабостью электрического поля (в некоторых случаях разность потенциалов на пластинах конденсатора, отстоящих на 2 миллиметра, достигала только девяти вольт); кроме того, в виду слабости поля, капли у него заряжены сравнительно сильно.

Мы видим, что e и a, вычисленные из закона падения, по мере уменьшения кажущейся величины частиц, все больше и больше удаляются от величин e и a, вычисленных из Броуновского движения. Этого и следует ожидать, если частицы с поверхности загрязнены, или обладают не сферической формой, или же состоят совсем не из ртути. С другой стороны, отметим тот факт, что эти данные все получаются в том случае, когда наблюдатели работают с чрезвычайно плотными веществами, ртутью и золотом, распыленными в электрической дуге. А в таких условиях наличие любого вещества, отличного от ртути и золота, но принимаемого за таковые, должно иметь следствием очень низкие значения для e и a. Это обстоятельство уже само по себе внушает подозрения. Дальнейший факт, выдвигаемый Эренгафтом, состоит в том, что в его работе очень часто появляются нормальные значения e [1]), тогда как случайные капли, дающие слишком низкие значения, составляют только часть всех данных. Этот факт также является знаменательным. В наших работах с каплями масла результаты отличались постоянством, и при повторении опыта они воспроизводились почти в точности. Эренгафт же и его ученики ни разу не опубликовали данных для таких двух частиц, которые бы дали одинаковое значения для e.

---

[1]) „Часто обнаруживаемые при некоторых условиях и при одинаковом способе получения значительные заряды на больших частицах приходится, повидимому рассматривать, как наиболее устойчивые пространственные распределения суб-электронов, получающиеся в определенных случаях“.— „Wien. Ber“. CXXIII. 59.

Вместо этого они находят только неправильности и беспорядочность [1]), т. е. как раз то, что можно ожидать для неоднородных частиц или для частиц с прилипшими к ним пылинками. После всего этого приходится только удивляться, почему придумывались какие-то объяснения, отличные от только что приведенного (присутствие посторонних примесей), объясняющего все затруднения. Во время нашей работы со ртутными каплями в Райэрсоновской лаборатории мы нашли, что первоначально быстрое испарение постепенно прекращается так, как будто капельки обволакиваются какой-то посторонней пленкой, которая мешает дальнейшему испарению. Шидлов и Карпович (Schidlof и Karpowicz) находят, что поведение их ртутных капель в отношении испарения одинаково в самом чистом азоте и в воздухе. Сам Эренгафт, говоря о Броуновском движении своих металлических частичек, указывает на то обстоятельство, что сначала они как будто производят бо́льшие движения, которые делаются меньше с течением времени [2]). Происходит, следовательно, то, что должно случиться, если радиус частиц увеличивается вследствие нарастания посторонней пленки.

Что же отвечает Эренгафт на эти весьма очевидные предположения относительно причины беспорядочности его результатов? Только то, что он избегал кислорода, и что, следовательно, пленка из окиси невозможна. Однако он получает свою металлическую частицу, зажигая электрическую дугу с металлическими электродами. Как всякий знает, при этом выделяются всякого рода окклюдированные газы. Кроме того, химическая активность в электрической дуге чрезвычайно повышена, так что является возможность для образования всякого рода высших нитратов, существование коих в газах, идущих из электрической дуги, на самом деле много раз было доказано. Далее Эренгафт говорит, что он фотографировал большие ртутные капли и нашел, что они сферические и свободны от окислов. То обстоятельство,

---

[1]) Сводка всех их данных находится в таблицах „Ann. d. Phys.", XLIV (1914), 693, и XLVI (1915), 292; советуем всем интересующимся этим спором потратить время на просмотр данных, приведенных на этих страницах, потому что сами эти данные настолько беспорядочны, что несостоятельность их видна и без спора.

[2]) „Я уже упоминал в моих предыдущих статьях, что ультра-микроскопические металлические частицы при наблюдении непосредственно после их образования обладают более оживленным Броуновским движением, чем через полчаса после этого". „Phys. Zeitschr.", XII. (1911) 98.

однако, что некоторые капли состоят из чистой ртути, еще не достаточное основание для того, чтобы считать все капли таковыми, особенно субмикроскопические капли, над которыми производились наблюдения.

Одним словом, произведенная Эренгафтом проверка сферичности и чистоты не имеет абсолютно никакой цены по отношению к тем частицам, о которых все время шла речь; их радиусы, согласно его оценке, порядка 10^{-6} *см* — величина раз в сто ниже предела резкого разрешения.

IV. Значение венских работ для вопроса о существовании суб-электрона.

Предположим все таки, что эти наблюдатели действительно работают с частицами из чистого золота и чистой ртути, как они сами думают, и что ошибки наблюдения и испарения не объясняют низких значений *Ne*. Какое же заключение можно законно вывести из их данных? Только то, и больше ничего, что, во первых, уравнение Эйнштейна для Броуновского движения не всегда применимо и, во вторых, что закон движения в воздухе таких маленьких заряженных частиц еще не вполне известен. Поскольку эти наблюдатели находят, как делает теперь Эренгафт, точные кратные отношения между зарядами, находящимися на данной частице, когда этот заряд изменяется от захвата частицей иона или от прямой потери электронов, постольку заряды их ионов должны быть такими же, как и те ионные заряды, которые я тщательно и точно измерил и которые я нашел равными $4{,}77 \times 10^{-10}$ электростатическим единицам. В самом деле, в своих опытах они ловят совершенно такие же ионы, возникшие притом совершенно таким же путем, как и те, которые я захватывал и измерял в своих опытах. Предполагать, что те же самые ионы обладают одним зарядом, когда их захватила большая капля, и другим зарядом, когда они садятся на маленькую каплю, очевидно бессмыслица. Если же садятся не те же самые ионы, то для того, чтобы примирить этот результат с точными кратными отношениями, найденными Эренгафтом так же, как и нами, необходимо предположить, что в воздухе существует бесконечное число ионных зарядов разного рода, отвечающих бесконечному числу возможных радиусов капель, при чем, когда мощное электрическое поле гонит эти ионы к данной капле,

эта капля выбирает в каждом случае как раз тот заряд, который соответствует ее определенному радиусу. Такое предположение не только слишком смешно для серьезного рассмотрения, но и прямо противоречит моим опытам, потому что я много раз подчеркивал, что при данном значении $\frac{e}{a}$, я получаю совершенно одинаковые величины e, все равно, работаю ли я с большими каплями, или с маленькими.

V. Новые доказательства постоянства *e*.

Для того, чтобы подвергнуть постоянство e самой тщательной проверке, я недавно произвел измерения такого же рода, как описанные до сих пор, но для размеров, примыкающих к тому интервалу размеров капель, в котором работает Эренгафт. Кроме того, я изменял в широких пределах состав и плотность как газа, так и капель. Рис. 13 (I) содержит новые данные для масляных капель в воздухе; рис. 13 (II) подобные же данные в водороде. Радиусы этих капель, вычисленные очень точным способом, приведенным в „Physical Review“ [1]), изменяются в десять раз, именно от 0,000 025 *см* до 0,000 23 *см*. Пределы Эренгафта от 0,000 008 до 0,000 025 *см*. Можно видеть, что эти капли падают во всех случаях на прямые рис. 13 I и II, а следовательно, они все дают совершенно одинаковые значения для $e^{\frac{2}{3}}$, а именно $61{,}1 \times 10^{-8}$. Подробности этих измерений совершенно подобны приведенным раньше, мы их опускаем; избранные данные, для четырех капель в водороде, помещены выше, в таблицах I, II, III и IV. Здесь нет и следа указания на то, что величина „*e*“ делается меньше с убыванием „*a*“. Точки на этих двух прямых изображают последовательные ряды наблюдений, при чем ни одна капля не была выброшена, ни в случае воздуха, ни в случае водорода. Это указывает на такую же полную однородность и постоянство, какие нам удалось получить раньше при работе с каплями масла.

В первоначальных опубликованных мною [2]) наблюдениях над каплями ртути этот результат был не совсем ясен. С тех пор я вполне подтвердил выведенные там заключения. На рис. 13 III показано, что соответствующими предосторожностями можно заставить ртутные

[1]) II (1913), 117.
[2]) „Phys. Rev.“. XXXII (1911), 389—90.

капли вести себя так же спокойно, как масляные; на этом рисунке изображены данные, полученные при вдувании облака ртутных капель, образованных конденсацией паров кипящей ртути, в камеру для

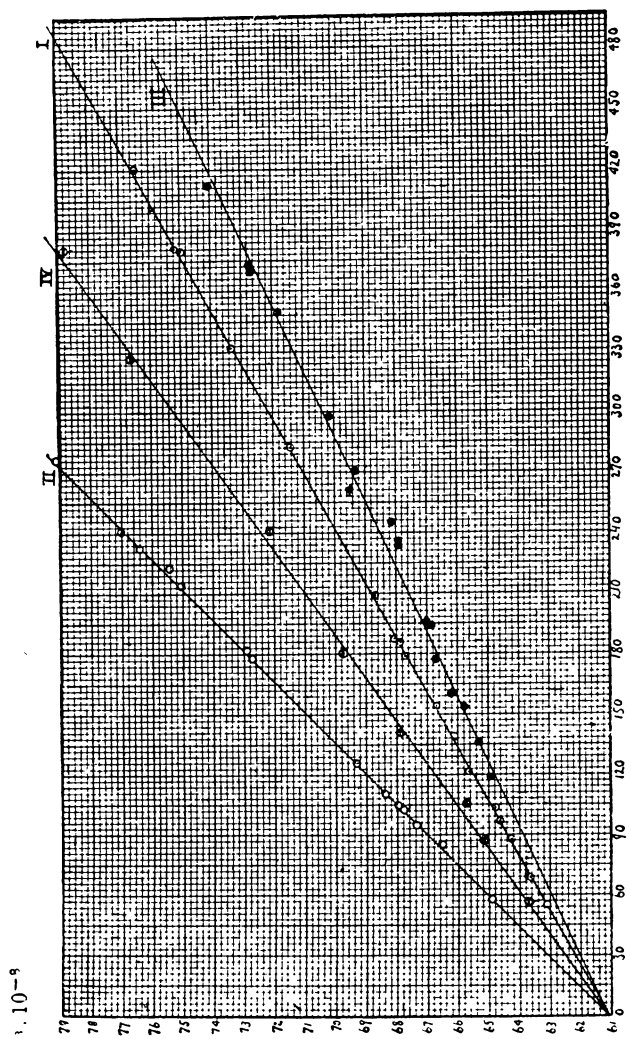

Рис. 13.

наблюдений, расположенную над отверстием в верхней пластине. Эти результаты были получены в Райэрсоновской лаборатории с моим прибором Джоном Б. Дерьэ (John B. Derieux). Так как давление здесь всегда было атмосферное, то капли оказываются распо-

ложенными в порядке возрастания величины слева направо, при чем диаметр самых больших раза в три больше диаметра самой маленькой, радиус которой равен 0,000 032 44 *см.* Остальные данные можно найти в „Physical Review", декабрь 1916. На рис 13 IV нанесены совершенно аналогичные данные, полученные с моим прибором д-ром Дж. И. Ли (J. Y. Lee) с твердыми шариками из шеллака, падавшими в воздухе[1]).

Эти результаты устанавливают с абсолютной убедительностью правильность утверждения, что кажущаяся величина электрона, вообще говоря, не является функцией газа, в котором падают частицы или вещества частицы, или радиуса капли, на которую садится электрон, даже если эта капля состоит из ртути и даже если она так же мала, как некоторые из тех, с которыми Эренгафт получил свои ошибочные результаты. Если для его капель это как будто и так, то нельзя находить причину этого в действительных флуктуациях заряда электрона, не отрицая совершенно достоверности моих результатов. Но в настоящее время эти результаты были проверены в существенной их части множеством наблюдателей, включая самого профессора Эренгафта. Далее, утверждение Эренгафта сталкивается не только с моими результатами. Оно не сходится и с опытами Резерфорда-Гейгера и Регенера над измерением зарядов, несомых частицами α и β. В самом деле, эти частицы неизмеримо меньше любой из частиц, наблюденных Эренгафтом; а если, как он утверждает, величина единицы, из которой составляется заряд, становится тем меньше, чем меньше емкость тела, на котором этот заряд находится, то заряды частиц α должны быть чрезвычайно малыми по сравнению с зарядами на наших каплях масла. Вместо этого, заряд частицы α оказывается ровно вдвое больше заряда измеренного мною в моих опытах с каплями масла.

Итак, всякое догматическое утверждение относительно существования или несуществования суб-электрона не согласно с духом и, методами современной науки; однако с полной уверенностью можно

---

[1]) Результаты, изображенные на рис. 13, не претендуют на точность, достигнутую в результатах, приведенных на таблице XI и рис. 10. При калибровании хроноскопа Гиппа (Hipp) и вольтметра здесь не принималось особых мер предосторожности; то, что наклон прямой I на рис. 13 не совсем согласуется с наклоном прямой рис. 10, происходит от небольших ошибок в этих калиброваниях, замеченных после.

утверждать, что в опытах Эренгафта нет ни малейшего указания на существование зарядов меньших, чем электрон. Если все его предположения относительно природы его частиц справедливы, то его опыты просто означают, что уравнение Эйнштейна для Броуновского движения не всегда справедливо и что закон движения очень малых частиц сильно отличается от того, который он предполагал. Весьма невероятно, чтобы из его опытов можно было вывести хоть один из этих результатов, потому что Нордлунд (Nordlund)[1]) и Вестгрен (Westgren)[2]) проверили уравнение Эйнштейна в жидкостях, с частицами гораздо меньших размеров, чем те, которые употребляет Эренгафт; а с другой стороны, хотя я и работал с частицами весьма малого радиуса, как, например, 2×10^{-5} *см*, и со значениями $\frac{l}{a}$, достигавшими 135 (что значительно превышает соответствующие значения в работах Эренгафта и его учеников), я до сих пор не нашел указаний на закон падения, существенно отличный от того, который я опубликовал в 1913 году.

Вплоть до настоящего времени не найдено никаких указаний на существование суб-электрона.

1) „Zeitschr. für Phys. Chem.", LXXXVII (1914), 40

2) Inaugural Dissertation von Arne Westgren, „Untersuchungen über Brownsche Bewegung". Stokholm, 1915.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ.

СТРОЕНИЕ АТОМА.

В предыдущих главах мы показали, каким образом в течение двух последних десятилетий за миром молекул и атомов девятнадцатого столетия был открыт совершенно новый мир электронов, который двадцать лет назад никому даже не снился. Мы видели, что эти электроны должны входить в состав каждого атома, потому что они могут быть оторваны рентгеновыми лучами от нейтральных атомов любого вещества. Представляют ли они единственные составные части атома или нет, — этого мы до сих пор и не пытались определить.

Мы ограничились изучением свойств самих электронов и нашли, что они бывают двух родов — положительные и отрицательные; оба они вполне одинаковы по силе заряда, но совершенно различны по инерции или массе, при чем отрицательный электрон обычно связывают с массой, равной всего лишь $\frac{1}{1845}$ массы самого легкого атома (водорода), тогда как положительный, повидимому, никогда не бывает связан с массой меньшей, чем масса атома водорода. Мы нашли, каким образом можно изолировать и точно измерить заряд электрона, и видели, что здесь ключ, открывающий доступ ко многим недостижимым иначе физическим величинам. Целью этой главы является рассмотрение нескольких других областей точного знания, которые были раскрыты измерением электрона. В частности, мы имеем в виду, во первых, разобрать то, что физик смог открыть относительно числа, размеров и расположения электронов внутри атома, когда он заглянул туда при помощи своих новых орудий: рентгеновых лучей, радиоактивности, ультрафиолетового света и т. д., и, во вторых, показать, насколько он подвинулся вперед в своем ответе на вопрос, построен ли атом исключительно из электронов или нет.

I. Размеры атомов.

Одним из результатов измерения зарядов электрона является возможность найти величину, называемую диаметром атома, с определенностью и точностью, до тех пор недостигнутой.

В главе V было показано, что определение e дает нам тотчас же знание точного числа молекул в кубическом сантиметре газа. Прежде, чем это стало известно, существовали довольно удовлетворительные сведения об относительных диаметрах различных молекул, потому что в продолжение ста лет было известно, что при одинаковом давлении и температуре число молекул в каждом кубическом сантиметре для всех газов одинаково (закон Авогадро). Молекулы газа вечно носятся взад и вперед и сталкиваются одна с другой и со стенками сосуда, в котором они содержатся; отсюда следует, что среднее расстояние, пробегаемое какой-нибудь из молекул между столкновениями с ее соседями, будет зависеть от ее величины. Чем больше диаметр, тем меньше будет среднее расстояние между столкновениями — величина, называемая „средним свободным пробегом".

В самом деле, не трудно видеть, что в различных газах средний свободный пробег l обратно пропорционален поперечному сечению молекулы. Точное соотношение выводится очень легко (смотри приложение E). Вот оно:

$$l = \frac{1}{\pi n d^2 \sqrt{2}}, \tag{31}$$

где d есть диаметр молекулы, а n — число молекул в кубическом сантиметре газа. Давно уже существовали способы для измерения l, потому что от этой величины главным образом зависит коэффициент внутреннего трения газа. Поэтому, после того, как измерена вязкость различных газов, мы можем вычислить соответствующие l, а затем из уравнения (31) относительные диаметры d, так как n одно и то же для всех газов (при одинаковых температуре и давлении). Абсолютное же значение d может быть найдено только в том случае, если известно абсолютное значение n. Если мы подставим в уравнение (31) значение n, найденное по величине l по способу, описанному в главе V, то мы найдем, что средний диаметр атома одноатомного газа гелия равен 2×10^{-8} *см*, диаметр молекулы двух атомного водорода несколько больше, тогда как диаметры молекул

двухатомных газов кислорода и азота, на 50 процентов больше [1]). Отсюда, диаметр одного атома водорода получился бы немного меньше, а диаметр одного атома кислорода или азота немного больше диаметра атома гелия. Под средним молекулярным диаметром мы понимаем исключительно только среднее расстояние, на которое сближаются центры двух молекул во время столкновений, непрерывно происходящих в связи с тепловыми движениями молекул газа.

Когда при тепловом движении центры тяжести двух молекул сближаются на расстояние около 2×10^{8} *см*, они отскакивают друг от друга. Как мы сейчас увидим, причина этого вероятно та, что атом есть система с отрицательными электронами во внешней области. Когда эти отрицательные электроны в двух различных системах, которым предстоит столкнуться, приближаются на это расстояние, начинает действовать отталкивание между одинаково заряженными телами, хотя на большом расстоянии атомы почти не отталкиваются. При уменьшении расстояния это отталкивание увеличивается очень быстро, пока оно не сделается настолько большим, что преодолевает инерцию систем и расталкивает их в разные стороны.

II. Радиус электрона из электромагнитной теории происхождения массы.

Первая оценка объема занимаемого единичным электроном, входящим в состав атома, была получена из электромагнитной теории происхождения массы, и поэтому являлась в большой степени только предположительной. Но этот расчет поразительно согласуется с результатами, независящими ни от какой теории, и, кроме того, он представляет большой философский и исторический интерес. Поэтому мы коротко излагаем также и этот вопрос.

Роуланд (Rowland) доказал, что движущееся заряженное тело есть электрический ток, величина коего пропорциональна скорости движения заряда; электрический ток, благодаря свойству, называемому самоиндукцией, сопротивляется всякой попытке увеличить или уменьшить его силу; поэтому совершенно ясно, что электрический заряд, как таковой, обладает свойством инертности. Но инерция есть единственное неизменяемое свойство материи. Это количественная мера материи; материя же, рассматриваемая количественно, есть

[1]) R. A. Millican. „Phys. Rev.". XXXII (1911). 397.

масса. Поэтому теоретически ясно, что бузинный шарик, заряженный электричеством, должен обладать большей массой, чем тот же самый шарик, когда он не заряжен. Но если мы расчитаем, на сколько увеличится масса бузинного шарика каким-нибудь зарядом, который мы действительно можем ему сообщить, то мы увидим, что это увеличение так мало, что оно безнадежно находится за пределами возможности обнаружения на опыте. Однако, самый способ вычисления, впервые указанный сэром Дж. Дж. Томсоном (J. J. Thomson) в 1881 году[1]) безусловно правилен, так что мы можем быть вполне уверенными в правильности результата. Далее, если мы сопоставим это открытие инертности электрического заряда с тем открытием, что все электрические заряды состоят из электрических частиц, одинаковых по зарядам, то мы сделаем вполне законным вывод, что электрический ток есть прохождение через проводник определенного, материального вещества зернистого строения. Другими словами, две величины, электричество и материя, которые девятнадцатое столетие старалось отделить друг от друга, начинают представляться как два различных вида одной и той же вещи.

Обосновав таким образом утверждение, что электричество материально, имеем ли мы, однако, хоть какие-нибудь указания на то, что всякая материя есть электричество, т. е. что всякая инерция того же происхождения, как инерция электрического заряда? Ответ тот, что у нас есть указания, но еще нет доказательств. Теория, утверждающая это, — пока только предположение, но основанное на очень многозначительных фактах. Эти факты следующие.

Если бузинный шарик сферичен и радиус его a, то масса m, происходящая от заряда E, равномерно распределенного по его поверхности, выражается, как показано в приложении D, так:

$$m = \frac{2}{3}\frac{E^2}{a}, \tag{32}$$

Главный интерес этого результата в том, что масса обратно пропорциональна радиусу, так что, чем меньше шарик, на котором мы можем сосредоточить данный заряд E, тем больше масса этого заряда. Поэтому, если бы мы имели какую-нибудь возможность измерить крошечное увеличение массы бузинного шарика, заряжен-

[1]) „Phil. Mag.", XI (1881), 229.

ного известным нам количеством электричества E, то мы могли бы вычислить из уравнения (32) размеры бузинного шарика, даже если бы не могли его видеть или измерить каким-нибудь другим способом. В таком же положении мы находимся по отношению к электрону. Мы можем измерить его массу и находим, что она в точности равна $\frac{1}{1845}$ массы водородного атома. Мы точно измерили его заряд e и можем вычислить отсюда радиус a эквивалентной сферы, т. е. сферы, на которой надо равномерно распределить e, чтобы она имела наблюдаемую массу, если только мы предположим, что вся масса электрона обусловлена его зарядом. Оправдания для этого предположения существуют двоякого рода. Мы нашли, во первых, что электроны входят в состав всех атомов и что масса есть свойство электрического заряда, поэтому в интересах простоты можно предположить, что вся масса атома происходит от находящихся в нем электрических зарядов; это проще, чем предполагать, что существуют две массы совершенно различного свойства, одна электрического происхождения, и какая-то другая. Во вторых, если масса отрицательного электрона исключительно электрического происхождения, то мы можем показать на основании электромагнитной теории, что эта масса должна быть практически независимой от скорости, с которой электрон случайно движется; если только эта скорость не приближается к скорости света. Но, начиная приблизительно от одной десятой скорости света, вплоть до этой самой скорости, масса должна изменяться с увеличением скорости по совершенно определенному, известному наперед, закону.

Для проверки этой теории представляется на редкость счастливый случай; а именно, оказывается, что радий действительно испускает отрицательные электроны, скорости коих можно точно измерить. Эти скорости изменяются от трех десятых до девяносто восьми сотых скорости света. Далее, одно из замечательных открытий двадцатого столетия[1]) состоит в том, что в этих пределах наблюденный ход изменений массы отрицательного электрона со скоростью в точности совпадает с ходом изменений, вычисленным в предположении, что вся эта масса целиком электрического происхождения. Это не оставляет места для массы какого-либо другого рода, связанной со свободным

[1]) Bucherer. „Ann. d. Phys.“, XXVIII (1909), 513.

отрицательным электроном. Таковы опытные данные в пользу электрического происхождения массы [1]).

Решая уравнение (32) относительно a, мы находим, что радиус сферы, на которой должен быть распределен заряд e отрицательного электрона, чтобы обладать наблюдаемой массой, равен только 2×10^{-13} *см* или одной пятидесятитысячной радиуса атома (10^{-8} *см*). С этой точки зрения, отрицательный электрон представляет собой электрический заряд, сосредоточенный в чрезвычайно малом объеме действительно, отношение радиуса электрона к радиусу атома равно отношению радиуса земли к радиусу ее орбиты вокруг солнца.

В случае положительного электрона предположение, что его масса также исключительно электрического происхождения, не имеет прямого опытного подтверждения, потому что мы не можем сообщать положительным электронам скорости, приближающиеся к скорости света; до сих пор мы не нашли еще в природе ни одного из них, обладающего скоростью большей, чем одна десятая скорости света. Однако, в виду опытных результатов, достигнутых с отрицательными электронами, вполне естественно перенести то же предположение и на положительный электрон. Далее, если этот шаг сделан, то из уравнения (32) ясно, что a для положительного электрона может составлять только $^1/_{2000}$ того значения, которое получается для отрицательного, ибо для положительного электрона m почти в две тысячи раз больше, чем для отрицательного. Другими словами, величина положительного электрона по сравнению с размерами отрицательного такая же, как величина шара радиусом в 3 километра по сравнению с размерами земли. Итак, с точки зрения электромаг-

---

[1]) Если оставаться на почве классической теории, то закон изменения массы электрона со скоростью может получиться различным, в зависимости от сделанных добавочных гипотез [гипотезы Абрагама (Abraham) и Лоренца-Фицджеральда (Lorentz, Fitzgerald)]. Если же встать на точку зрения теории относительности, то закон получается однозначно, и при том такой, который с большой точностью подтверждается на опыте [Опыты Гюи и Лаванши (Guye, Lavanchy). „Arch. des Sc. Phys. et Nat.", XLII. pp. 287, 353, 441. Женева, 1916; см. также реферат С. Фриша в „Успехах Физических Наук", том III. вып. 1. стр. 89. Москва. 1922]; далее, по теории относительности этому закону подчиняется какая угодно масса, независимо от ее происхождения, так что нет возможности отличить „электромагнитную" массу от „обыкновенной", и в том факте, что масса подчиняется этому закону, нельзя уже видеть доказательства ее электрического происхождения, как это делает автор. *Прим. перев.*

нитной теории происхождения массы размеры отрицательных и положительных составных частей атома по сравнению с величиной самих атомов подобны размерам планет и астероидов по сравнению с размерами всей солнечной системы. Все эти вычисления, какова бы ни была их цена, возможны лишь потому, что известно e.

Теперь мы знаем из способов, не имеющих ничего общего с электромагнитной теорией массы, что чрезвычайно малые размеры, предсказанные этой теорией как для положительной, так и для отрицательной составной части атома, в действительности правильны хотя мы и не имеем никаких данных для суждения о правильности вышеприведенных соображений.

III. Непосредственное экспериментальное доказательство чрезвычайной малости электронов, составляющих атом.

Уже свыше десяти лет мы имели прямое экспериментальное доказательство [1]) того, что самые быстрые из частиц α, или атомов гелия, выбрасываемые радием, пронизывают почти по прямым линиям до 7 *см* воздуха при атмосферном давлении, прежде чем остановиться. Недавно были найдены частицы α, пролетающие 11,3 *см* [2]).

Рис. 14.

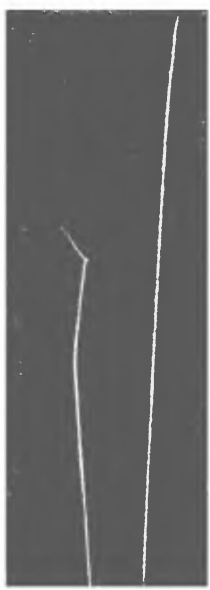

Рис. 15.

[1]) Bragg. „Phil. Mag.", VIII (1904). 719. 726; X (1905), 318: XI (1906). 617.
[2]) Rutherford and Wood. „Phil. Mag.", XXXI (1916). 379.

Рис. 14 и 15 изображают действительные фотографии траекторий таких частиц. Мы знаем также по причинам, приведенным на стр. 109, что эти частицы α не проходят через воздух как пуля, т. е., расталкивая молекулы воздуха в стороны, а наоборот, они действительно пронизывают все молекулы воздуха, которые они встречают. Число таких прохождений сквозь молекулы, которые должна совершить частица α на своем пути в 7 *см*, составляет около полумиллиона.

Далее, уже раньше было известно, что очень быстрые частицы β, или отрицательные электроны, выбрасываемые радием, пролетают по прямым линиям расстояния еще большие, чем 7 *см*; они даже могут пройти практически без отклонения значительные толщи стекла и металла.

Мы видели в главе VI, что траектории частиц α и β в воздухе могут быть сфотографированы, потому что частицы ионизуют некоторые молекул, сквозь которые они проходят. Эти ионы обла-

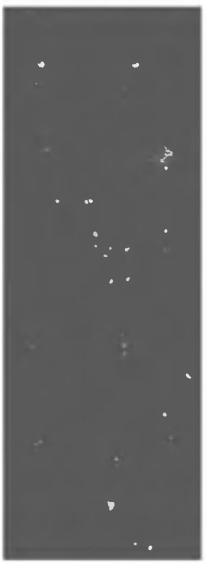

Рис. 16.

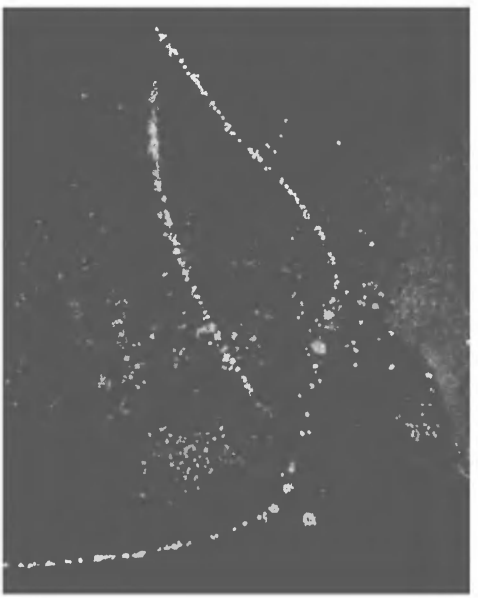

Рис. 17.

дают способностью конденсировать вокруг себя пары, так что образуются водяные капли, которые можно сфотографировать благодаря отражаемому ими свету. Рис. 16 изображает след луча β очень

большой скорости. Немного вправо от средины фотографии можно провести прямую линию снизу вверх; она пройдет через дюжину или около того, точек. Эти точки—как раз те водяные капельки, которые образуются на ионах, возникших в этих местах. Так как мы знаем размеры молекулы и число молекул в кубическом сантиметре, мы можем вычислить, как и в случае частицы α, число молекул, сквозь которые должна пройти частица β при прохождении данного расстояния. Поразительное обстоятельство, выяснившееся из таких фотографий, заключается в том, что частица β должна в среднем пронизать 10 000 атомов, прежде чем она подойдет к одному из электронов, составляющих эти атомы, настолько близко, чтобы оторвать его от остальной системы и образовать ион. Это с убедительностью показывает, что электроны, или другие составные части атома, могут занимать только чрезвычайно малую долю пространства, заключенного внутри атомной системы. Для электрона, летящего с такой невероятной быстротой, практически все это пространство должно быть пустым.

На воспроизводящем другую фотографию рисунка 17 виден след отрицательного электрона гораздо меньшей скорости. Можно заметить, во первых, что он ионизует гораздо чаще, и во вторых, что вместо того, чтобы продолжать идти по прямой линии, он в некоторых местах отклоняется от своего первоначального направления. Причину обоих этих фактов можно легко вывести из рассуждений стр. 109, которые можно распространить на этот случай следующим образом.

Положим, что новая планета, или другое сравнительно небольшое тело, пронизывает с умопомрачительной скоростью нашу солнечную систему. Время, которое оно проведет внутри нашей системы, будет настолько мало, что сила между ним и землей или другим членом солнечной системы не будет иметь времени отклонить пришельца от его пути, или сдвинуть землю с ее орбиты. Если бы скорость постороннего тела была меньше, то результат был бы более роковым как для членов нашей солнечной системы, так и для пути постороннего тела; двигаясь медленнее, оно будет иметь гораздо больше случаев выбить одну из планет из нашей солнечной системы, а также и гораздо больше шансов отклониться самому от прямого пути. Чем медленнее движется отрицательный электрон, тем больше он подвержен отклонению и тем чаще он ионизует молекулы, сквозь которые проходит.

Этот вывод находит себе прекрасное экспериментальное подтверждение в трех снимках на рисунках 18, 19 и 20; давно было известно, что скорость отрицательных электронов, которые рентгеновыми лучами выбрасываются из атомов, гораздо меньше скорости лучей β, испускаемых радием; зигзагообразные следы на этих снимках изо бражают пути частиц. Отсюда видно, что они отклоняются гораздо чаще и ионизуют гораздо больше, чем лучи, изображенные на рисунках 16 и 17.

Однако изучение путей частицы α (рис. 14 и 15), может пролить еще более яркий свет на строение атома. Частица α, в качестве атома гелия, в 8000 раз массивнее отри-

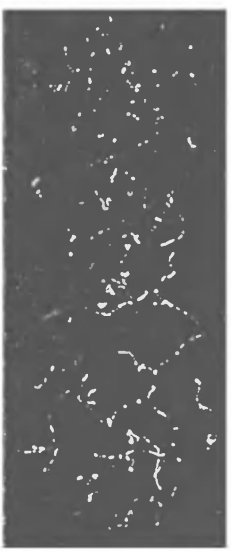

Рис. 18.

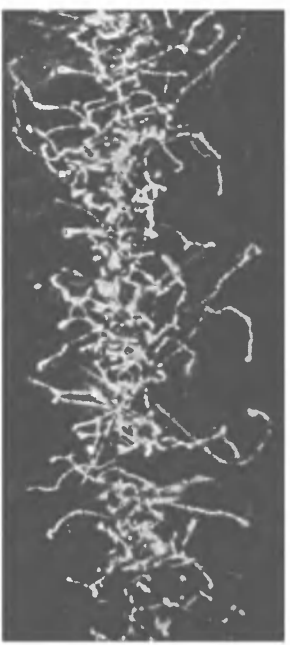

Рис. 19.

цательного электрона; поэтому она может быть отклонена одним из них, находящимся внутри атома, пронизываемого частицей α, не больше, чем пушечное ядро может быть отклонено горошиной. Однако, рис. 14 и 15 показывают, что к концу пути частица α обычно претерпевает несколько внезапных отклонений. Такие отклонения могут быть вызваны только мощным силовым центром внутри атома, масса коего должна быть, по крайней мере, сравнима с массой атома гелия.

Эти резкие отклонения, достигающие иногда 150° и даже 180°, в сильной степени поддерживают мнение, что атом состоит из тяжелого положительно заряженного ядра, вокруг которого сгруппировано достаточно электронов, чтобы весь атом в целом был нейтральным. С другой стороны, тот факт, что в этих опытах частица α проходит сквозь 500 000 атомов, не подходя более двух или трех раз к центральному ядру настолько близко, чтобы претерпеть заметное отклонение, составляет весьма убедительное свидетельство того, что это центральное ядро, удерживающее отрицательные электроны в атомной системе, занимает исключительно малый объем, такого же порядка величины, какой был нами вычислен из электромагнитной теории массы для положительного электрона. Действительно, Резерфорд, зная из непосредственных наблюдений скорость частицы α, вычислил[1]) с помощью закона обратных квадратов (справедливого, как известно, для заряженных тел малых размеров по сравнению с расстоянием между ними), насколько близко частица α подойдет к ядру тяжелого атома, например, атома золота, прежде чем она принуждена будет повернуть обратно по тому же пути (смотри приложение *F*). В случае золота, одного из самых тяжелых атомов, результат получился около 10^{-12} *см*, а в случае водорода, самого легкого атома, — около 10^{-13} *см*. Это только верхние пределы для размеров ядра.

Рис. 20.

Итак, хотя мы можем быть и очень неуверены в размерах положительного и отрицательного электронов, вычисленных из электромагнитной теории массы, все таки мы можем считать вполне установленным такими непосредственными опытами, как описанные выше, тот факт, что эти электроны, составляющие атомы, настолько же малы по сравнению с размерами атомных систем, насколько солнце и планеты малы по сравнению с размерами солнечной системы. В самом деле, примем во внимание, что мы можем заставлять атомы гелия пронизывать миллиардами тонкостенную стеклянную трубку с высокой степенью разрежения, нисколько не нарушая при этом вакуума и не размягчая стекла.

---

[1]) „Phil. Mag.“. XXI (1911). 669.

Из этого одного видно, что самый атом должен состоять большею частью из „пустого места"; другими словами, что атом как и солнечная система должен обладать чрезвычайно рыхлым строением, и его непроницаемые части необычайно малы по сравнению с проницаемыми частями; представление о том, что атом может присвоить себе все пространство, заключенное в его границах, недопуская ничего постороннего, вполне опровергается этими опытами. Несомненно, что данный атом может занимать одно и то же пространство одновременно с любым другим атомом, если только он обладает достаточной кинетической энергией. Однако, такие энергии, какие соответствуют тепловым движениям молекул, не достаточны, чтобы дать возможность одному атому проникнуть за границы другого; отсюда и кажущаяся непроницаемость атомов в обычных механических опытах. Тем не менее существует часть атома, совершенно непроницаемая даже для частиц α; это вполне доказано опытами подобными, только что описанным; в самом деле, иногда случается, что частица α ударяяет ядро прямо „в лоб", и когда это с ней случается, то она возвращается обратно по тому же пути. Как было указано выше, размеры этой непроницаемой части, которые можно определить, как размеры ядра, ни в коем случае не больше $^1/_{10000}$ диаметра атома.

IV. Число электронов в атоме.

Если считать достаточно хорошо установленным только что описанными опытами, что атом состоит из тяжелого, но очень маленького положительно заряженного ядра, удерживающего вокруг себя определенным образом расположенные легкие отрицательные электроны, тогда число отрицательных электронов вокруг ядра должно быть таким, чтобы полный их заряд был равен полному заряду ядра; иначе атом не мог бы быть нейтральным.

Положительный заряд ядра был приближенно определен таким путем: пользуясь тем, что нам известно (благодаря определению c) относительно точного числа атомов в данном объеме данного вещества, сэр Эрнест Резерфорд[1]) первый вычислил вероятность отклонения на данный угол единичного атома гелия, летящего с известной скоростью сквозь золотой листочек, содержащий известное число атомов на единицу площади. Это вычисление можно легко сделать, выражая вероятность через известную кинетическую энергию и заряд частицы α через известное число ато-

[1]) „Phil. Mag.". XXI (1911), 669—88.

мов в золотом листочке и через неизвестный заряд ядра атома золота (смотри приложение *F*). Послс этого Гейгер и Марсден (Geiger и Marsden) [1]) действительно сосчитали в лаборатории Резерфорда при помощи вспышек, появляющихся на экране из сернистого цинка, какая часть, скажем, тысячи частиц α, выброшенных нормально к золотому листочку, отклонилась на данный угол: из этого наблюденного числа и из теории Резерфорда они получили число свободных положительных зарядов на ядре атома золота.

Повторяя опыт и вычисления с листочками, сделаными из целого ряда других металлов, они нашли, что во всех случаях число свободных положительных зарядов на атомах различных веществ приблизительно равно половине атомного веса. Это значит, что атом алюминия, например, обладает ядром, содержащим около тринадцати свободных положительных зарядов, а ядро атома золота содержит их около сотни. Этот результат прекрасно согласовался с заключениями, к которым независимо пришел Баркла (Barkla) [2]), на основании опытов над рассеянием рентгеновых лучей. Они показали, что число рассеивающих центров в атоме, — т. е. число свободных отрицательных электронов, — равно приблизительно половине атомного веса. А это число, конечно, должно равняться числу свободных положительных электронов в ядре.

V. Замечательное открытие Мозелея.

Предыдущий результат был только приблизительным. Уже из самой работы Гейгера и Марсдена следовало, что для тяжелых атомов число электронов несколько меньше половины атомного веса. Совершенно точный и определенный ответ на этот вопрос был получен благодаря замечательной работе молодого талантливого англичанина, проделавшего в возрасте двадцати семи лет одно из самых важнейших исследований в области физики, появившихся за последние пятьдесят лет. Этот выдающийся физик недавно пал жертвой ужасного преступления — современной Европейской войны. Он был убит наповал в окопах летом 1915 года на полуострове в Галлиполи.

Лауэ (Laue), в Мюнхене, в 1912 году предложил воспользоваться правильным расположением молекул в кристалле для анализа эфирных волн очень короткой длины волны, пользуясь принципом диф-

[1]) Ibid. XXV (1913), 604.
[2]) Barkla, „Phil. Mag.“, XXI (1911), 648.

фракционной решетки; такими лучами являлись по предположению рентгеновы лучи. Два английских исследователя Брэгги (Bragg) [1] не только усовершенствовали спектрометр для рентгеновых лучей, но и точно измерили для ряда металлов длины волны рентгеновых лучей, характерных для данного металла. Точность, с которой это можно сделать, ограничена по просту точностью в определении *e*, так что вся новая область спектрометрии рентгеновых лучей делается доступной благодаря точному знанию величины *e*. Мозелей (Moseley) [2] изучал характеристические рентгеновы лучи, возбуждаемые при ударе катодных лучей об антикатоды, состоявшие последовательно из большей части известных элементов; в результате этого кропотливого и трудного исследования Мозелей и сделал свое открытие, состоявшее в том, что характеристические лучи различных элементов, или, лучше, их характеристические частоты, связаны очень простым и очень многозначительным образом.

Он нашел, что эти частицы составляют арифметическую прогрессию такого же вида, как мы нашли для зарядов на наших каплях масла. Собственно говоря, это прекрасное по простоте соотношение оправдывается на корнях квадратных из частот, а не на самых частотах, но это не существенно. Замечательно то обстоятельство, что если расположить все известные элементы, которые только были исследованы, в порядке возрастающих частот их характеристических рентгеновых спектров, то они составят простой арифметический ряд, в котором каждый член получается из предыдущего прибавлением всегда одной и той же величины. На рис. 21a и b помещены фотографические снимки рентгеновых спектров некоторых элементов; атомные номера, — т. е. числа, приписанные им на основании Мозелеевского расположения по возрастающим частотам рентгеновых лучей — написаны слева. Эти снимки были сделаны Зигбаном (Siegbahn) [3]. Расстояние от „центрального изображения", — в этом случае от черной черты слева, — до данной линии спектра справа, приблизительно пропорционально длине волны, дающей эту линию. Эти снимки прекрасно показывают, во первых, что атомы всех элементов дают спектры совершенно

[1] Bragg, „X-rays and Crystal Structure", 1915 (Русский перевод проф. Г. Вульфа, 1916).

[2] „Phil. Mag.", XXVI (1912), 1024; XXVII (1914), 703.

[3] „Jahrbuch der Radioaktivität u. Elektronik", XIII (1916), 326.

одинакового типа; во вторых, что длины волн соответствующих линий убывают, или частоты возрастают, с возрастающим атомным номером. Рис. 21а дает эту картину для лучей с наибольшими частотами, какие могут давать атомы,—так называемую серию K,—тогда как (рис. 21 b) дает ту же самую картину для лучей следующих по величине частот, а именно, для лучей серии L, обладающих длинами волн от семи до восьми раз большими, чем у серии K. На рис. 22 и 23 изо-

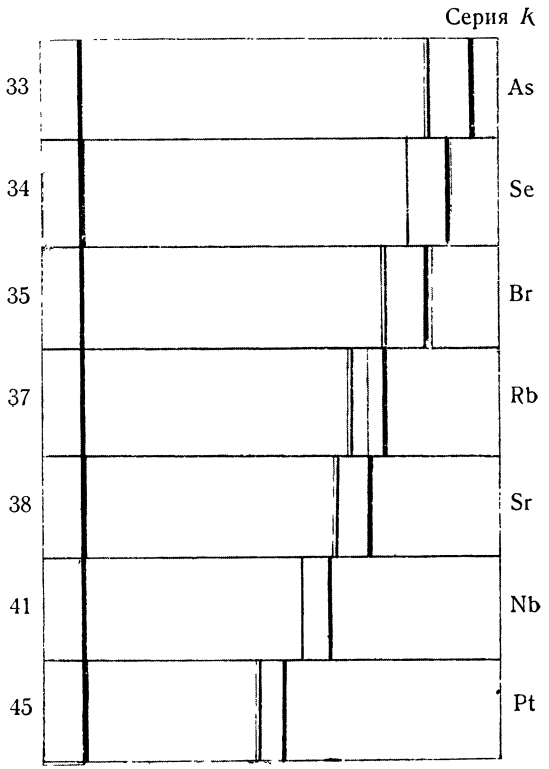

Рис. 21 а. Фотография спектров характеристических рентгеновых лучей. (По Зигбану).

бражены несколько прекрасных фотографий, снятых де Брольи (De Broglie)[1]) в Париже в октябре 1916 года. Рис. 22 представляет рентгеновское излучение вольфрама. Оно состоит из непрерывного излучения соответствующего так называемому „белому свету", это излуение служит фоном всего спектра; на него наложены две

[1]) „Comptes rendus", CLXV (1916), 87, 352.

группы линий. Обе линии K здесь очень близки к центральному изображению, потому что здесь длины волн K очень малы, так как атомный номер вольфрама весьма велик (74). Дальше вправо находятся линии серии L вольфрама, которые можно узнать по их сходству с серией L на рис. 21b. Между линиями K и линиями L находится две границы поглощения, обозначенные $\underset{K_A}{\mathrm{Ag}}$ и $\underset{K_A}{\mathrm{Br}}$. Первая изображает частоту, выше которой серебро поглощает все общее излучение вольфрама, лучи с меньшими частотами пропускаются. Граница $\underset{K_A}{\mathrm{Br}}$ соответствует брому. На отпечатке с фотографического снимка поглощение на самой пластинке, очевидно, представляется как потемнение, а пропускание как свет. Ниже находится

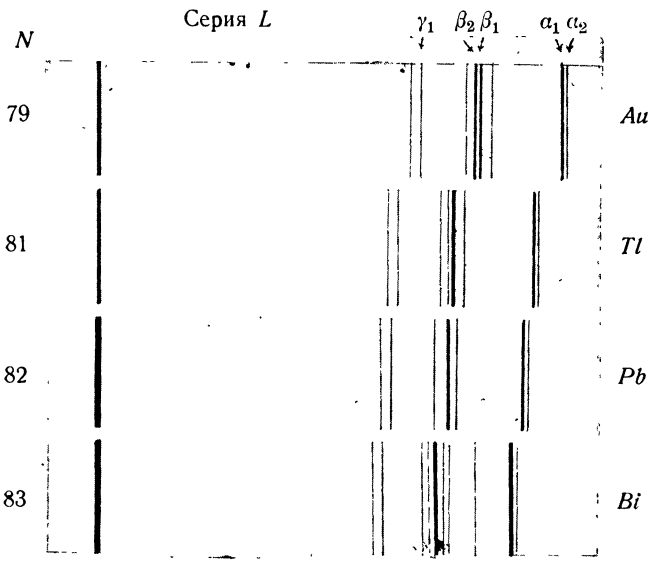

Рис. 21b. Фотография спектров характеристических рентгеновых лучей. (По Зигбану).

спектр, полученный при вдвигании на пути лучей, т. е. перед щелью спектрометра, листка молибдена. Очевидно, что поглощение в молибдене представится, как просветление, прохождение через молибден — в виде потемнения. Можно заметить, что молибден поглощает все частоты рентгеновского излучения вольфрама, большие некоторой, определенной частоты, и пропускает все частоты, меньшие этой величины. Это замечательное свойство поглощения

рентгеновых лучей было открыто Баркла (Barkla)[1]) в 1909 году. Граница поглощения, начиная с которой поглощение внезапно

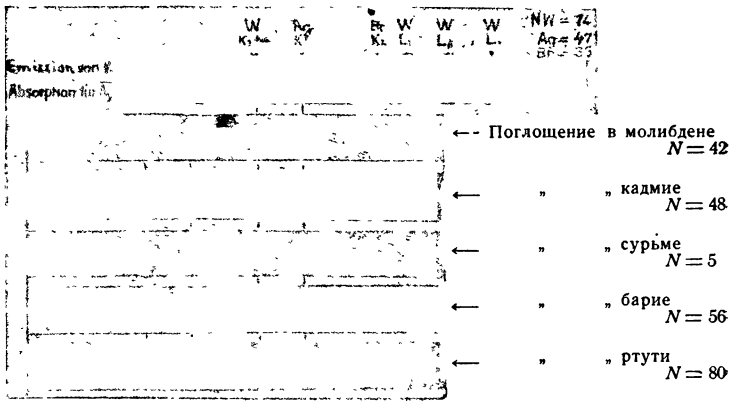

Рис. 22. Спектры поглощения рентгеновых лучей. Серия *K*. (По де-Брольи).

1. Спектр излучения вольфрама (Атомный номер $N=74$).
„ поглощения для серебра („ „ $N=47$).
„ „ „ брома („ „ $N=35$).
2. „ „ в молибдене („ „ $N=42$).
3. „ „ „ кадмие („ „ $N=48$).
4. „ „ „ сурьме („ „ $N=51$).
5. „ „ „ барие („ „ $N=56$).
6. „ „ „ ртути („ „ $N=80$).

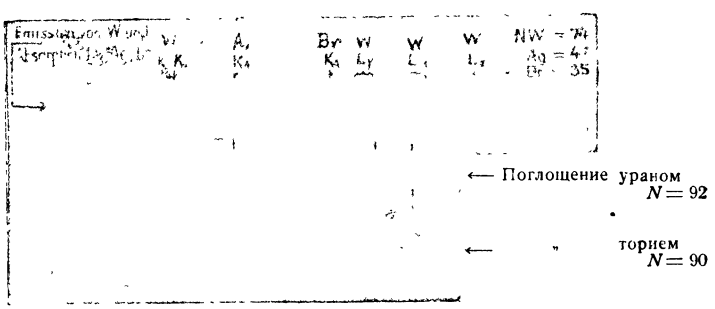

Рис. 23. Спектры поглощения рентгеновых лучей. Серия *L*. (По де-Брольи).

1. Спектр излучения вольфрама (Атомный номер $N=74$).
„ поглощения для серебра („ „ $N=47$).
„ „ „ брома („ „ $N=35$).
2. „ „ в уране („ „ $N=92$).
3. „ „ „ торие („ „ $N=90$).

---

[1]) Barkla and Sadler, „Phil. Mag.“, XVII (May, 1909), 749.

появляется при увеличении частоты, обозначена очень резко. Как будет сейчас показано, эта граница совпадает с наибольшей частотой излучения молибдена. Де Брольи тщательно измерил эти критические частоты поглощения для всех тяжелых элементов вплоть

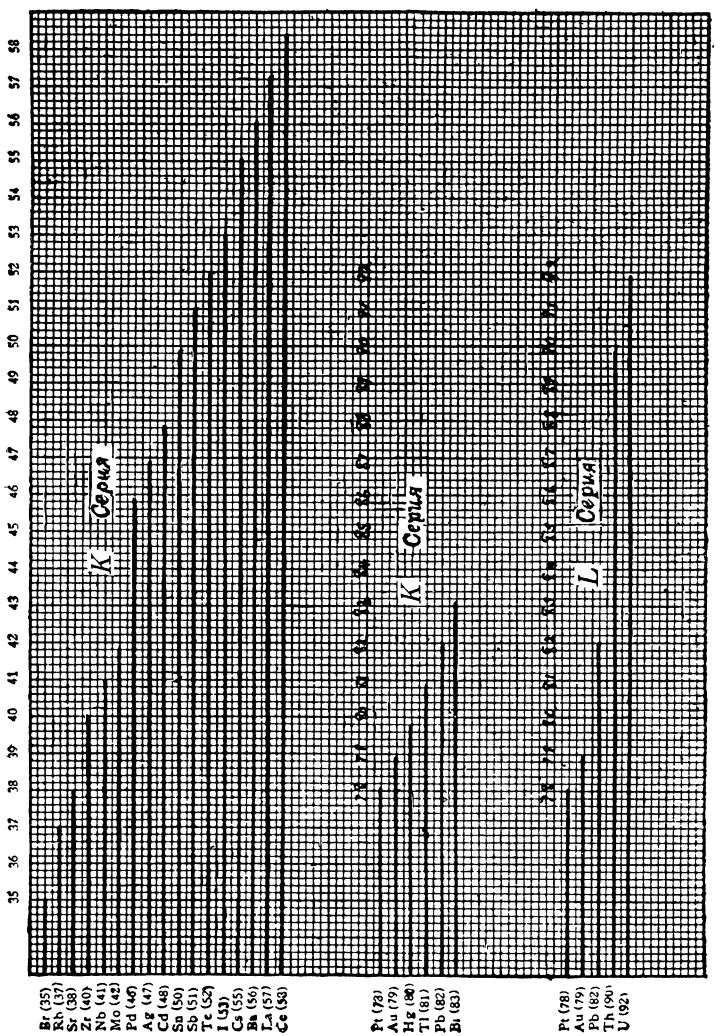

Рис 24.

до тория, распространив таким образом серии K от атомного номера $N = 60$, где он нашел ее, до $N = 90$; это уже значительный шаг вперед. Две границы поглощения, характерные для серебра и для брома в фотографической пластинке, появляются на том же

месте на всех снимках, на которых они могут появиться. Другие границы поглощения изменяются от элемента к элементу; каждая из них характерна для ее определенного элемента. На снимках де-Брольи прекрасно видно, каким образом это критическое поглощение постепенно с увеличением атомного номера смещается к „центральному изображению“ вдоль ряда Br 35, Mo 42, Ag 47, Cd 48, Sb 51, Ba 56, W 74, Hg 80, вплоть до ртути, у которой граница поглощения находится немного позади самого короткого характеристического изучения серии K вольфрама. Между ртутью ($N = 80$) и ураном ($N = 92$) должно быть еще 12 таких границ поглощения, и де Брольи измерил их вплоть до тория. Однако, установить их в этой области частот серии K делается очень трудно вследствие их близости к „центральному изображению“. Но тогда можно воспользоваться излучением L. длина волны коего в семь раз больше; рис. 23 изображает границу поглощения лучей серии L, как ее получил де Брольи для урана и для тория. Таким образом положение каждого элемента в таблице Мозелея установлено на опыте для всех элементов вплоть до самого тяжелого — урана. Рис. 24 изображает арифметическую прогрессию корней квадратных из частот, какой она представляется из измерений снимков де Брольи. Нужно заметить, что на протяжении от брома (35) до урана (92) длина ступени изменяется на несколько процентов. Вероятную причину этого мы рассмотрим дальше.

Данные, приведенные на таблице XV показывают, что граница поглощения лучей серии K совпадает чрезвычайно близко во всех случаях с наиболее короткой линией K испускания поглощающего вещества, а в случае серии L одна из двух границ поглощения всегда совпадает с самой короткой линией β серии L. Другая граница поглощения области L также совпадает в каждом случае с линией испускания, хотя пока данные еще настолько скудны, что не позволяют вывести общего заключения в том, какая именно это линия.

Эти чрезвычайно большие частоты рентгеновых лучей вероятно происходят от колебаний электронов, находящихся в необычайных силовых полях, каких можно ожидать во внутренних частях атома по близости от ядра; поэтому открытие Мозелея наводит на мысль что заряд ядра в случае каждого атома получается путем прибавления некоторого определенного заряда к ядру атома предшествующего ему в таблице Мозелея. Это предположение весьма сильно подтверждается тем, что Мозелеев ряд возрастающих частот рентгеновых лучей, за одним или двумя незначительными

Таблица XV.

Сравнение K_α и K_β.

№	Элемент	K_α	K_β	№	Элемент	K_α	K_β
35	Br	0,914	0,914	53	J	0,367	(0,380)
37	Rb	0,810	0,813	55	Cs	0,338	(0,345)
38	Sr	0,764	0,767	56	Ba	0,325	(0,333)
40	Zr	0,681	(0,695)	57	La	0,310	(0,319)
41	Nb	0,645	0,657	58	Ce	0,298	(0,304)
42	Mo	0,611	(0,620)	78	Pt	0,150	—
46	Pd	0,503	0,503	79	Au	0,147	—
47	Ag	0,479	0,488	80	Hg	0,143	—
48	Cd	0,458	(0,466)	81	Tl	0,139	—
50	Sn	0,419	(0,419)	82	Pb	0,135	—
51	Sb	0,399	0,408	83	Bi	0,130	—
52	Te	0,383	(0,396)	90	Th	0,098 (приблиз.)	—

Сравнение L_α и L_β.

№	Элемент	L_α	L_β	№	Элемент	L_α	L_β
78	Pt	1,067	1,072	90	Th	0,756	0,750
79	Au	1,037	1,035	92	U	0,719	0,702
82	Pb	0,945	0,948				

исключениями (мы их рассмотрим ниже), есть в точности ряд возрастающих атомных весов. То же заключение подкрепляется следующим недавним открытием.

Периодическая таблица Менделеева показывает, что последовательное изменение химических свойств элементов, вообще говоря, совпадает с увеличением атомных весов. Однако, недавно было обнаружено, что всякий раз, когда радиоактивное вещество теряет дважды заряженную частицу α, оно передвигается на два места влево вдоль периодической таблицы, если же оно теряет частицу β с единичным зарядом, то оно передвигается на одно место вправо [1]), показывая таким образом, что химические свойства вещества зависят от числа свободных положительных зарядов на его ядре.

[1]) Soddy, „The Chemistry of the Radioelements". Part II (1914).

Одно из самых интересных и поразительных свойств таблицы Мозелея, заключается в том, что все известные элементы между натрием (атомный номер 11, атомный вес 23) и свинцом (атомный номер 82, атомный вес 207,2) в нее уместились; внутри этого ряда осталось только четыре пустых места. Ниже натрия имеется как раз 10 известных элементов; рентгеновы спектры этих элементов еще не были получены; последовательность же атомных весов и химических свойств здесь совершенно определена и не допускает двоякого толкования. Поэтому, на основании работы Мозелея представляется весьма вероятным, что мы уже нашли все члены полного ряда различного типа атомов, за исключением четырех, от водорода до свинца, т. е. от номера 1 до 82; из этих атомов построен физический мир. От 82 до 92 находится группа радиоактивных элементов, которые непрерывно превращаются друг в друга, а выше 92 (урана) по всей вероятности больше элементов и не существует.

То обстоятельство, что водород действительно является основанием ряда Мозелея, почти доказывается следующими вычислениями. Выразим результат Мозелея, заключающийся в том, что корни квадратные из наибольших частот, n_1, n_2 и т. д., излучаемых различными атомами, пропорциональны зарядам ядер E_1, E_2 и т. д., в следующем виде

$$\sqrt{\frac{n_1}{n_2}} = \frac{E_1}{E_2} \text{ или } \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{E_1^2}{E_2^2}. \qquad (33)$$

Подставим вместо λ_2 наблюденную длину волны линии наибольшей частоты, испускаемой вольфрамом, — длину волны, найденную Гуллем (Hull) и равную $0{,}185 \times 10^{-8}$ *см*. Полагая $E_2 = 74$ (атомный номер вольфрама) и $E_1 = 1$ и решая относительно λ_1, мы получим длину волны линии наибольшей частоты, испускаемую элементом, ядро которого содержит один единственный положительный электрон. Результат этой подставки дает $\lambda_1 = 101{,}3$ $\mu\mu$ (миллионных долей миллиметра). Длина же волны, соответствующая наибольшей частоте в ультрафиолетовой серии водородного спектра, недавно открытой Лиманом (Lyman), равна 91,2 $\mu\mu$; на основании закона серии Бальмера, для которой эта линия является границей, мы имеем все причины полагать, что это и есть наибольшая частота атома водорода. Совпадение здесь только приблизительное, но оно настолько хорошо, насколько можно ожидать, если принять во внимание неровность Мозелеевых ступенек. Итак, почти что досто-

верно, что Лимановская ультрафиолетовая серия водорода ни что иное, как рентгенова серия K для водорода. Точно также достоверно и то, что серия L для водорода есть обычная Бальмерова серия в видимой области, конец коей находится у $\lambda = 365$ $\mu\mu$. Другими словами, обычное излучение водорода представляет ни что иное, как его рентгеновы лучи.

Для водорода существует еще и серия M, открытая Пашеном (Paschen) в инфракрасной части, что уже само по себе заставляет предположить у всех элементов наличие серии с бо́льшей длиной волны, чем серия L, и что сложные оптические серии, наблюдаемые в металлической дуге, составляют часть этих серий с большими длинами волн. Действительно, серии M были найдены у шести элементов с высокими атомными номерами.

Таким образом, опыты Мозелея значительно придвинули нас к разгадке тайны спектральных линий. Они ясно и точно раскрывают пред нами весь ряд элементов от водорода до урана; все они дают замечательно схожие спектры, по крайней мере, поскольку речь идет об излучении серий K и L; эти спектры правильно разбросаны по всей области частот, начиная с ультрафиолетовой, где находятся линии K для водорода, вплоть до частоты в $(92)^2$ или в 8464 раза большей. Едва ли можно сомневаться в том, что вся эта область вскоре будет открыта для исследовиния. Эти новые исследования блестяще оправдали предсказания спектроскопистов, всегда утверждавших, что ключ к строению атома находится в изучении спектральных линий.

Короче говоря, работа Мозелея доказывает с совершенно новой точки зрения, что все химические элементы составляют одно семейство, при чем каждый член его связан со всеми остальными совершенно определенным и простым образом. Мечты Фалеса Милетского, повидимому, сбылись, мы нашли первичный элемент, из которого составлены все вещества; он оказался водородом [1]). Хорошо известно что эта мысль была высказана Проутом (Prout) ровно сто лет тому назад, при чем он исходил из того факта, что атомные веса

[1]) Эта гипотеза подтверждается фактом существования изотопов, т. е. разновидностей элементов, неотличимых по своим химическим свойствам но обладающих различным атомным весом. Оказалось, что атомные веса изотопов в принятой системе (атомный вес кислорода = 16) почти в точности равны целым числам. Наиболее полное исследование этого вопроса принадлежит Астону (Aston). Подробности см. в его книге „Изотопы" (русский перевод А. Стожарова. Гос. Изд.. 1923). *Прим. перев.*

всех элементов являются почти точными кратными веса водорода. Теория Проута не была принята, потому что эти кратные отношения не совсем точны. Отступления от точного совпадения в атомных весах, конечно, должны быть как-нибудь объяснены; однако, если происхождение массы электромагнитное, то не исключена возможность объяснить их, основываясь на наложении электрических полей электронов, составляющих атом. Так, если бы можно было заставить точно совпасть положительный и отрицательный заряды, то их поля совершенно бы исчезли, а с ними так же и их массы, так как масса просто свойство электрического поля. Значит, если положительное ядро водородного атома, входящее в ядро более тяжелого атома, попадает очень близко к отрицательным электронам, то масса такого ядра будет немного меньше суммы масс водородных атомов, его составляющих, как на самом деле и оказывается. Это объяснение недостаточной точности кратных отношений между атомными весами элементов, основанное на плотной „упаковке", было предложено около 1901 года, как только опыты Кауфмана (Kaufmann)[1]) дали экспериментальную основу для электромагнитной теории происхождения массы. Оно обсуждалось Лоренцом (Lorenz), Резерфордом (Rutherford)[2]) и позднее Гаркинсом (Harkins)[3]). При помощи его мы можем объяснить недостаточно точное совпадание как в последовательности атомных весов, так и в таблице Мозелея (смотри приложение *H*).

Является ли водород кирпичем, из которого построены все 92 элемента таблицы Мозелея, или нет, — во всяком случае, мы можем быть уверены, что число свободных положительных электронов в ядре атома в точности равно номеру, приписанному этому атому в таблице Мозелея. Обычно это число немного меньше чем половина атомного веса; так, наибольшее число в таблице—92, тогда как атомный вес сответствующего ему, самого тяжелого из известных элементов, урана, равен 238,5. Очевидно, что положительный заряд ядра определяет число отрицательных электронов, распределенных вокруг ядра во внешних областях атома; в настоящее время появляются все новые свидетельства того, что это число определяет химическое сродство атома и даже все его химическое и физическое свойства, за исключением веса. По этой причине мы и считаем

---

[1]) Kaufmann, „Göttinger Nachrichten", November, 8, 1901.
[2]) Rutherford, „Phil. Mag.", XXI (1911), 669.
[3]) Harkins, „Phil Mag.", XXX (1915), 723.

теперь, что между водородом и ураном не может быть других элементов кроме тех, которые соответствуют 92 номерам таблицы Мозелея.

Каким образом удерживаются эти свободные положительные заряды ядра, число коих меняется от 1 до 92,—мы не знаем. В настоящее время, экспериментальные свидетельства прерываются на том, что в ядре существует некоторое число свободных положительных электронов и что соответствующее число свободных отрицательных электронов; удерживается в равновесии во внешних частях атома. Мы можем представить себе, что и внутри ядра тоже находится несколько отрицательных электронов, потому что они, повидимому, выбрасываются оттуда при радиоактивных процессах. Далее, рассмотрим самый легкий из сложных атомов — атом гелия. Атомный номер этого элемента равен 2, так как ядро его обладает только двумя свободными положительными зарядами; атомный вес его есть 4. Мы может представить себе, что его ядро действительно состоит из 4 положительных электронов, сдерживаемых двумя отрицательными электронами. Подобным же образом, с этой точки зрения для каждого ядра число связывающих его отрицательных электронов будет равно его атомному номеру, а число положительных электронов, связанных ими в ядре, будет равно удвоенному атомному номеру, так что каждый отрицательный электрон связывает два положительных. Тогда останется, как и должно быть, равное число отрицательных электронов, удерживаемых во внешней части атома.

Эта правдоподобная точка зрения остается пока предположением. Однако с достоверностью известно, по крайней мере, то, что внутри всех атомов имеется определенное число двух основных сущностей, а именно положительных и отрицательных электронов; об этих электронах известно, что они совсем не отличаются друг от друга по величине заряда, но, повидимому, отличаются как по массе, так и по объему. Следовательно, согласно современному представлению физика, электрон в его двух видах является камнем, из которого построен суб-атомный мир. Кто-то назвал его „крайним атомом“ („ultim-atom“) науки двадцатого столетия.

VI. Атом Бора.

До сих пор ничего не было сказано относительно того, находятся ли электроны внутри атома в покое, или в движении; если же они движутся, то каков характер этого движения. В случае водородного атома, состоящего, согласно изложенным данным, только

из одного положительного и из одного отрицательного электрона, ничто не помешало бы этому отрицательному электрону упасть на положительное ядро, если бы не было центробежных сил, уравновешивающих притяжение, как в случае земли и луны. Следовательно, необходимо, повидимому, принять, что отрицательный электрон вращается по некоторой орбите вокруг положительного. Но движение по такой орбите должно сопровождаться непрерывным излучением энергии; при этом частота излучения должна непрерывно возрастать, по мере того как электрон, благодаря потере энергии, все больше и больше приближается к ядру. Однако опыты не обнаруживают такого изменения орбиты электрона, потому что, насколько известно, водород вовсе не излучает, если он не ионизирован. Когда же он излучает, то он дает не непрерывный спектр, как того требует изложенная картина, а спектр линейчатый, в котором частоты, соответствующие различным линиям, связаны между собой весьма определенным образом. Эта связь видна на снимке (рис. 25) и может быть представлена, так называемой, формулой Бальмера, имеющей вид

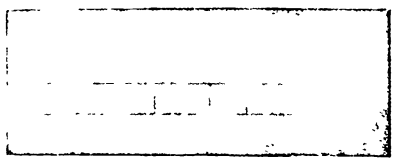

Рис. 25.

$$\nu = N\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right). \tag{34}$$

В этой формуле ν означает частоту, N — постоянную, а n_1 для всех линий видимой области равно 2, тогда как n_2 принимает для последовательных линий значения 3, 4, 5, 6 и т. д. В инфра-красной водородной серии, открытой Пашеном (Paschen)[1]) $n_1 = 3$. а n_2 принимает последовательно значения 4, 5, 6 и т. д. Уже после появления теории Бора (Bohr), Лиман (Lyman)[1]) открыл свою водородную серию в ультрафиолетовой области; в этой серии $n_1 = 1$ и $n_2 = 2$, 3, 4 и т. д. Так как 1 есть наименьшее целое число, то эта серия должна соответствовать, как было уже указано, наибольшей частоте, на которую способен водород; верхняя граница, к которой стремятся эти частоты, достигается когда $n_1 = 1$ и $n_2 = \infty$, т. е. когда $\nu = N$.

[1]) Paschen, „Annalen der Physik", XXVII (1908), 565.
[1]) „Spectroskopy of the Extreme Ultraviolet", p. 78.

Руководясь всеми этими обстоятельствами, кроме последнего, Нильс Бор (Nils Bohr), молодой физик-теоретик в Копенгагене [1]), разработал модель атома, которая привела к ряду замечательных успехов. Первоначально эта модель должна была представить только самый простой возможный случай одного единственного электрона, вращающегося вокруг положительного ядра. Чтобы объяснить большое число линий, которое дает спектр такой системы [на рис. 25, снятом профессором Райтом (Wright) из Ликской Обсерватории (Lick Obsevatory), видны все Бальмеровские линии, полученные в спектре туманности, за исключением самой длиной волны, называемой H_α, находящейся дальше левого края пластинки], Бор высказал такое первое предположение: электрон может вращаться вокруг ядра по целому ряду различных орбит, причем каждая из этих орбит подчиняется известному закону Ньютона, принимающему, если его выразить математически, следующий вид

$$\frac{eE}{a^2} = (2\pi n)^2 ma. \tag{35}$$

Здесь e есть заряд электрона, E заряд ядра, a радиус орбиты, n частота обращения по орбите и m масса электрона. Это предположение, иными словами, сводится к тому, что электрон вращается по круговой орбите, подчиненной законам, справедливым как внутри, так и снаружи атома, что известно из работ о рассеянии частиц альфа. Существенным в этой гипотезе является то, что она позволяет электрону сохранять свою орбиту, не излучая энергии, хотя это и противоречит обычной электромагнитной теории. Но с другой стороны, факты магнитизма [2]) и оптики в связи с успехами теории Бора, о которых сейчас будет сказано, повидимому, дают экспериментальное оправдание такого рода гипотезы.

Вторая гипотеза Бора: излучение происходит только в том случае, когда электрон перескакивает с одной из этих орбит на другую. Если A_2 означает энергию электрона на одной орбите и A_1 энергию на какой-либо другой орбите, тогда ясно из энергетических соображений, что при переходе электрона с одной орбиты на другую количество излученной энергии

[1]) N. Bohr, „Phil. Mag.". XXVI (1913), 1. 476, 857; XXIX (1915), 332; XXX (1915), 394.

[2]) Einstein u. de Haas, „Verh. der deutsch. phys. Ges.". XVII (1915), 152; так же Barnett, „Phys. Rev.", VI (1915), 239.

должно быть $A_2 < A_1$; далее, излученная энергия, очевидно, должна обладать какой-то частотой ν; в связи с экспериментальными работами, описанными в следующей главе, Бор положил энергию пропорциональной ν и написал

$$h\nu = A_2 - A_1, \tag{36}$$

где h — так называемая постоянная Планка (Planck), о которой будет сказано дальше. Нужно заметить, что эта гипотеза не дает физической картины процесса излучения. Она определяет только соотношение энергии, которое должно быть удовлетворено, когда это учение происходит.

Третья гипотеза Бора: различные возможные круговые орбиты определяются тем, что кинетической энергии T на каждой орбите приписывается значение

$$T = \frac{1}{2}\tau h n, \tag{37}$$

где τ целое число, n частота обращения по орбите и h опять постоянная Планка. Это значение T выбрано так, чтобы серия частот совпадала с действительно наблюденной, а именно с той которая изображается серией Бальмера для водорода.

Нужно заметить, что, если только круговые орбиты электронов вообще существуют, то ни одна из этих гипотез не является произвольной. Каждая из них только утверждение действительно существующих экспериментальных положений. Поэтому неудивительно, что из этих гипотез вытекает необходимость сериального спектра водорода, состоящего из ряда линий. Гипотезы сознательно выбраны так, чтобы этот факт в них заключался. Гипотезы были сделаны, однако, без всякого отношения к точным численным значениям этих частот.

Итак, доказательства правильности предположения о неизлучающих электронных орбитах нужно искать, во первых, в совпадении численных значений связанных с ним постоянных, и, во вторых, в физическом значении, если таковое имеется, третьей гипотезы. Если эти постоянные получатся правильными в пределах экспериментальных ошибок, тогда можно говорить о непосредственной проверке теории неизлучающих электронных орбит, особенно если эти постоянные определяются точно.

Каковы же факты? Постоянная Бальмеровой серии водорода, т. е. величина N в уравнении (34), известна с громадной

точностью, достигаемой при определении длин волн: она равна $3{,}290 \times 10^{15}$. Из теории Бора в результате простых алгебраических операций (прилоложение G) получаем

$$N = \frac{2\pi^2 e^4 m}{h^3} = \frac{2\pi^2 e^5}{h^3 \frac{e}{m}}. \tag{38}$$

Как уже было указано, я недавно вновь определил[1]) e с точностью до одной тысячной доли и получил для него величину $4{,}774 \times 10^{-10}$. Как будет показано в следующей главе, я также определил h фото-электрически[2]) с ошибкой, в случае натрия, не большей половины процента, при чем величина для натрия равняется $6{,}56 \times 10^{-27}$. Значение, найденное Вебстером (Webster)[3]) по способу, недавно открытому Дюэном (Duane) и Гентом (Hunt)[4]), равно $6{,}53 \times 10^{-27}$. Если взять среднее этих двух результатов, т. е. $6{,}545 \times 10^{-27}$, как наиболее вероятную величину, то мы получим с помощью значения $\frac{e}{m}$, данного Бухерером (Bucherer) ($1{,}767 \times 10^7$), которое вероятно правильно с точностью до 0,1 процента, $N = 3{,}294 \times 10^{15}$, что совпадает до одной десятой процента с наблюденным значением. Это совпадение составляет одно из самых поразительных подтверждений теории неизлучающих электронных орбит. Оно показывает, что поведение отрицательного электрона, по меньшей мере, правильно описывается уравнением круговой неизлучающей орбиты. Если это уравнение можно получить на основании каких-либо иных физических предположений, то нужно, конечно, сначала развить эти предположения. Пока же это не сделано, позволительно предпологать, что это уравнение орбиты означает действительную орбиту. Далее, радиусы устойчивых орбит для водорода легко находятся из предположений Бора; они принимают вид (приложение G)

$$a = \frac{\tau^2 h^2}{4\pi^2 m e^2}. \tag{39}$$

Другими словами, так как τ есть целое число, то радиусы этих орбит относится как $1:4:9:16:25$. Если считать за нормальный

[1]) R. A. Millikan, „Proc. Nat. Acad.", April 1917.
[2]) R. A. Millikan, „Phys. Rev.", VII (1916), 362.
[3]) „Phys. Rev.", VII (1916), 599
[4]) „Phys. Rev.". VI (1915), 168.

водород тот, в котором электрон находится на самой внутренней орбите, именно той, для которой $\tau = 1$, тогда $2a$, диаметр водородного атома, получается равным $1{,}1 \times 10^{-8}$ *см.* Самое лучшее определение диаметра водородной молекулы дает $2{,}2 \times 10^{-8}$ *см.* —необычайно близкое совпадение с предсказанным из теории Бора. Далее, тот факт, что нормальный водород совсем не поглощает Бальмеровых линий, которые он испускает, великолепно объясняется этой теорией. В самом деле, согласно этой теории, у нормального водорода нет электронов на орбитах, соответствующих линиям Бальмеровой серии. С другой стороны, тот факт, что водород испускает свое характеристическое излучение только в том случае, когда он ионизован, благоприятствует теории, утверждающей, что процесс излучения есть процесс возвращения в нормальное состояние через ряд возможных промежуточных состояний. В то же время это обстоятельство согласуется с представлением о том, что для излучения необходима перемена орбиты. Точно так же, то обстоятельство, что в спектрах звезд найдено 33 линии Бальмеровой серии, тогда как в лаборатории мы никогда не получаем больше 12 [1]), легко объясняется из теории Бора; ни одна другая теория никогда не предлагала даже намека на объяснение.

Другое преимущество теории состоит в том, что третья гипотеза, придуманная просто для того, чтобы удовлетворить чисто эмпирическим данным, т. е. наблюденным соотношениям между частотами Бальмеровой серии, как оказывается, имеет очень простое и ясное физическое значение. Значения момента количества движения электрона, вращающегося вокруг положительного ядра, представляют собою точные кратные определенного значения этого момента количества движения. Следовательно, моменты количества движения в атоме водорода обладают свойством атомности. Такие соотношения обыкновенно не вытекают из эмпирических формул. А если это случается, то мы обычно видим в них действительные интерпретации формул, — а не просто совпадения.

Далее, успешность и плодотворность теории часто проверяется тем, что детальное ее развитие позволяет учесть те небольшие расхождения, которые получаются между опытом и элементарной формой теории, разработанной в первом приближении. Теория электронных орбит имела успех в этом направлении. Так, она предсказывает

[1]) В последнее время (1922 г.) Р. Вуду (Wood) удалось и в лабораторных условиях получить свыше 20 линий серии Бальмера. *Прим. ред.*

закон Мозелея (33). Но этот закон, открытый впоследствии, оказался неточным, он и должен быть неточным, если в атоме имеется более одного электрона, что справедливо для всех случаев, кроме атомов водорода и таких атом гелия, которые потеряли один отрицательный заряд; неточность проистекает вследствие того влияния, какое электрон оказывает на электрическое поле своего соседа. Вероятно, будет найдено, что этот закон совершенно неверен для очень легких ато мов, вроде лития. Но чем сильнее ядро, и чем ближе к нему внутренняя орбита, тем меньше будет этот эффект. Как раз этот результат и наблюдается. Закон Мозелея оправдывается очень точно, когда его проверяют для водорода и для элементов с наибольшими атомными номерами, и гораздо менее точно, когда его проверяют для водорода и алюминия, или магния. Точно также, отношения между частотами линий α и β серии K тем ближе подходит к теоретическому значению (т. е. к значению для водорода), чем больше атомный номер элемента.

Далее, на снимках 21 a и 21 b (стр. 155 и 156) видно, что различные линии характеристических рентгеновых спектров—не одиночные линии, как этого требует простая теория. В связи с этим Зоммерфельд (Sommerfeld)[1]) обобщил постулаты теории Бора, пытаясь объяснить такое строение спектров на основании эллиптичности орбит. Пашен (Paschen)[2]), измеряя строение сложных гелиевых линий, получил столь точное подтверждение этой теории, что $\frac{e}{m}$ получается из его измерений с точностью до одной десятой процента принятого значения.

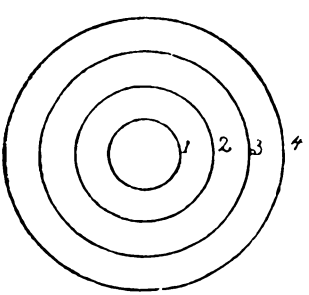

Рис. 26.

Дальнейшее предсказание, которое делает теория Бора, проверенное вскоре на опыте, было соотношение между частотами серий K и L. Это соотношение выражается уравнением

$$\nu_{K_\beta} - \nu_{K_\alpha} = \nu_{L_\alpha}. \qquad (40)$$

Таким образом, согласно Бору, линия с самой большой длиной волны серии K, — линия α, — появляется благодаря перескоку с орбиты 2 (рис. 26) на орбиту 1, с изменением энергии $A_2 - A_1$;

[1]) „Annalen der Physik". LI (1916). 1.
[2]) Ibid. L (1916). 301

следующая по длине волны линия, линия β, происходит от перескока с 3 на 1 с изменением энергии $A_3 - A_1$; тогда как линия с наибольшей длиной волны серии L, — линия α, — происходит от перескока с 3 на 2, с изменением энергии $A_3 - A_2$. Если частота ν в каждом случае пропорциональна изменению энергии, то отсюда непосредственно следует уравнение (40); больше того, благодаря соотношению между энергиями орбит это уравнение должно выполняться точно, независимо от того один, или несколько электронов в атоме. Я не мог найти ни одного случая, в котором нарушается это уравнение, хотя данные, для которых его можно проверить, в настоящее время довольно обширны. Я недавно указал [1]), что это уравнение равносильно известному правилу Ридберга - Шустера (Rydberg-Schuster) [2]), которое оказалось справедливым для всех вообще оптических серий.

Итак, если широкий успех, как в предсказании новых соотношений, так и в правильном и точном истолковании старых, есть гарантия справедливости физической теории, то теория неизлучающих орбит является одной из хорошо установленных истин современной физики. До сих пор, по крайней мере, это истина, и нет нужды рассматривать другие теории строения атома, пока они не обнаружат подобной же плодотворности. Во всяком случае я не знаю ни одного соперника теории Бора, который бы показался хотя бы вдали.

Я очень хорошо знаю, что факты органической химии как будто требуют, чтобы валентные электроны были сгруппированы в некоторых определенных положениях равновесия на периферии атома, и что на первый взгляд это требование как будто трудно примирить с теорией электронных орбит. И все же здесь нет неизбежного противоречия. Водород и гелий не представляют затруднений, так как первый обладает только одной валентностью, а последний ни одной. Только к этим двум атомам и приложима неизмененная теория Бора, потому что она рассматривает только случай единственного отрицательного электрона, вращающегося вокруг положительного ядра. То обстоятельство, что линии серии K для тяжелых элементов так хорошо следуют водородной формуле, показывает, что вблизи ядра этих элементов находятся электроны, к которым теория Бора

[1]) „Phys. Rev.", May 1917; представлено Американскому Физическому Обществу 1-го декабря 1916 года.

[2]) Baly, „Spectroscopy", p. 488.

приложима очень точно; однако, эти лучи нам ничего не говорят относительно условий и поведения внешних электронов, связанных с явлениями валентности, и мы очень мало исследовали свойства излучения атомов, обладающих небольшим числом электронов. Дальнейшее изучение элементов в отношении рентгеновских спектров от лития (атомный номер 3) до магния (атомный номер 12), вероятно, прольет новый свет на этот вопрос.

Были также и такие возражения, что теория Бора не есть теория излучения, потому что она не дает нам картины механизма возникновения частоты ν. Это правда, и в этом ее сила точно так же, как сила первого и второго законов термодинамики в том, что они совершенно независимы от какого бы то ни было механизма. Теория Бора есть теория строения атома; это не теория излучения, она устанавливает только, какие соотношения между энергиями должны существовать, когда происходит излучение, каков бы ни был его механизм. Это первая попытка определить, на основании хорошо установленных экспериментальных фактов, положение и движения электронов внутри атома, и для первой попытки она несомненно удачна, хотя ни в каком случае не вышла еще из стадии гипотезы. Главное затруднение теории Бора возникает из кажущегося противоречия, связанного с существованием неизлучающих электронных орбит; это противоречие, исчезло бы, если бы имелись данные предполагать, что отрицательный электрон, находясь внутри атома, становится своего рода кольцом, обладающим способностью расширяться до различных радиусов, и только при освобождении от атома принимает существенные свойства точечного заряда, которые мы у него находим в опытах с катодными лучами, лучами β и с ионизацией газов. Мы увидим в следующей главе, что у электрона действительно имеются свойства, которые прежде не связывались неразрывно с электрическим зарядом.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ.

ПРИРОДА ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ.

Разобранные до сих пор задачи все относились к области молекулярной физики. Однако, открытие и измерение электрона оказало сильное влияние и на развитие физики эфира. Новейшие достижения в этой области необычайно интересны и богаты новыми идеями, но они приводят в такие дебри, в которых физик различает предметы очень смутно; характер действительных соотношений в этом случае оказался еще менее ясным, чем думали двадцать лет тому назад.

Красота решенной задачи вызывает удивление и дает некоторого рода удовлетворение, но все же самый общий и самый острый и глубокий интерес принадлежит неразрешенной задаче, исканию неизвестного и борьбе за достижение. Поэтому я не приношу извинений за то, что в этой главе привожу одну из великих неразрешенных задач современной физики, и за то, что оставляю ее с самым неопределенным намеком на разрешение.

I. Корпускулярная [1]) и эфирная теории излучения.

Самая новая задача физики в то же время и самая старая. Потому что в опыте как ребенка, так и народа, самое первое есть ощущение света и тепла, получаемого от солнца. Но как доходит до нас свет от солнца и от звезд через пустое междузвездное пространство? Греки отвечали на этот вопрос очень просто и весьма удовлетворительно с точки зрения людей, довольных приемлемыми объяснениями и не научившихся еще постоянно обращаться, посредством опыта, к природе с вопросами о правильности или неправильности данного заключения. Они говорили, что солнце и все источники света и тепла должны выбрасывать крошечные частицы, которые, ударяясь о глаз или кожу, должны вызывать ощущение света и тепла.

[1]) В русской литературе принят также термин „теория истечения". *Прим. перев.*

Корпускулярная теория была принята всеми вплоть до 1800 г. после Р. Х. Правда, она оспаривалась в 1680 г. датским физиком Гюйгенсом (Huyghens), который, исходя из наблюденных явлений распространения водяных волн по поверхности пруда, или звуковых волн в воздухе, высказал предположение, что свет может быть некоторым колебательным возмущением, передающимся в какой-то среде, заполняющей все междузвездное пространство. Он постулировал существование такой среды, которая была названа световым или светоносным эфиром.

Отчасти благодаря тому, что Ньютон (Newton) защищал корпускулярную теорию, эфирная или волновая теория завоевала только немногих приверженцев, пока около 1800 года не сделались известными некоторые явления интерференции, которые ставили в тупик корпускулярную теорию и которые легко объяснялись ее соперницей [1]). В течение XIX-го столетия, доводы в пользу волновой теории делались все сильнее и сильнее, и к концу его корпускулярная теория была вычеркнута навсегда, по четырем различным причинам. 1) На основании корпускулярной теории нельзя объяснить явлений интерференции; между тем, они полностью предсказываются волновой теорией. 2) На опыте оказалось, что скорость распространения света в воздухе больше, чем в воде; это обстоятельство согласовалось с требованиями эфирной теории, зато прямо противоречило требованиям корпускулярной теории. 3) Электрические волны представлялись, как это и было показано на опыте, совершенно подобными световым волнам, за исключением длины волны; было найдено, что с увеличением длины волны они непрерывно и постепенно переходят в статические электрические поля, что совершенно невозможно объяснить с точки зрения корпускулярной теории. 4) Было показано, что скорость света не зависит от скорости источника, как того требует эфирная теория и что отрицает корпускулярная теория.

Итак, около 1900 года, эфирная теория сделалась, повидимому, недоступной крепостью. Несколько лет спустя она встретила некоторое довольно слабое, как мне кажется, сопротивление со стороны группы крайних защитников теории относительности; однако теперь

---

[1]) Краткий исторический очерк развития воззрений на природу света у Милликэна весьма неточен. Определенно защищаемой корпускулярной теории до Ньютона не существовало. Наоборот, было много попыток выдвинуть волновую теорию (Леонардо да Винчи, Гримальди, Гуи и пр.). Сам Ньютон указывал на корпускулярную гипотезу только как на одну из возможных гипотез и пр. *Прим. ред.*

на эту теорию, я думаю, все смотрят, как на неимеющую никакого отношения к вопросу о существовании или несуществовании светового эфира. Ибо такой эфир был создан единственно с целью дать носителя электромагнитным волнам, и очевидно останется или исчезнет одновременно с вопросом о существовании таких волн в пустоте, в наличии которых, насколько мне известно, еще никто не сомневался.

II. Затруднения, встреченные волновой теорией.

Вплоть до 1903 года всецело господствовала теория, рассматривающая электромагнитную волну, как возмущение, возникающее в некоторой точке эфира, в которой электрический заряд испытывает изменение скорости, и распространяющееся от этой точки во все стороны в виде сферической волны, при чем полная энергия возмущения всегда равномерно распределена по всей волне. Эта теория не встречала ни одного серьезного возражения, ни с чьей стороны.

Больше того, она чрезвычайно успешно не только объясняла известные факты, но и не раз предсказывала новые. Первое затруднение появилось после открытия электрона в связи с отношением электрона к поглощению или испусканию электромагнитных волн. Оно впервые было отмечено сэром Дж. Дж. Томсоном (Sir J. J. Thomson) в его Силлимэновских лекциях (в 1903 г.) в Иэле (Jale). Это затруднение может быть формулировано следующим образом: несомненно, что рентгеновы лучи проходят через все,—кроме чрезвычайно малой доли, скажем единицы на тысячу миллиардов, — атомы, находящиеся на их пути, не растрачивая на них никакой энергии, и не действуя на них заметным образом. Но иногда, встречая атом, они выбивают из него отрицательный электрон с неимоверной скоростью; это показано на снимках; изображенных на рисунках 18, 19 и 20. Это самое интересное и самое характерное свойство рентгеновых лучей, которым они отличаются от лучей α и β так же резко, как и способностью не отклоняться в магнитном поле. Рис. 14 и 15 показывают, что ни лучи α, ни лучи β никогда не выбрасывают из атомов, сквозь которые они проходят, электронов со скоростями, сравнимыми с теми, которые вызываются рентгеновыми лучами, потому что иначе на этих снимках из точек на пути лучей α и β начинались бы новые ломаные линии.

Это свойство рентгеновых лучей представляет серьезное затруднение для эфирной теории. Если электрическая интенсивность волны рентгенова луча достаточна, чтобы выбросить таким образом частицу

с громадной энергией из данного атома, почему же она, по крайней мере, не отрывает электронов от всех атомов, мимо которых проходит?

Далее, если ультрафиолетовый свет падает на металл, то он тоже, как и рентгеновы лучи, выбрасывает отрицательные электроны. Это явление испускания корпускул под влиянием света называют фотоэлектрическим эффектом. Ленард (Lenard) [1]) первый сделал удивительное открытие, что энергия выбрасывания электрона совершенно не зависит от интенсивности света, вызывающего выбрасывание. При этом безразлично, меняется ли интенсивность благодаря изменению расстояния от источника, или благодаря поглощающим экранам. Я сам [2]) подвергнул это соотношение очень тщательной проверке и нашел, что оно выполняется очень точно. Больше того, такого же рода независимость была установлена и для отрицательных электронов, испускаемых как рентгеновыми лучами, так и лучами γ.

Такого рода явления, очевидно, трудно объяснить на основании любой теории распространения волн. Но мы увидим, что они легко поддаются толкованию с точки зрения корпускулярной теории, потому что, если энергия вырвавшегося электрона происходит от поглощенной световой корпускулы, тогда энергия испускания выброшенного электрона не должна зависеть от расстояния источника, как и оказывается на самом деле. Далее, корпускулярные лучи должны сталкиваться с чрезвычайно малой долей атомов, находящихся в пространстве, через которое они проходят. Это обстоятельство объясняет как независимость энергии испускания от интенсивности, так и небольшое число ионизованных атомов.

Однако, в виду того, что те четыре группы явлений, о которых упомянуто выше, оставались необъяснимыми, Томсон нашел совершенно невозможным возвращаться назад к старой и негодной форме корпускулярной теории для объяснения новых явлений испускания электронов под влиянием эфирных волн. Поэтому он попробовал примирить эти неудобные новые явления с волновой теорией, предполагая волокнистое строение эфира и представляя себе всю электромагнитную энергию перемещающейся вдоль Фарадеевых линий сил, понимаемых как действительные волокна, протянутые через все пространство. Хотя это представление,—которое мы можем назвать теорией волокнистого эфира,—сходно с корпускулярной теорией в том, что энергия, покинувшая испускающее тело, остается

---

[1]) „Ann. d. Phys.". (4), VIII (1902), 149.

[2]) „Phys. Rev.". I (1913), 73.

в определенном месте пространства, и если поглощается, то поглощается как целое, по существу, оно есть эфирная теория. В самом деле, согласно этому представлению скорость распространеня определяется свойствами среды и не имеет никакого отношения к природе и состоянию источника. Таким образом последние три возражения, фатальные для корпускулярной теории, здесь отсутствуют. Что же касается первого, то никто еще не показал, что предположения Томсона можно примирить с явлениями интерференции, хотя, насколько я знаю, точно также до сих пор не была вполне доказана и их несовместимость.

Но и помимо интерференции, для теории Томсона далеко не все просто и легко. Действительно, довольно трудно представить себе вселеннную в виде бесконечной паутины, нити которой никогда не спутываются и не рвутся, как бы быстро ни летали электрические заряды, к которым они привязаны.

III. Квантовая теория излучения Эйнштейна.

Смелость Томсоновой теории „волокнистого эфира" и встреченные ею затруднения не удержали Эйнштена[1]) в 1905 году от попытки сделать ее еще более радикальной. Для того, чтобы связать ее с некоторыми результатами, к которым пришел Планк (Planck) в Берлине, изучая явления излучения черного тела, Эйнштейн ввел, кроме предположения, сделанного уже Томсоном (энергия, испускаемая каким-нибудь излучающим телом, сохраняется пучками или квантами, пока она путешествует в пространстве), еще и следующее. Данный источник света может испускать или поглощать энергию только в количествах всегда точно равных $h\nu$, где ν собственная частота испускающего тела, а h постоянная, одинаковая для всех источников.

Я не буду пытаться излагать основания для такого предположения, потому что фактически в то время таких оснований вовсе и не было. Но каковы бы ни были основания, это предположение дало Эйнштейну возможность немедленно предсказать, что энергия испускаемых под влиянием света электронов должна подчиняться уравнению

$$\frac{1}{2} mv^2 = Ve = h\nu - p. \tag{41}$$

Здесь $h\nu$ есть энергия, поглощенная электроном из световой волны, или световой квант, потому что, согласно предположению,

[1]) „Ann. d. Phys.", (4), XVII (1905), 132; XX (1906), 199.

он поглотил всю энергию, содержащуюся в этом кванте; p есть работа, нужная для вырывания электрона из металла, и $\frac{1}{2}mv^2$ есть энергия, с которой он покидает поверхность атома, — энергия, очевидно, измеряемая произведением его заряда e на разность потенциалов V, против которой он еще едва может двигаться, прежде чем остановиться.

В то время, когда было сделано это предсказание, оно было столь же смелым, как и гипотеза, из которой оно вытекало. Тогда еще совершенно не было никаких опытов, которые позволяли бы определить, как изменяется с частотой света ν положительный потенциал V, который нужно приложить к освещенному электроду, чтобы остановить выбрасывание из него отрицательных электронов под влиянием монохроматического света этой частоты ν; не было исследовано и то, появляется ли вообще в связи с фотоэлектрическим разрядом величина h, которой Планк придал уже численное значение. Тем не менее, мы находимся ныне в удивительном положении, ибо десять лет работы (в Райерсоновской лаборатории и в других местах) над выбрасыванием электронов при помощи света показали, что уравнение Эйнштейна, повидимому, с точностью описывает наблюденные явления.

IV. Проверка уравнения Эйнштейна.

Способ, который был применен в Райерсоновской лаборатории для проверки справедливости уравнения Эйнштейна, связан со множеством операций над легко воспламенимыми щелочными металлами в сосуде, по возможности вполне освобожденном от присутствия газов. Поэтому уместно будет охарактеризовать настоящую экспериментальную установку, как механическую мастерскую в пустоте. На рис. 27 дан чертеж одной части его, который сделает понятными необходимые манипуляция.

Одно из самых важных утверждений, имеющихся в теории Эйнштейна, заключается в том, что кинетическая энергия, с которой монохроматический свет выбрасывает электроны из любого металла, пропорциональна частоте света; значит, если длина волны фиолетового света вдвое меньше длины волны красного, то фиолетовый свет должен выбрасывать электроны с энергией в два раза большей. Чтобы проверить, существует ли такого рода линейная зависимость между энергией выброшенного электрона и светом, его выбрасывающим, необходимо было воспользоваться, по возможности, большим

рядом частот. А для этого нужно было пользоваться щелочными металлами натрием, калием и литием, потому что из обыкновенных металлов электроны вырываются только ультрафиолетовым светом, тогда как щелочные металлы в этом отношении отвечают всем

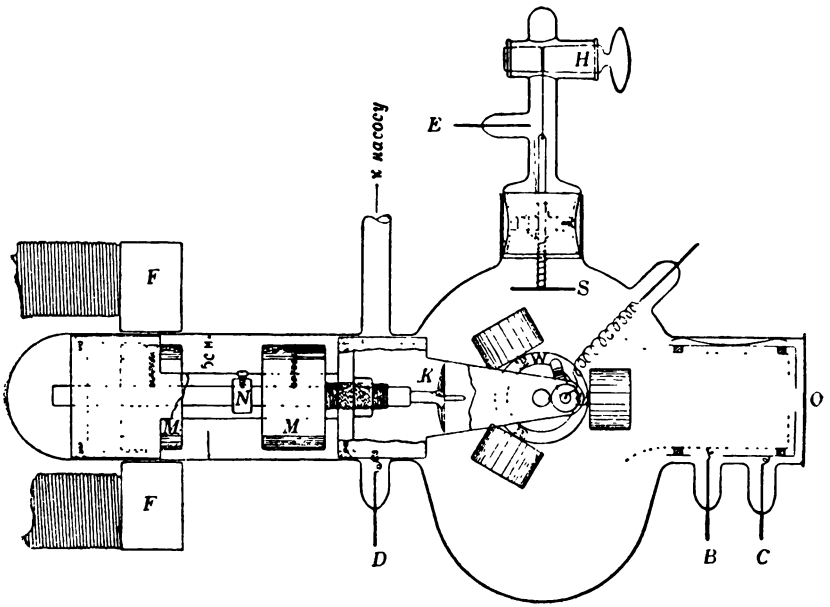

Рис. 27.

волнам, короче красных; следовательно, они чувствительны почти ко всему видимому спектру также, как и к спектру ультрафиолетовому. Поэтому цилиндры, отлитые из этих металлов, помещались на колесе *W* (рис. 27), а чистые свежие поверхности получались срезанием пластинок с каждого металла в прекрасном вакууме при помощи ножа *K*, приводимого в движение электромагнитом снаружи трубки. После этого, свеже срезанная поверхность поворачивалась другим электромагнитом, пока она не оказывалась против точки *O* (рис. 27). Пучек монохроматического света от спектрометра пропускался через *O* и падал на свежую поверхность. Энергия вырванных им электронов измерялась тем, что к поверхности прикладывался положительный потенциал, как раз достаточный, чтобы помешать электронам дойти до сетчатого цилиндра, помещенного напротив (показан пунктиром), и сообщить заметный отрицательный заряд квадрантному электрометру, соединенному с этим сетчатым цилиндром. Для полной проверки уравнения нужно было измерить еще

и контактную разность потенциалов между свежей поверхностью и

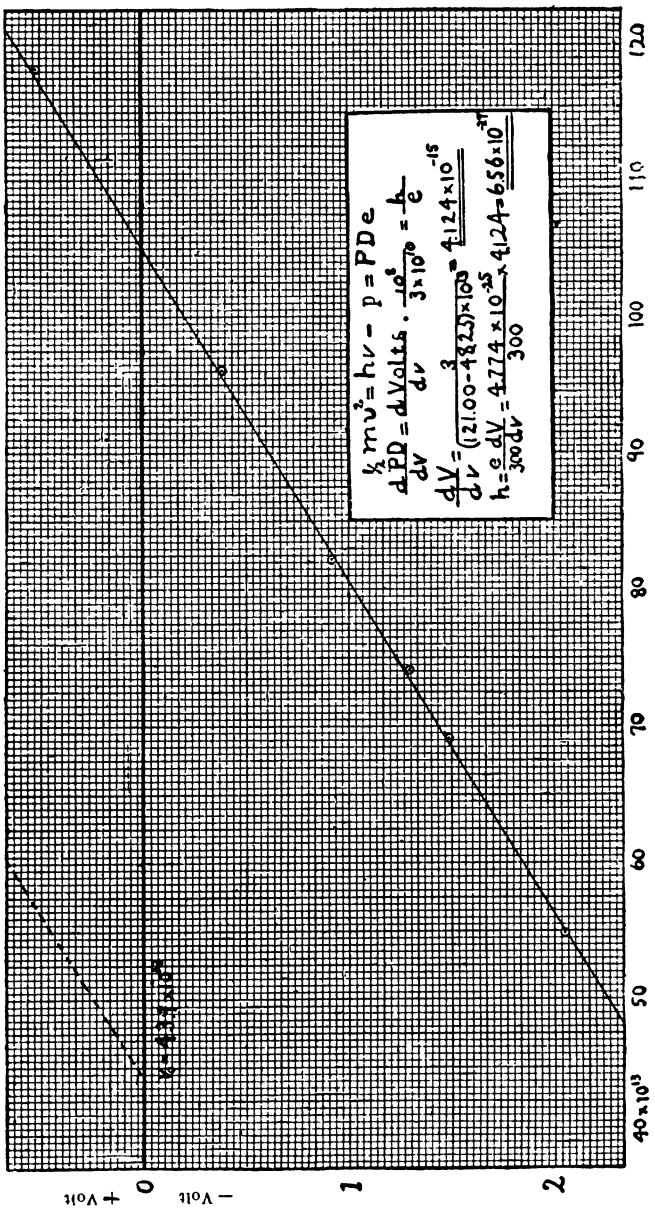

Рис. 28. Частоты ν.

пробной пластинкой S. Это выполнялось при помощи другого электромагнитного приспособления, изображенного на рис. 27;

подробности можно найти в оригинальной статье [1]). Здесь достаточно сказать, что уравнение Эйнштейна требует линейной зависимости между приложенной положительной разностью потенциалов и частотой света; оно требует также, чтобы наклон этой прямой был бы точно равен $\frac{h}{e}$. Следовательно, из этого наклона можно получить h, так как e известно. Насколько близка найденная зависимость к линейной, видно из рис. 28. Тот же чертеж показывает, что получающаяся из наклона этой прямой величина h равна $6{,}26 \times 10^{-27}$. Эта величина настолько близка к значению, полученному Планком из законов излучения, насколько этого можно ожидать, зная точность, с которой могут быть произведены опыты над излучением. Самое надежное значение h, полученное из рассмотрения всей этой работы, равно

$$h = 6{,}56 \times 10^{-27}.$$

В оригинальной работе можно найти другие способы проверки уравнения Эйнштейна, и окончательный результат всего этого исследования есть весьма точное подтверждение уравнения, которое Эйнштейн впервые выставил на основании своей полу-корпускулярной теории излучения. Если это уравнение справедливо вообще, то его несомненно нужно рассматривать как одно из самых основных уравнений физики и при том такое, которому суждено сыграть в будущем едва ли менее значительную роль, чем та, какую уравнения Максвелла сыграли в прошлом, потому что оно должно управлять переходом всей электромагнитной энергии коротких длин волн в энергию тепловую.

V. Возражения против теории волокнистого эфира.

Несмотря на только что представленные доводы в пользу уравнения Эйнштейна, мы встретились здесь с необычайным положением. В самом деле, оказалось, что полу-корпускулярная теория, из которой Эйнштейн получил свое уравнение, повидимому, совершенно не приемлема, и действительно она оставлена почти всеми; впрочем, сэр Дж. Дж. Томсон [2]) и немногие другие [3]), кажется, до сих пор еще держатся той или иной формы теории волокнистого

[1]) „Phys. Rev.", VII (1916). 362.

[2]) „Proc. Phys. Soc.", London, XXVII (December 15, 1914), 105.

[3]) „Modern Electrical Theory", Cambridge, University Press, 1913, p. 248.

эфира, т. е. той или иной формы теории, в которой энергия остается в определенном месте пространства, вместо того чтобы распространяться по всей поверхности волны.

Однако, можно привести два очень весских возражения против всех видов теории волокнистого эфира, одним из которых является теория Эйнштейна. Первое возражение состоит в том, что никто никогда не был в состоянии показать, что такая теория может предсказать какое-либо из явлений интерференции. Второе есть то обстоятельство, что существует непосредственное положительное свидетельство против мнения, что эфир обладает волокнистым строением. Именно, если статическое электрическое поле обладает волокнистым строением, как это постулируется любой формой теории волокнистого эфира, „так как каждая единица положительного электричества есть начало, а каждая единица отрицательного электричества есть конец фарадеевой трубки“ [1]), то следовательно сила, действующая на единичный электрон между пластинами воздушного конденсатора не может изменяться непрерывно с разностью потециалов между пластинами. В опытах же с маслянными каплями [2]) мы на самом деле изучаем поведение в таком электрическом поле единичного, изолированного электрона и мы находим в очень широких пределах точную пропорциональность между силой поля и силой, действующей на электрон; последняя сила измеряется скоростью передвижения в воздухе масляной капли, на которой он сидит.

Если мы будем поддерживать поле постоянным, и изменять заряд капли, то зернистое строение электричества доказывается прерывными изменениями скорости. Если же мы оставим заряд постоянным и будем изменять поле, то отсутствие прерывных изменений скорости опровергает представление о волокнистом строении поля, если только исключить предположение, что на электроне оканчивается громадное число таких волокон. Однако, такая гипотеза лишает теорию волокнистого эфира всякого значения. Итак, несмотря на этот, повидимому, полный успех уравнения Эйнштейна, физическая теория, символическим выражением коей это уравнение должно было быть, оказалась столь неудачной, что сам Эйнштейн, как мне кажется, больше ее не поддерживает; мы находимся в таком же положении, как если бы мы выстроили великолепное здание,

[1]) J. J. Thomson, „Electricity and Matter“, p. 9.
[2]) „Phys. Rev.“, II (1913), 109.

а затем выбили все подпорки, не свалив самой постройки. Здание стоит целое и, повидимому, хорошо проверенное, но никаких подпорок не видно. Эти подпорки, очевидно, должны существовать, и самая увлекательная задача физики—найти их. Опыт опередил теорию, или, вернее, следуя за ошибочной теорией, открыл зависимости, которые представляют громадный интерес и имеют, повидимому, весьма большое значение, но причины их пока еще совсем не понятны.

VI. Попытки найти решение.

Можно, впрочем, подвинуться на несколько шагов ближе к решению и указать некоторые условия, которым должно удовлетворять это решение, когда оно будет найдено. Энергия $h\nu$, которую, как это найдено на опыте, электрон поглощает, вылетая из атома, берется либо из энергии, скопившейся внутри атома, либо из энергии света. Третьей возможности не существует[1]). Мы видели, что энергия испускания одна и та же, находится ли тело ее испускающее на расстоянии одного дюйма от источника, где интенсивность света очень велика, или на расстоянии целой мили, где свет очень слаб; этот факт как будто указывает на то, что свет только как бы спускает курок в атоме, который сам дает всю энергию для вырывания электрона, как первоначально и полагал Ленард (Lenard)[2]) в 1902 году. Если же, напротив, энергию дает свет, то этот свет должен состоять из мельчайших объемов, в которых концентрирована энергия, как это предполагает теория Томсона-Эйнштейна.

Тот, факт, что энергия испускания прямо пропорциональна частоте ν падающего света, противоречит Ленардовской теории, ибо, если атом дает энергию, то он не должен был бы разбирать, какого рода длина волны „спускает курок"; наоборот, характер выстрела должен быть различным в зависимости от того, на каком ружье (сорт атома) курок спускается. Однако, на деле наблюдается как раз противоположное. Значит, энергия выбро-

[1]) Третья возможность — отказ от закона сохранения энергии для атомных процессов. Осторожные поиски и на этом скользком пути намечаются за самое последне время (Бор, Борн, Дарвин и др.). С этой точки зрения закон сохранения энергии — статистический, выполняющийся в среднем для большого числа атомов, но нарушающийся в отдельных атомных процессах. *Прим. ред.*

[2]) „Ann. d. Phys.", (4), VIII (1902), 149.

шенного электрона должна заимствоваться тем или иным путем из падающего света.

Если же мы попробуем расчитать, на основании теории распространения волн, сколько энергии может получить частица от данного источника света, то мы увидим, что можно получить только ничтожную долю той величины, которую действительно требует эта частица.

Так, полная световая энергия, падающая в секунду от нормальной свечи на квадратный сантиметр, на расстоянии 3 *м* равна 1 эргу[1]). Отсюда, количество, падающее в одну секунду на тело, величиной с атом, т. е. поперечного сечения 10^{-15} *см*^{2}, равно 10^{-15} эргам, а энергия $h\nu$, которая затрачивается на выбрасывание частицы светом длины волны 500 $\mu\mu$ (миллионных долей миллиметра), равна 4×10^{12} эргам, т. е. в 4000 раз больше. С другой стороны, волны с длиной меньше 500 $\mu\mu$, обладают менее чем $\frac{1}{3}$ падающей энергии, поэтому поверхности натрия или магния, чувствительные только для волн до 500 $\mu\mu$, должны были бы освещаться свечей с расстояния 3 метров по крайней мере в течение 12 000 секунд, или 4 часов, прежде чем какой-либо из их атомов мог бы накопить достаточно энергии, чтобы выбросить корпускулу. Этот расчет сделан в предположении, что вся энергия сосредоточена в одной волне; на самом же деле это не так, и времени потребовалось бы еще больше. В действительности же мы наблюдаем, что частицы вылетают в самый момент появления света. Правда, лорд Рэлей (Rayleigh) недавно показал[2]), что волновая энергия может поглощаться атомом из области, поверхность которой будет порядка квадрата длины волны, а не порядка поперечного сечения атома. Однако, это ни в коем случае не ослабляет смысла только что приведенных доводов, потому что достаточно применить рассуждения такого же рода к случаю лучей γ, длина волны которых порядка величины атомного диаметра (10^{-8} *см*), чтобы затруднение выразилось еще резче. Так, по оценке Резерфорда[3]) полная энергия лучей γ, испускаемая в одну секунду одним граммом радия, не может превышать $4{,}7 \times 10^4$ эргов. Отсюда, на расстоянии 100 метров, где лучи γ от одного грамма радия легко могут быть замечены, полная энергия этих лучей,

---

[1]) Drude, „Lehrbuch der Optik", 1906, p. 472.
[2]) „Phil. Mag.", XXXII (1916), 188.
[3]) „Radioactive Substances and their the Radiations", p. 288.

падающая в секунду на квадратный миллиметр поверхности (т. е. на площадь, в десять тысяч миллиардов раз большую площади атома, или круга с радиусом равным длине волны) равнялась бы $4{,}7 \times 10^4 : 4\pi \times 10^{-10} = 4 \times 10^{-7}$ эргов. Как показывают наблюдения, это число очень близко к энергии, с которой частицы β выбрасываются лучами γ; при этом скорость выбрасывания равна приблизительно девяти десятым скорости света. Таким образом мы приходим к следующему противоречию. Для того, чтобы атом мог набрать от лучей γ достаточно энергии, потребовалось бы, согласно классической теории, десять тысяч миллиардов секунд; на самом же деле лучи β испускаются мгновенно после начала опыта. Отсюда ясно, что, если мы хотим отбросить теорию локализованной энергии Томсона-Эйнштейна, которая, конечно, может удовлетворить этим соотношениям, то нам ничего другого не остается, как предположить, что когда-то раньше корпускула поглотила и запасла от света той или другой длины волны такое количество энергии, что достаточно крошечной добавки во время опыта, чтобы эта корпускула была выброшена из атома с энергией $h\nu$.

Корпускула, выброшенная таким образом светом, не может быть одним из свободных электронов в металле, потому что такие электроны, приведенные в движение внутри металла, составляют электрический ток, а мы знаем, что такой ток тотчас же превращает свою энергию в теплоту. Другими словами, свободный электрон не может обладать механизмом для собирания энергии и для раскачивания себя самого до тех пор, пока он не достигнет громадной скорости испускания, которую мы наблюдаем.

Следовательно, выброшенная частица должна происходит из самого атома, а в таком случае необходимо принять, если мы отбрасываем теорию Томсона-Эйнштейна, что внутри атома существует какой то механизм, позволяющий электрону непрерывно поглощать и нагружаться энергией данной частоты, пока не получится величина по крайней мере таких же размеров, как $h\nu$. Какого рода это механизм, мы пока что не имеем понятия. Далее, если поглощение происходит благодаря резонансу, — и мы пока не имеем другого способа его себе представить, — то очень трудно понять, каким образом в атомах твердого тела могут быть электроны, обладающие всевозможными собственными частотами, в конце концов выбрасываемые падающим светом любой заданной частоты. Но независимо от этих затруднений, это само по себе уже невозможно, если эти поглощающие электроны испускают хоть какую-нибудь

энергию, когда на них не падает никакого излучения, потому что если бы это было так, то они со временем потеряли бы весь свой запас. Мы могли бы, держа тела в темноте, привести их в такое состояние, что они не показывали бы никакого испускания электронов, пока их не подвергнут освещению определенной длиной волны в продолжение целых часов, а может быть и лет. Так как это противоречит опыту, то, даже отрицая теорию локализованной энергии Томсона-Эйнштейна, мы все таки принуждены постулировать поглощающие электроны, совершенно не излучающие во время процесса поглощения, пока энергия не достигнет некоторого критического значения, при котором происходит испускание, похожее на взрыв.

Следовательно, как бы мы ни толковали явление испускания электронов под влиянием эфирных волн, — на основании ли предположения Томсона-Эйнштейна о пачках локализованной энергии, движущихся в эфире, или на основании определенного свойства внутренних частей атома, которое позволяет ему непрерывно поглощать падающую энергию и испускать только со взрывом, — во всяком случае, наблюдаемые особенности явления как будто доказывают, что испускание атомом энергии есть процесс прерывный, иначе говоря, протекающий как взрыв. Это и было основным предположением теории Планка — так называемой теории квант. Теория Томсона-Эйнштейна делает оба процесса поглощения и испускания внезапными, или подобными взрыву, тогда как теория накопления, впервые предложенная Планком, хотя и с другой точки зрения, делает поглощение непрерывным и только испускание подобным взрыву [1]).

Величина h, определенная выше с точностью до половины процента, есть постоянная взрыва, т. е. неизменное отношение между энергией испускания и частотой падающего света. Существование этой постоянной было впервые открыто Планком при помощи анализа явлений излучения черного тела, хотя физические предположения, лежащие в основе анализа Планка, повидимому, не совсем приемлемы. Американские физики Дюэн и Гёнт (Duane и Hunt) [2]) и Гюлл (Hull) [3]) недавно показали, что эта же самая величина h появляется в связи с ударом электронов о какую бы то ни было

[1]) Планк разработал оба варианта теории, как в предположении прерывного, так и непрерывного поглощения. *Прим. ред.*

[2]) „Phys. Rev.", VI (1915), 166.

[3]) Ibid. VII (1916), 157.

мишень. Наблюдение этих физиков состоит в том, что наибольшую частоту в непрерывном рентгеновом излучении, испускаемом при ударе электронов о препятствие, можно вычислить, если разделить кинетическую энергию ударяющих электронов на h. Так как излучение черного тела, по предположению, происходит благодаря удару свободных электронов внутри металла об атомы, то очень вероятно, что появление h в связи с излучением черного тела и в связи в общим рентгеновым излучением происходит от одной и той же причины. Вопреки предположению Планка, ни в одном из этих случаев нет необходимости в каком-либо совпадении между собственным и вынужденным периодом. То $h\nu$, которое здесь появляется, не есть особенность атома, а просто свойство импульса, возникающего при внезапной остановке движущегося электрона. Почему этот импульс эфира разлагается в непрерывный спектр, или спектр белого света, обладающий, однако, свойством внезапно обрываться на некоторой пограничной частоте, заданной условием $h\nu = PD \times e$, — пока что совершенная тайна. Можно только утверждать, что этот опыт, повидимому, требует значительного изменения теории эфирных импульсов белого света и общего рентгеновского излучения для своего объяснения.

С другой стороны, появление h в связи с поглощением и испусканием монохроматического света (фото-электрический эффект и атом Бора) как будто требует неизвестного доселе механизма поглощения и испускания внутри атома. Это требование поразительно усиливается замечательной особенностью материи по отношению к поглощению рентгеновых лучей, — особенностью, открытой Баркла (Barkla)[1] и прекрасно выступающей на снимках де-Брольи (De Broglie), на стр. 157. Из этих снимков можно видеть, что атомы каждого определенного вещества пропускают рентгеновы лучи вплоть до некоторой критической частоты, а затем поглощают все частоты, большие этого критического значения. Необычайное значение этого открытия заключается в том, что оно указывает на существование типа поглощения, не происходящего ни от резонанса, ни от свободных электронов. Между тем, это единственные типы поглощения, принятые в современной оптике. До сих пор мы еще не имеем способа представить себе этот новый тип поглощения на основании механической модели.

[1]) „Phil. Mag.", XVII (1909), 749.

Тем не менее, существует один результат, повидимому, установленный всеми экспериментальными работами. Возникает ли излучение при остановке свободного электрона, как в опытах Дюэна и Гента и вероятно также и в опытах с черным телом, или при поглощении и испускании вновь энергии связанными электронами, как в работах по фотоэлектрическому эффекту и по спектроскопии, — Планково h повсюду как-то связано с испусканием и поглощением энергии электроном. Поэтому h можно рассматривать, как одно из свойств электрона.

Новые факты в области излучения, открытые благодаря изучению электрона, таким образом как будто требуют весьма основательного пересмотра или развития классических теорий поглощения и испускания лучистой энергии. Теория Томсона-Эйнштейна слагает всю тяжесть объяснения новых фактов на неизвестную природу эфира и делает радикальные предположения относительно его строения. Теория накопления оставляет эфир, каким он был, и переносит трудности объяснения на неизвестные условия и законы, существующие внутри атома и связанные с природой электрона. Я уже приводил доводы, опровергающие первую теорию. Второй тип теории, хотя сейчас еще очень незаконченный, является, по моему мнению, единственным возможным и получил удачное применение в теории Бора. Но все же в настоящее время теория имеет грустный, недоконченный и расплывчатый вид. Почти все, что мы можем сейчас сказать, сводится к тому, что новые соотношения, открытые в области излучения, толкают нас или к полу-корпускулярной теории Томсона-Эйнштейна, или же к теории, которая в такой же мере опрокидывает установленный в физике порядок вещей. В самом деле, каждая из этих двух возможностей приводит нас к весьма революционной квантовой теории излучения. Жить в такое время, когда происходит такая полная перестройка наших представлений о способе, каким поглощаются и испускаются материей эфирные волны, — перспектива весьма вдохновляющая. Атомный и электронный миры открылись глазам современных физиков с чарующей определенностью и стройностью, но их отношение к миру эфирных волн до сих пор глубокая тайна, и будущее поколение обладает несравнимой возможностью найти ее разрешение.

В заключение я даю сводку самых главных физических постоянных, значение которых можно было установить [1]), приблизительно в указанных пределах, благодаря изолированию и измерению электрона.

---

[1]) Смотри „Proc. Nat Acad Sc", III (1917), 236; также „Phil. Mag.", July 1917.

Таблица XVI.

Электрон	$e = (4{,}774 \pm 0{,}005) \times 10^{-10}$
Постоянная Авогадро	$N = (6{,}062 \pm 0{,}006) \times 10^{23}$
Число молекул в *см*³ при 0°C и 76 *см* . .	$n = (2{,}705 \pm 0{,}003) \times 10^{19}$
Кинетическая энергия движения молекулы при 0°C	$E_0 = (5{,}621 \pm 0{,}006) \times 10^{-14}$
Изменение поступательной энергии молекулы на 1°C	$\epsilon = (2{,}058 \pm 0{,}002) \times 10^{-16}$
Масса атома водорода в граммах . .	$m = (1{,}662 \pm 0{,}002) \times 10^{-24}$
Элемент действия Планка	$h = (6{,}547 \pm 0{,}013) \times 10^{-27}$
Постоянная Вина (Wien) спектрального излучения	$C_2 = 1{,}4312 \pm 0{,}0030$
Постоянная Стефана-Больцмана черного излучения	$\sigma = (5{,}72 \pm 0{,}034) \times 10^{-12}$
Постоянная кристаллической решетки Калькшпата	$d = 3{,}030 \pm 0{,}001$ Å

ПРИЛОЖЕНИЯ.

А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ *ne* ИЗ ПОДВИЖНОСТЕЙ И КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ.

Если мы предположим, что газовые ионы, представляющие заряженные молекулы или скопления таких молекул, ведут себя совершенно так же, как и окружающие их незаряженные молекулы, то они подобно прочим молекулам будут стремиться диффундировать и будут производить совершенно такое же парциальное давление, какое производилось бы тем же числом молекул любого другого газа. Вообразим себе, что нижняя часть сосуда на рис. 29 наполнена газом, в котором рассеяны ионы, и представим себе, что эти ионы медленно диффундируют вверх. Пусть n' будет концентрация ионов (т. е. число ионов на кубический сантиметр) на расстоянии x от дна сосуда. Тогда число N ионов, проходящих в каждую секунду через площадку в 1 $см^2$ перпендикулярную к x и отстоящую на x от дна, должно быть прямо пропорционально градиенту концентрации $\frac{dn'}{dx}$. Множитель пропорциональности в данном газе есть, по определению, коэффициент D диффузии ионов сквозь этот газ, т. е.

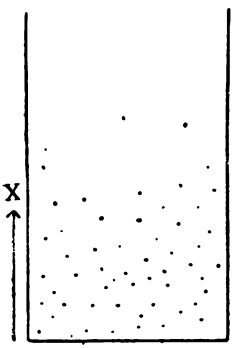

Рис. 29.

$$N = D\frac{dn'}{dx}. \tag{42}$$

Но, с другой стороны, то же число N равно средней скорости v, с которой ионы движутся вверх, умноженной на число ионов n' в кубическом сантиметре (все на расстоянии x от дна), т. е. $N = n'\,V$. Отсюда и из уравнения (42) имеем

$$V = \frac{D}{n'}\,\frac{dn'}{dx}.$$

Силой, заставляющей эти n' ионов совершать восходящее движение, является разность парциальных давлений ионов вверху и внизу кубика в 1 $см^3$, расположенного в точке x. Эта сила равна поэтому $\frac{dp}{dx}$ динам; отношение действующей силы к произведенной ею скорости равно

$$\frac{\frac{dp}{dx}}{\frac{D}{n'} \cdot \frac{dn'}{dx}}.$$

Но это отношение не должно зависеть от того, какого рода сила действует на ионы, заставляя их двигаться. Представим себе поэтому, что те же самые n' ионов приведены в движение не процессом диффузии, а электрическим полем силы F. Полная сила, действующая на эти n' ионов будет тогда Fen'. Если мы обозначим произведенную скорость через v, то отношение действующей силы к произведенной ею скорости будет теперь равно $\frac{Fen'}{v}$. На основании того факта, что это отношение не зависит от того, какого рода сила служит причиной движения, мы можем написать

$$\frac{Fen'}{v} = \frac{\frac{dp}{dx}}{\frac{D}{n'} \frac{dn'}{dx}}. \tag{43}$$

Пусть теперь v_0 обозначает скорость в поле, равном единице; эта величина носит специальное название „подвижности ионов". Тогда $\frac{v}{F} = v_0$. Далее, в виду того, что парциальное давление p пропорционально n', т. е. что $p = Kn'$, имеем $\frac{dp}{p} = \frac{dn'}{n'}$. На основании этого, уравнение (43) приводится к виду

$$\frac{en'}{v_0} = \frac{1}{\left(\frac{D}{p}\right)}.$$

или

$$v_0 = De\frac{n'}{p}. \tag{44}$$

Но если мы предположим, что в отношении давления ионы действуют, как незаряженные молекулы (в свое время это предположение не было вполне достоверным, но позднее справедливость его была доказана), то мы будем иметь $\frac{n'}{p} = \frac{n}{P}$, где n есть число молекул в кубическом сантиметре воздуха, а P производимое ими, т. е. атмосферное, давление. Уравнение (44) даст нам тогда

$$ne = \frac{v_0 P}{D}. \tag{45}$$

В. ПЕРВАЯ ПОПЫТКА ТОУНСЕНДА ОПРЕДЕЛИТЬ e.

На рис. 30 показано устройство употреблявшегося прибора. Кислород, поднимающийся с электрода E, сперва пропускался сквозь раствор иодистого калия в A с целью удаления озона, а затем сквозь

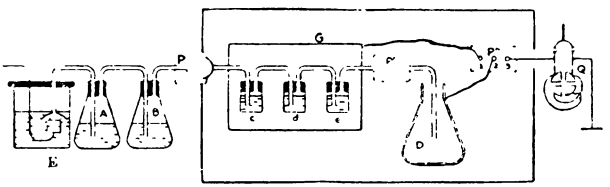

Рис. 30.

воду в B, чтобы дать ионам возможность образовать облако. Этот насыщенный влагой кислород проходил по каналу в электрическом изоляторе — бруске из парафина P — в трубки c, d, e, содержавшие концентрированную серную кислоту. Эти высушивающие трубки удаляли из пропускаемого газа всю влагу. а также ту часть заряда, которая находилась на ионах, действительно пришедших в соприкосновение с серной кислотой при прохождении через трубки c, d, e. Сухой газ с остатком заряда проходил по каналу в парафиновом бруске P' в бутыль D. (Если исследуемый газ был легче воздуха, как например, водород, то бутыль D держалась, конечно, опрокинутой). Наружная поверхность бутыли была покрыта оловянной фольгой, соединенной с одной из трех чашечек со ртутью в парафиновом бруске P''. Если газ в бутыли D не был первоначально заряжен, то на обкладке из оловянной фольги этой бутыли появлялось вследствие индукции количество электричества, в точности равное заряду, входящему в бутыль. Этот заряд q_1 измерялся так: чашечка № 2 соединялась с чашечкой № 3, соединенной с квадрантным элек-

трометром Q, и затем наблюдалось его отклонение каждую минуту. Аналогично, полное количество электричества, оставляемое ежеминутно в осушающих трубках c, d, e, в точности равно заряду, появляющемуся вследствие индукции на наружных стенках полого металлического сосуда G, окружающего трубки c, d, e. Этот заряд q_2 может быть измерен, если, соединив чашечку № 1 с чашечкой № 3, наблюдать отклонение квадрантного электрометра каждую минуту, Число кубических сантиметров газа, проходящее в одну минуту через прибор, определяется без труда из числа ампер тока, проходящего через электрический прибор E, и из электрохимического эквивалента газа. Разделив заряды, появляющиеся в одну минуту в D и G, на число кубических сантиметров газа, проходящее в каждую минуту через прибор, мы получим полную плотность заряда (заряд кубического сантиметра), несомаго облаком,

Прирост в весе осушающих трубок c, d, e, приходящийся на каждый кубический сантиметр проходящего газа, минус вес одного кубического сантиметра насыщенного водяного пара даст вес одного кубического сантиметра тумана. Этим заканчиваются измерения, упомянутые в пунктах (2) и (3) стр. 24 и 27.

Что касается уравнения (4) стр. 38, то средние размеры капелек воды измерялись Тоунсендом следующим образом. Облако выходящее из B, вводилось в сосуд, и затем наблюдалось время, в течение которого вершина облака оседала на измеренное число сантиметров. Радиус капель получался тогда на основании чисто теоретического исследования, выполненного сэром Джорджем Стоксом (Sir George Stokes)[1]). По Стоксу, скорость v_1 падения шаровидной капли в газе с коэффициентом внутреннего трения η дается формулой

$$v_1 = \frac{2}{9}\frac{ga^2}{\eta}\sigma,$$

где σ есть плотность капли. Отсюда Тоунсенд получил средний радиус a капель и вычислял их средний вес m по известной формуле

$$m = \frac{4}{3}\pi a^3\sigma.$$

После этого он мог перейти к уравнению (5), см. стр. 41.

[1]) Lamb, „Hydrodynamics", 1895, p. 533.

С. УРАВНЕНИЕ БРОУНОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ.

Ланжевен (Langevin) [1]), в Париже, дал весьма простой вывод уравнения Эйнштейна, который мы здесь и приводим. Из кинетической теории газов мы имеем соотношение $PV = RT = \frac{1}{3} Nm\overline{c^2}$, где $\overline{c^2}$ есть средний квадрат скорости молекул, N число молекул в одной граммолекуле и m масса каждой молекулы. Отсюда E, средняя кинетическая энергия беспорядочного движения каждой молекулы, равна $E = \frac{1}{2} m\overline{c^2} = \frac{3}{2} \frac{RT}{N}$.

Так как в наблюдениях над Броуновским движением мы регистрируем только движения вдоль одной оси, мы разделим полную энергию беспорядочного движения на три части, каждая из которых соответствует движению по одной из трех осей. Обозначая скорость вдоль оси x через $\frac{dx}{dt}$, мы имеем

$$\frac{E}{3} = \frac{1}{2} m \overline{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2} = \frac{1}{2} \frac{RT}{N}. \tag{46}$$

Согласно предположению Эйнштейна, каждая Броуновская частица обладает средней энергией движения вдоль каждой из осей, равной $\frac{1}{2} \frac{RT}{N}$. Движение этой частицы происходит вследствие бомбардировки молекул. Чтобы написать для каждого данного момента уравнение движения частицы, подвергнутой действию такого рода сил, нам нужно знать, во первых, значение X составляющей по оси x всех мгновенных сил, происходящих от толчков молекул, и, во вторых, сопротивление среды движению частицы. Последнюю величину мы приняли равной Kv, и мы нашли, что для случая движения капель масла в газе значение величины K есть $\frac{6\pi\eta a}{1 + A\frac{l}{a}}$. Уравнение мгновенного движения частицы под действием бомбардировки молекул примет тогда вид

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = K \frac{dx}{dt} + X. \tag{47}$$

[1]) „Comptes Rendus", CXLVI (1908), 530.

Так как в Броуновском движении нас интересуют только абсолютные величины смещений, независимо от их знака, то желательно преобразовать уравнение так, чтобы в него входили x^2 и $\left(\frac{dx}{dt}\right)^2$. Для этого достаточно умножить обе части его на x. Подставляя вместо $x\frac{d^2x}{dt^2}$ его значение

$$\frac{1}{2}\frac{d^2(x^2)}{dt^2}-\left(\frac{dx}{dt}\right)^2,$$

получим тогда

$$\frac{m}{2}\frac{d^2(x^2)}{dt^2}-m\left(\frac{dx}{dt}\right)^2=-\frac{K}{2}\frac{d(x^2)}{dt}+Xx. \qquad (48)$$

Ланжевен рассматривает теперь средний результат, получающийся, если приложить это уравнение в данный момент времени к большому числу одинаковых частиц.

Пусть $\overline{x^2}$ означает среднее из большого числа различных значений x^2; обозначим также $\frac{d(\overline{x^2})}{dt}$ через z. Ланжевен подставляет теперь $\frac{RT}{N}$ вместо $m\left(\overline{\frac{dx}{dt}}\right)^2$, и, принимая во внимание, что в последнем члене справа величина X, столь же часто бывает положительной, как и отрицательной, и что, следовательно, $\overline{Xx}=0$, он получает

$$\frac{m}{2}\frac{dz}{dt}-\frac{RT}{N}=-\frac{Kz}{2}.$$

По разделении переменных это уравнение переходит в

$$\frac{dz}{\left(z-\frac{2RT}{NK}\right)}=-\frac{K}{m}\,dt.$$

Интегрирование последнего уравнения между пределами 0 и τ дает

$$z=\frac{2RT}{NK}+Ce^{-\frac{K}{m}\tau}. \qquad (49)$$

Для не слишком малого промежутка времени τ (такого, что его можно измерить) это выражение приводится к первому члену. В самом деле, чтобы Броуновское движение могло быть вообще замечено, нужно, чтобы a не превышало 10^{-4} *см*. Так как K, грубо говоря, равно $6\pi\eta a$, то, принимая плотность частицы равной еди-

нице, мы получим

$$\frac{m}{K} = \frac{\frac{4}{3}\pi(10^{-4})^3}{6\pi 0{,}00018 \times 10^{-4}} \sim 10^{-5}$$

Следовательно, при τ, превышающем 10^{-5} секунд, $e^{-\frac{K}{m}\tau}$ быстро приближается к нулю, так что для поддающихся измерению промежутков времени

$$z = \frac{2RT}{NK}$$

или

$$\frac{d(\overline{x^2})}{dt} = \frac{2RT}{NK}.$$

Если обозначить через $\Delta\overline{x^2}$ изменение $\overline{x^2}$ за время τ, то мы будем иметь

$$\Delta x^2 = \frac{2RT}{NK}\tau. \tag{50}$$

Это уравнение говорит нам следующее. Если бы мы могли наблюдать в продолжении времени τ большое число n совершенно одинаковых частиц, то, возводя в квадрат смещение вдоль оси x каждой частицы за время τ и вычисляя среднее из этих квадратов смещений для всех частиц, мы получили бы величину $\frac{2RT}{NK}\tau$. Но, очевидно, тот же результат получится, если мы будем наблюдать одну и ту же частицу впродолжение n промежутков времени по τ секунд каждый и возьмем среднее от квадратов этих n смещений. Ясно, что второй способ более надежен, чем первый, ибо первый предполагает полную тождественность частиц.

D. ИНЕРЦИЯ ИЛИ МАССА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА НА СФЕРЕ РАДИУСА *a*.

Рис. 31 изображает магнит; площадь полюсов его равна A. Полюсы этого магнита отстоят на d *см* и обладают полным магнитизмом M и плотностью магнитизма σ; сила поля между ними равна H. При таких условиях, работа, потребная для переноса полюса, равного единице, от M к M', будет равна Hd; работа потребная для создания полюсов M и M', т. е. для переноса M,

единиц магнитизма на расстояние d при средней силе поля $\frac{H}{2}$, будет равна $\frac{HMd}{2}$. Отсюда полная энергия E_1 магнитного поля равна

$$E_1 = \frac{HMd}{2} = \frac{HA\sigma d}{2}.$$

или, в виду того, что $H = 4\pi\sigma$,

$$E_1 = \frac{H^2 Ad}{8\pi}.$$

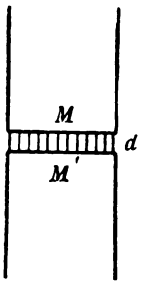

Рис. 31.

Но Ad представляет объем поля; поэтому плотность энергии (энергия единицы объема) E магнитного поля будет

$$E = \frac{H^2}{8\pi}. \tag{51}$$

Далее, если заряд e движется со скоростью v, то он создает магнитное поле, сила которого в плоскости, проходящей через заряд, перпендикулярной к направлению его движения и на расстоянии r от него, будет равна $\frac{ev}{r^2}$. Пусть θ будет угол между радиусом-вектором r и направлением движения заряда. Тогда в точке на конце радиуса-вектора r (координаты r, θ) сила магнитного поля будет равна

$$H = \frac{ev}{r^2} \cdot \sin\theta.$$

Отсюда, полная энергия магнитного поля, создаваемого движущимся зарядом, равна

$$\int E d\tau = \int \frac{H^2}{8\pi} d\tau,$$

где $d\tau$ есть элемент объема, и интегрирование следует распространить на всё пространство. Но выраженный через r, θ и φ элемент объема будет

$$d\tau = r d\theta \cdot dr \cdot r \sin\theta \, d\varphi$$

Следовательно,

$$\text{полная энергия} = \frac{e^2 v^2}{8\pi} \int \frac{\sin^2\theta}{r^4} d\tau = \frac{e^2 v^2}{8\pi} \int_a^\infty \frac{dr}{r^2} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \sin^3\theta \, d\theta = \frac{e^2 v^2}{3a}.$$

Так как кинетическая энергия равна $\frac{1}{2} mv^2$, то эквивалентная масса m движущегося заряда получится, если положить

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{e^2 v^2}{3a},$$

откуда

$$m = \frac{2}{3} \frac{e^2}{a}. \tag{52}$$

Радиус сферического заряда, имеющего массу равную наблюдаемой массе отрицательного электрона, получится, если подставить в последнее уравнение $e = 4{,}774 \times 10^{-10}$ эл.-ст. ед. $= 1{,}591 \times 10^{-20}$ эл.-м. ед. и

$$\frac{e}{m} = 1{,}767 \times 10^7 \text{ эл.-м. ед.}$$

Эти числа дают

$$a = 1{,}9 \times 10^{-13} \text{ см.}$$

Только-что полученное выражение для m справедливо, очевидно, лишь тогда, когда магнитное поле распределено вокруг движущегося заряда симметрично, как это и предполагалось при выполнении интегрирования. Это и будет иметь место, пока скорость v мала в сравнении со скоростью света c. Но начиная с 0,1 скорости света, масса заряда начинает заметно возрастать, и при достижении скорости света она становится бесконечно большой. Обозначим массу для малых скоростей через m_0, а массу для любых скоростей через m. Тогда, согласно теории, разработанной Лоренцом,

$$\frac{m}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \tag{53}$$

Эта формула была проверена Бухерером (Bucherer) для масс отрицательных электронов, обладавших скоростями от 0,3 до 0,8 скорости света.

Е. ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ И СРЕДНИЙ СВОБОДНЫЙ ПРОБЕГ МОЛЕКУЛ.

Пусть в пространстве, имеющем форму кубика с ребром в 1 *см*, находится одна неподвижная молекула. Вероятность того, что другая молекула, пролетая через кубик, заденет единственную содер-

жащуюся в нем молекулу, будет, очевидно, $\frac{\pi d^2}{1}$, где d есть средний диаметр обеих молекул. Если в кубике содержится n молекул, то эта вероятность увеличится в n раз, т. е. она будет равна $\frac{n\pi d^2}{1}$. Но в среднем вероятность столкновения на пути в один сантиметр равна фактическому числу столкновений на протяжении этого сантиметра. Средний свободный пробег l есть пройденное расстояние, деленное на число столкновений, испытанных при прохождении этого расстояния. Отсюда

$$l = \frac{1}{n\pi d^2}. \tag{54}$$

Таково выражение для среднего свободного пробега молекулы, движущейся сквозь группу неподвижных молекул. Если же все молекулы находятся в движении, то они будут иногда претерпевать столкновения, которые иначе могли бы быть избегнуты. Потому, столкновения будут многочисленнее, когда молекулы движутся, чем когда они неподвижны; насколько многочисленнее — это будет зависеть от закона распределения скоростей молекул. Максвелловский закон распределения вводит в знаменатель множитель $\sqrt{2}$ (см. Jeans, „Dynamical Theory of Gases"), так что уравнение (54) принимает теперь вид

$$l = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot n\pi d^2}. \tag{55}$$

F. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА СВОБОДНЫХ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ЯДРЕ АТОМА ПО МЕТОДУ РЕЗЕРФОРДА.

Пусть N означает число свободных положительных электронов в ядре, e заряд электрона, E известный нам заряд частицы α, равный $2e$, а $\frac{1}{2}mV^2$ известную кинетическую энергию этой частицы. Инерция отрицательных электронов ничтожно мала по сравнению с инерцией частицы α; поэтому, если последняя при пролете сквозь атом изменит резким образом свое направление, то это изменение будет обусловлено действием заряда ядра. Пусть b означает наименьшее возможное расстояние частицы α от центра ядра; на такое расстояние частица приближается при столкновении „в лоб", после чего она отбрасывается в прямо противоположном направле-

нии. Первоначальная кинетическая энергия частицы $\frac{1}{2} mV^2$ должна равняться работе, затраченной на преодоление электрического поля при сближении на расстояние b, т. е.

$$\frac{1}{2} mV^2 = \frac{NeE}{b}. \tag{56}$$

Предположим теперь, что столкновение не происходит „в лоб", но что первоначальное направление частицы α таково, что если бы она не свернула в сторону, то наименьшее расстояние ее до ядра было бы p (рис. 32). Частица отклонится теперь не на 180^0, как раньше, а на некоторый другой угол φ. Из геометрических свойств гиперболы и из простейших начал механики вытекает, что

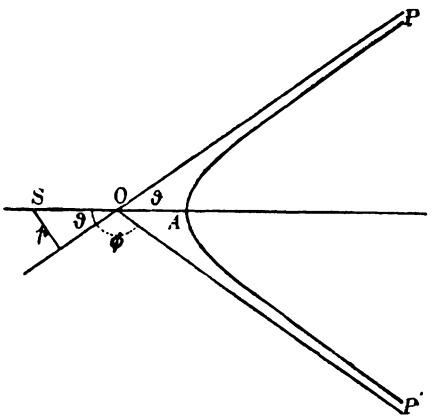

Рис. 32.

$$p = \frac{b}{2} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}. \tag{57}$$

Докажем это. Пусть кривая PAP' представляет траекторию частицы и пусть $\angle POA = \theta$. Пусть V есть скорость частицы при вступлении в атом, а v скорость в точке A. Закон сохранения момента количества движения (закон площадей) дает

$$pV = SA \cdot v, \tag{58}$$

а закон сохранения энергии

$$\frac{1}{2} mV^2 = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{NeE}{SA},$$

откуда

$$v^2 = V^2 \left(1 - \frac{b}{SA}\right). \tag{59}$$

Известно, что эксцентриситет $\varepsilon = \sec \theta$ и что для всякого конического сечения расстояние от центра до фокуса равно большой полуоси, умноженной на эксцентриситет, т. е. что

$$SO = OA \cdot \varepsilon.$$

Отсюда следует

$$SA = SO + OA = SO\left(1 + \frac{1}{\varepsilon}\right) = p \operatorname{cosec} \theta\,(1 + \cos\theta) = p \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2}\,.$$

Но из уравнений (58) и (59)

$$p^2 = SA\,(SA - b) = p \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2}\left(p \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} - b\right).$$

Следовательно,

$$b = 2p \operatorname{ctg} \theta. \tag{60}$$

А так как угол отклонения

$$\varphi = \pi - 2\theta,$$

то отсюда вытекает

$$\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} = \frac{2p}{b}, \tag{61}$$

что и требовалось доказать.

Из метода, которым мы пользовались в приложении *EW*, ясно, что если в каждом кубическом сантиметре металлического листка толщины t находится n атомов радиуса R, то вероятность M, чтобы частица, малая по сравнению с R, пронизала один из этих атомов при прохождении сквозь листок, будет равна

$$M = \pi R^2 nt.$$

Аналогично, вероятность m прохождения на расстоянии не большем p от центра атома будет

$$m = \pi p^2 nt.$$

Если эта вероятность мала по сравнению с единицей, то она представляет ту долю ϱ данного числа проходящих сквозь листок частиц, которая действительно сближается по меньшей мере на расстояние p от ядра атома в листке.

Та доля полного числа частиц, которая попадает на расстояния, лежащие между p и $p + dp$, получается дифференцированием предыдущего равенства:

$$dm = 2\pi pnt \cdot dp\,.$$

Но из уравнения (57)

$$dp = -\frac{b}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \operatorname{cosec}^2 \frac{\varphi}{2}\, d\varphi\,,$$

откуда

$$dm = -\frac{\pi}{4} ntb^2 \operatorname{ctg}\frac{\varphi}{2} \operatorname{cosec}^2\frac{\varphi}{2} d\varphi.$$

Следовательно, та доля ϱ, которая отклоняется на угол, лежащий между φ_1 и φ_2, получится, если мы проинтегрируем предыдущее выражение в этих пределах.

$$\varrho = \frac{\pi}{4} ntb^2 \left(\operatorname{ctg}^2\frac{\varphi_1}{2} - \operatorname{ctg}^2\frac{\varphi_2}{2}\right).$$

Это число и определялось Гейгером и Марсденом (Geiger, Marsden) посредством прямого подсчета частиц α по методу сцинтилляций. Так как n и t известны, можно было сразу определить b. Оказалось, что величина b меняется в зависимости от природы атома; для тяжелых атомов эта величина больше чем для легких; для золота $b = 3{,}4 \times 10^{-12}$ *см*. Это число представляет таким образом верхний предел размеров ядра атома золота.

Как только для данного атома найдено b, можно решить уравнение (56) относительно N, ибо все величины: E, e и $\frac{1}{2} mV^2$ известны. По этому-то способу и найдено, что число положительных электронов в ядре приблизительно равно половине атомного веса атома и что размеры ядра чрезвычайно малы по сравнению с размерами всего атома.

G. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ВЫВОД ЧИСЛЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА, ПО БОРУ.

Ньютоново уравнение для круговой орбиты электрона e, обращающегося на расстоянии a и с числом оборотов n вокруг центрального притягивающего заряда E, гласит:

$$\frac{Ee}{a^2} = (2\pi n)^2 ma. \tag{62}$$

Кинетическая энергия электрона равна $\frac{1}{2} m(2\pi na)^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{eE}{a}$.

Работа, которую нужно затратить, чтобы удалить электрон с его орбиты в положение покоя в бесконечность, равна

$$\frac{eE}{a} \quad \frac{1}{2} m(2\pi na)^2 = \frac{1}{2}\frac{eE}{a}.$$

Обозначив эту величину через T, будем очевидно, иметь

$$\left.\begin{aligned} 2a &= \frac{eE}{T}; \\ n &= \frac{\sqrt{2}\,T^{3/2}}{\pi eE\sqrt{m}}. \end{aligned}\right\} \qquad (63)$$

Комбинируя эти уравнения с уравнением (37) на 167 стр.:

$$T = \frac{1}{2}\tau h n$$

(третья гипотеза Бора), получим без труда

$$\left.\begin{aligned} T &= \frac{2\pi^2 me^2E^2}{\tau^2h^2}; \\ 2a &= \frac{\tau^2h^2}{2\pi^2meE}; \\ n &= \frac{4\pi^2me^2E^2}{\tau^3h^3}. \end{aligned}\right\} \qquad (64)$$

Излученная при перескоке с одной орбиты на другую энергия равна

$$T_{\tau_1} - T_{\tau_2} = \frac{2\pi^2me^2E^2}{h^2}\left(\frac{1}{\tau_1^2} - \frac{1}{\tau_2^2}\right).$$

Полагая эту величину равной $h\nu$, получим Бальмеровскую формулу (34) (стр. 165)

$$\nu = N\left(\frac{1}{\tau_1^2} - \frac{1}{\tau_2^2}\right),$$

в которой

$$N = \frac{2\pi^2e^2E^2m}{h^3}.$$

Так как для водорода $E = e$, то имеем

$$N = \frac{2\pi^2me^4}{h^3}$$

и из (64)

$$a = \frac{\tau^2h^2}{4\pi^2me^2}.$$

Н. ЭЛЕМЕНТЫ, ИХ АТОМНЫЙ НОМЕР, АТОМНЫЙ ВЕС и ХИМИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ.

1 H
1,008

0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
2 He 3.99	3 Li 6,94	4 Be 9,1	5 B 11.0	6 C 12.00	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.0			
10 Ne 20,2	11 Na 23.00	12 Mg 24,32	13 Al 27,1	14 Si 28,3	15 P 31,04	16 S 32.06	17 Cl 35.46			
18 A *39,88*	19 K *39,10*	20 Ca 40,07	21 Sc 44,1	22 Ti 48.1	23 V 51,0	24 Cr 52,0	25 Mn 54,93	26 Fe *55,84*	*27 Co* *58,97*	28 Ni *58,68*
....	29 Cu 63,57	30 Zn 65,37	31 Ga 69,9	32 Ge 72,5	33 As 74,96	34 Se 79.2	35 Br 79.92			
36 Kr 82.92	37 Rb 85.45	38 Sr 87,63	39 Y 88,7	40 Zr 90.6	41 Nb 93.5	42 Mo 96.0	**43**—	44 Ru 101.7	45 Rh 102.9	46 Pd 106,7
....	47 Ag 107,88	48 Cd 112.40	49 In 114,8	50 Sn 118.7	51 Sb 120.2	52 Te *127,5*	53 J *126,92*			
54 X 130.2	55 Cs 132,81	56 Ba 137.37	57 La 139,0	58 Ce 140,25	59 Pr 140,6	60 Nd 144.3	**61**-62 Sm 150.4	63 Eu 152	64 Gd 157.3	65 Tb 159,2	66 Ds 162,5
67 Ho 163,5	68 Er 167,7	69 Tu 168,5	70 Yb 173,5	71 Lu 175,0	**72**— Hf [1]	73 Ta 181.5	74 W 184.0	**75**—	76 Os 190.9	77 Ir 193,1	78 Pt 195,2
....	79 Au 197.2	80 Hg 200,6	81 Tl 204,0	82 Pb 207.20	83 Bi 208,0	84 Po (210,0)	**85**—			
86 Em (222.0)	**87**—	88 Ra 226.0	89 Ac (227)	90 Th 232.15	Ur X_2 (234)	92 Ur 238,2	....			

Элементы, для коих порядок атомных номеров не совпадает с порядком атомных весов, напечатаны курсивом.

Атомные номера, соответствующие недостающим элементам, напечатаны жирным шрифтом.

[1]) Элемент Гафний (Hf) открыт в 1923 г Хевеши и Де-Костером в Копенгагене. *Прим. ред.*

СПИСОК ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ.

1 Водород
2 Гелий
3 Литий
4 Бериллий
5 Бор
6 Углерод
7 Азот
8 Кислород
9 Фтор
10 Неон
11 Натрий
12 Магний
13 Алюминий
14 Кремний
15 Фосфор
16 Сера
17 Хлор
18 Аргон
19 Калий
20 Кальций
21 Скандий
22 Титан
23 Ванадий
24 Хром
25 Марганец
26 Железо
27 Кобальт
28 Никкель
29 Медь
30 Цинк
31 Галлий
32 Германий
33 Мышьяк
34 Селен
35 Бром
36 Криптон
37 Рубидий
38 Стронций
39 Иттрий
40 Цирконий
41 Ниобий
42 Молибден
43 ————
44 Рутений
45 Родий
46 Палладий
47 Серебро
48 Кадмий
49 Индий
50 Олово
51 Сурьма
52 Теллур
53 Иод
54 Ксенон
55 Цезий
56 Барий
57 Лантан
58 Церий
59 Празеодимий
60 Неодимий
61 ————
62 Самарий
63 Европий
64 Гадолиний
65 Тербий
66 Диспрозий
67 Гольмий
68 Эрбий
69 Тулий
70 Иттербий
71 Лутеций
72 Гафний
73 Тантал
74 Вольфрам
75 ————
76 Осмий
77 Иридий
78 Платина
79 Золото
80 Ртуть
81 Таллий
82 Свинец
83 Висмут
84 Полоний
85 ————
86 Эманация (Нитон)
87 ————
88 Радий
89 Актиний
90 Торий
91 Уран X_2
92 Уран

ДОБАВЛЕНИЕ РЕДАКТОРА.

РАБОТЫ Р. МИЛЛИКЭНА И ЕГО СОТРУДНИКОВ В 1918—1923 г.

Деятельность лаборатории Милликэна за последние годы стала исключительно интенсивной. В редкой книжке американского журнала: „Physical Review“ не имеется работы выполненной в этой лаборатории, помещающейся в настоящее время в Калифорнийском Технологичестом Институте в Пазадене, вблизи знаменитой обсерватории на Mount Wilson. Мы имеем возможность коснуться только основных направлений деятельности лаборатории Милликэна и наиболее существенных ее достижений.

Метод капель, подробно изложенный в тексте, выполнив свое прямое назначение точного определения заряда электрона, используется в настоящее время Милликэном в некотором смысле в обратном направлении для решения других задач. Величина электронного заряда считается определенной и точная кратность зарядов капель электронному заряду вполне доказанной. Заряд электрона фигурирует теперь в уравнениях метода капель в качестве известной величины, при помощи которой определяются другие неизвестные.

Закон падения маленьких сферических капель в газе должен, вообще говоря, отличаться от закона Стокса, как это следует из теоретических соображений и экспериментальных данных Милликэна, подробно изложенных в книге. В последнее время Милликэн опубликовал несколько работ, посвященных выяснению привильной формы закона падения капель в газе [1]). Когда отношение среднего свободного пути молекул газа l к радиусу капли a мало, то сопротивление движению приктически всецело обусловлено вязкостью и пропорционально a; если же $\frac{l}{a}$ становится большим (разреженный газ, маленькая капля), то сопротивление, наоборот, почти вполне определяется инерцией молекул, ударяющихся

[1]) Сводка этих работ помещена в „Physical Review“, XXII (1923).

о каплю и должно быть пропорциональным поверхности сферы, т. е. a^2. Эмпирическое уравнение:

$$F = \frac{6\pi\eta a v}{\left[1 + \frac{A' l}{a}\right]} \tag{1}$$

удовлетворяет обоим случаям (обозначения см. в тексте книги). Из кинетической теории газов вытекает, однако, что A' не постоянно, но изменяется от 0,7004 для малых значений $\frac{l}{a}$ до 1,164 для больших значений $\frac{l}{a}$. Милликэн полагает в виде пробы $A' = A + B^{-\frac{ca}{l}}$, подставляя это значение в (1). Значения A' были определены на опыте для масляных капель в воздухе в широком интервале изменения $\frac{l}{a}$ от 0,5 до 134. Измерения с точностью не меньшей 2 % согласуются с формулой (1), при чем значения постоянных таковы $A = 0{,}864, B = 0{,}290, c = 1{,}25$. Опыты с другими каплями показали, что постоянные A и B меняются в зависимости от природы газа и материала капель, однако сумма $A + B$ постоянна в пределах 2 — 3 проц. для различных сортов капель. Разбирая различные возможные типы отражения молекул от поверхности капель, Милликэн приходит к выводу, что найденный им закон и значения постоянных A и B, определенные на опыте, согласуются только со случаем „зеркального“ отражения (10 проц.) и так называемого „диффузного“ отражения (90 проц.). Под диффузным отражением при этом понимается испускание молекулы со всех элементов поверхности капли в направлениях, удовлетворяющих закону распределения скоростей между молекулами Максвелла.

Отклонения от закона Стокса, выражаемые уравнением (1), в свою очередь могут быть использованы для изучения различных свойств газов. В гидродинамической теории величина $A'l$ в уравнении (1) соответствует коэффициенту скольжения в первом приближении.

Для того случая, когда молекулы все отражаются от падающей маленькой сферы диффузно, кинетическая теория газов приводит к значению 0,7004 для A в уравнении (1). Если же диффузно рассеивается только некоторая доля f молекул, то A должно равняться $0{,}7004\left(\frac{2}{f} - 1\right)$. В связи с этим, в лаборатории Милликэна произведены много-

численные точные измерения коэффициента скольжения для различных поверхностей и газов, при том различными методами. Сводка и разбор результатов этих работ даны Милликэном в 1923 г.[1]). Величина A меняется в зависимости от поверхности; для ртутной поверхности в воздухе $A = 0{,}70$, для масляной и стеклянной 0,87, для свежего шеллака 1,07. Она зависит также и от природы газа. Для масла в водороде $A = 0{,}81$, в углекислоте 0,82, в воздухе 0,86, в гелие 0,90. Вычисляя отсюда по вышеприведенной формуле $A = 0{,}7400\left(\frac{2}{f} - 1\right)$ значения коэффициента f диффузного рассеяния молекул, Милликэн находит, что f меняется в зависимости от поверхности. В воздухе для шеллака $f = 0{,}79$, для стекла 0,89, для ртути 1,00. Значение f зависит также и от природы газа. Для масла в гелие $f = 0{,}87$, в воздухе 0,895, в углекислоте и водороде 0,92.

Опыты с определением валентности ионов, образующихся в газе при прохождении α-лучей, описанные в тексте, были продолжены дальше, тем же методом взвешенных капель[2]). На 2200 наблюдений с быстрыми α-частицами приходится только 5 случаев, в которых можно предполагать образование двухвалентных ионов в самых разнообразных газах, остальные наблюдения свидетельствуют об образовании однозарядных ионов.

Дальнейшие исследования производились с медленными α-частицами в качестве ионизаторов, на их излете, когда они обладают наибольшей ионизующей способностью. В этом случае образование двухвалентных ионов в заметном количестве было найдено только для гелия. Именно, 16 проц. случаев ионизации сопровождалось появлением двухвалентного иона гелия.

Эти факты приводят к тому заключению, что в случае атома гелия два его электрона должны находиться в течение некоторого времени в весьма близком расстоянии один от другого. В первоначальной теории Бора предполагалось, что два электрона гелия движутся вокруг положительного ядра по одной орбите, находясь на противоположных концах диаметра. Такое воззрение явно противоречит результатам указанных опытов. В последнее время Бор предложил новую пространственную модель атома гелия, в которой два электрона движутся по различным орбитам, перекрещивающимся

[1]) „Phys. Rev.", XXI (1923), 217.

[2]) „Phys. Rev.", XV (1920), 157, также „Rapports etdiscussions du Conseil Solvay", 1923, p. 262.

в пространстве под углом в 60° [1]). В этой модели явление, наблюдавшееся Милликэном и его сотрудниками, становится понятным; в течение короткого времени электроны встречаются, и, если в это же время подходит ионизующая α-частица, то она может отбросить оба электрона сразу, создавая двухвалентный ион гелия. С другой стороны, одновалентность ионов в случае остальных элементов показывает, что их электроны сконцентрированы около, ядра за исключением одного внешнего электрона, что вполне согласуется с теорией спектров и строения атомов Бора [1]).

Пытаясь установить связь между законами рентгеновских спектров Мозелея-Бора (стр. 154 и 170) и коротким ультра-фиолетовым спетром, Милликэн и его сотрудники разработали или вернее усовершенствовали методы изучения недоступной ранее области коротких ультра-фиолетовых волн. Вакуум в соответствующем спектрографе был доведен до крайней доступной степени разрежения ($<10^{-4}$ *мм* Hg). Источником света служили перемежающиеся искровые разряды при нескольких сотнях тысяч вольт напряжения. Для изучения спектра были изготовлены специальные диффракционные решетки с 500 и 1100 штрихами на 1 *мм*. Для получения большей силы света штрихи наносились чрезвычайно тонко. Постоянная решетки в этом случае в 4 — 5 раз больше длины волны, а для наиболее коротких волн, наблюдавшихся Милликэном, даже в 100 раз, поэтому поверхность решетки и штрихи должны быть особо тщательными и точными.

Работа увенчалась блестящим успехом [2]); удалось открыть ряд спектральных линий для различных элементов с длиною волны почти в десять раз меньшей, чем наиболее короткие волны, наблюдавшиеся до тех пор. У алюминия были найдены, например, такие линии: 13,66 $\mu\mu$; 14,43; 137,97; 138,45; 160,59; 161,20; 167,10; 185,47; 186,27. В последнее время [3]) таким образом сфотографировано свыше 1000 новых ультра-фиолетовых линий. Интервал между ультра-фиолетовыми и рентгеновскими лучами заполнен: наиболее мягкие рентгеновские лучи соответствуют длине волны около 1 $\mu\mu$. Можно, следовательно, говорить об открытии новой милликэновской ультрафиолетовой области спектра.

Работы Милликэна и его сотрудников по изучению фотоэлектрического эффекта, предпринятые в связи с проверкой основ-

[1]) Ср. Н. Бор. Три статьи о спектрах и строении атомов. Москва, 1923,

[2]) „Astrophys. Journ." LII (1920), 47; LIII (1921), 150; „Proc. Nat. Ac.", VII, (1921), 289.

[3]) „Phys. Rev.", XXII (1923), 523.

ных соотношений теории квантов (стр. 177), также продолжались в различных направлениях. На основании работ, изложенных в тексте, и других исследований удалось с точностью установить следующее основное соотношение фото-электрического эффекта:

$$\frac{1}{2} mv^2 = (PD + K)e = h\nu - w = h\nu - h\nu_0, \qquad (2)$$

где v — скорость вылетающего с металлической поверхности электрона, ν — частота падающего света, w — работа, затрачиваемая на извлечение электрона из металла, ν_0 — минимальное значение ν, при котором электрон может еще выбраться наружу; PD — „задерживающий потенциал", — т. е. такой потенциал, который требуется для воспрепятствования образованию фото-тока, K — контактная разность потенциалов между освещенным металлом и Фарадеевым цилиндром, в который ловится вылетающий электрон. Работу w нужно, вообще говоря, представлять себе сложенной из двух: работы w_1 — извлечения электрона из атома внутри металла и работы w_2, соответствующей преодолению поверхностных сил.

Если написать уравнение (2) для двух различных металлов A и B, и вычесть одно уравнение из другого, то нетрудно вывести[1]) такое соотношение:

$$K_{AB} = \frac{h}{e} (\nu_{0B} - \nu_{0A}) - (PD_A - PD_B), \qquad (3)$$

где K_{AB} — контактная разность потенциалов между металлами A и B, остальные же величины имеют прежнее значение, но отнесены к соответствующим металлам. Опыты Милликэна и некоторых других исследователей показали, что для чистых металлов, в пределах ошибок наблюдения

$$PD_A - PD_B = O,$$

что равносильно по мнению Миликэна тому, что работа w — извлечения электрона из атома — в случае фото-электрического эффекта практически равна нулю, вся энергия кванта $h\nu$ сообщается целиком вылетающему электрону. Этот результат, если только он подтвердится, приобретает первостепенное значение для теории света и фото-электрического эффекта.

---

[1]) „Phys Rev.", XVII, (1921), 399, „Rapports et discussions du Conseil de Solvay", (1923), p. 122.

В других опытах, произведенных в лаборатории Милликэна, обнаружена независимость фото-электрического тока от температуры в широких пределах в случае чистых металов, а также постоянное высокое значение фото-тока при удалении различных загрязнений с поверхности. Последнее обстоятельство приобретает существенную важность в связи с многократными попытками объяснять фото-электрический эффект химическими процессами, происходящими на поверхности металла.

В заключение нашего, далеко не полного, обзора укажем на исследования Милликэна и некоторых его сотрудников по вопросу об извлечении электронов из металлов сильными электрическими полями[1]). При тщательной очистке и обезгаживании металлов (например, в случае вольфрама) оказалось, что первые следы переноса электронов в крайнем вакууме обнаружились только при огромном поле в 4 миллиона волт на 1 *см*, искра появлялась только при 6 миллионах вольт на 1 *см*. В необработанном вольфраме электронный ток появлялся уже при 200 000 вольт на 1 сантиметр и возрастал приблизительно в биллион раз при градиенте потенциала в миллион вольт. В этом случае электронный ток, повидимому, связан с ничтожными вкраплениями примесей на поверхности металлов.

---

[1]) „Phys. Rev.", XV (1920), 239; „Phys. Rev.", XXII (1923), 525; ср. также „Rapports et discussions du Conseil de Solvay" (1923), p. 69.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.

Авогадро, закон 142, число (постоянная)—23, 94, 120 сл, 189.
Ампер, токи 16.
Атом, модель—Бора 164 сл.,—диаметр —142, крайний—(Ultim-Atom) 164, строение—141 сл, 150, число электронов в—152 сл., ядро—151 сл.
Атомность (моментов количества движения) 169.
Атомный номер 154 сл., 204.

Бальмер, серии 161 сл., 165, 203.
Больцман-Максвелл, закон — 63.
Бор, атом — 164 сл.
Броуновское движение 8, 127,—в газах 112 сл., уравнение — 194 сл.

Валентность ионов при ионизации газов 99 сл., 104, 107 сл., 203 сл.,—химическая 12.
Валентные электроны 171.
Величина h 168, 181, 189.
Весы электрические 78.
Взвешивание капли 77.
Вин, постоянная - 90, 189.
Внутреннее трение в воздухе 71 сл.

Газовая молекула, диаметр — 142 сл., 169, поперечное сечение — 199, средний свободный пробег — 6, 142, 199.
Газовые ионы, изучение свойств — 51 сл., сравнение — с электрическим ионом 27 сл.
Газы, природа 25 сл., проводимость — 25, объяснение Кулона 25, опыты Варбурга 25.
Гамма (γ-)-лучи 176, 184.
Гипп, хроноскоп — 57.
Грам-молекула, объем — газа 24.

Демокрит, принципы — (по Тиндалю) 7 сл.

e, важность точного определения — 90, влияние испарения на определение — 37, 40, 43 сл.. 50, 66, 132 сл.. метод Г. А. Вильсона 40 сл., первоначальные попытки непосредственного определения — 34 сл., первая работа Милликэна (повторение опыта Вильсона) 42, вторая работа Милликэна (метод уравновешения капель) 43, главная работа Милликэна (точное определение—) **69** сл., работы сэра Джозефа Томсона по определению — 37 сл.. вторая работа Томсона 40, работа Тоунсенда 34 сл., 192, слабые места в его опытах 37, окончательные значения—94, 189 (по Милликэну), значение — по Гейгеру, Резерфорду и Регенеру 123, постоянство (неизменяемость)—137.

$\frac{e}{m}$ 123, 198, 202, определение величины — из явлений в разреженных трубках 32 сл., из явлений электролиза 21 сл., по Бухереру 168, по Зееману 32, по Пашену 170, по Дж. Дж. Томсону и Вихерту 32. определение величины — для положительных ионов по Вину 33, по Томсону 33.

Закон кратных отношений между зарядами капли 57, 59.
Заряд, все электростатические — на проводниках и изоляторах состоят из электронов 56 сл., — водорода при „растворении металла" в кислоте по Лапласу и Лавуазье 34. по Лоджу 35, по Энрайту 35, изменение — при низком давлении 61, изменение — в желаемом направлении 61 сл., измерение относительных—отдельных ионов (метод) 51, инерция электрического — 143 сл. 196 сл.. — ионов при электролизе 14 сл., механизм изменения капли 60 сл., определение положительного и отрицательного—9,—положительного и отрицательного электрона в точности равны между собою 64 сл., сопротивление среды движению капли не зависит от того. заряжена ли капля или нет 65 сл., сравнение — полученного от трения с — иона 56 сл., 59, с уменьшением давления изменения—происходят все реже и реже 61 сл, — частицы α 123 сл.

Извлечение электронов из металлов в сильном электрическом поле 211.
Излучение черного тела 186 сл.,—электромагнитное 3.
Изменение заряда, в желаемом направлении 61, механизм — капли 60,— при низком давлении 61, — происходит все реже и реже при изменении давления 61.
Изолирование отдельных ионов 51 сл.
Инерция электрического заряда 143 сл, 196 сл.
Ион газовый и электрический—27 сл.
Ион заряд — 30, 59, заряд отдельного газового—**49** сл., заряд — при электролизе 15, 23, захват одного — капелькой 50, 52, коэффициент диффузии газовых—27 сл., 190 сл., —при электролизе 22. подвижность газовых—27 сл.. 190 сл., изолирование отдельного — 51 сл., 60, исследование свойств отдельных— 52 сл , отрицательные—действуют в качестве ядер или центров для сгущения водяного пара более энергично, чем положительные—36, —рассматриваемый, как скопление нескольких молекул 29.
Ионизация, валентность при — газов 99 сл.. — в газах 31, 33, исследование явления—51 сл.. -лучами α 108 сл.. -лучами β 107, механизм— газов **97** сл., — при фотоэлектрических явлениях 105, 176 сл.. 178 сл., 183,—,производимая волнами эфира. 104 сл., 175 сл., сущность акта — **103**.
Испарение, влияние — на определение e 37. 40. 43, 44 сл.. 50, 66. 132. 133.

Капельки, метод уравновешения 43 сл., метод масляных — 51 сл.. величина — масла 52, 67. 81, **84**, 95 взвешивание — 77 сл.. электризация посредством трения 53. **56**.
Кванты, теория - 177.
Кинетическая теория 25.
Кинетическая энергия беспорядочного движения молекул, непосредственно наблюдаемая 62 сл.
Конвекционные токи. влияние — на определение e 37. 40, 51.
Корпускулы 21.
Корпускулярная теор. излучения 173 сл.
Коэффициент внутреннего трения воздуха 71 сл., 92.
Коэффициент диффузии газовых ионов 27, 104, 190, по измерениям Тоунсенда 28, Франка и Вестфаля 30, —скольжения 207, 208.
Крайний атом (Ultim-Atom) 164.
Кратные отношения 59.

Ленард. теория —для объяснения фотоэлектрических явлений 183.
Лучи Рентгена характеристические 154, 209.
Лучистая энергия, природа — 173 сл.

Максвелл-Больцман. закон - 63. закон распределения 117.
Масса, зависимость - от скорости 145, 198, - электрического заряда на сфере радиуса *a* 196 сл., электромагнитная теория происхождения — 143 сл.
Материя, атомистическая теория — 5. 12, 60, кинетическая теория—6, 8.
Метод Милликэна уравновешивания капель 43 сл.
Механизм изменения заряда капли 60 сл.. —ионизации газов **97** сл.
Мозелей, закон - 161, отклонение от этого закона 170.
Молекула 26. диаметр—142. 169, поперечный разрез—199. средний свободный пробег газовой—6, 142, 199.
Молекулярная физика 6.
Молекулярное движение, кинетическая энергия — 63 сл.. - - скорость 6.
Молекулярные токи по Амперу, теория Вебера 16 след.
Молекулярный заряд, при электролизе по Максвеллу 15, 60.
Момент количества движения, атомность — 169.

ne, значение — в электролитических процессах 24 сл., значение — для газов 27, 38, 190.
Ne, значение — в электролитических процессах 21 сл., для газов 27 сл., 92, 116, 118 сл. (Броуновское движение), 124 сл. (Регенер).
Номер атомный 158, 159, 204.

Образование облака по Вильсону 36, 39, — по Тоунсенду 35, 192.
Орбиты неизлучающих электронов 166 сл.
Отношения кратные 59.

Первичный элемент 1, 2.
Периодическая система 160, 204.
Подвижность газовых ионов 27 сл., 104, 190, - в сильном электрическом поле 29 сл , - при очень низком давлении 29 сл., — измерения Тоунсенда 28 сл., 104, — измерения Франка и Вестфаля 30, 104.
Положительные лучи 110.
Поперечный разрез молекулы 199.
Постоянная взрыва (неизменное отношение между энергией испускания и частотой падающего света) 186, —Вина C_2 90,—Планка 90. 167. 181, 189.—Ридберга 162 сл., 202, — Фарадея 92.
Постоянство *e* 137.
Природа лучистой энергии 173,—газовой проводимости 25 сл.
Пробег средний свободной газовой молекулы 6. 142, 199.
Проводимость воздуха, возбужденная лучами Рентгена 26, 97 сл., — возбужденная лучами радия 97 сл.
Проводимость, природа газовой—25 сл.

Радий, проводимость воздуха, возбужденная — 97 сл.
Радиус атома 143, 168, 203,—молекулы 143, 168, — отрицательного электрона 143, 146, — положительного электрона 146.
Рекомбинация 26.
Рентгеновы лучи 25 сл., проводимость воздуха, возбужденная — 26 сл., 97 сл.. спектрометр—154, характеристические спектры—154 сл.. 209.
Решетка кристалла 154, оптическая (диффракционная) — 154.
Ридберг, постоянная — 167 сл. 203.

Скольжение, коэффициент - - 207, 208.
Скорость ионов 27. — молекулярного движения 6.
Спектры поглощения рентгеновых лучей 156 сл., — характеристических рентгеновых лучей 154 сл.
Средний свободный пробег газовой молекулы 6, 142, 199.
Стокс, закон. Влияние на опеределение *e* 36. 37, 39, 41, 51, 113, 125 сл., обнаружение неточности закона —69, 206 сл., поправка закона — на не-