

часть
II

ФИЗИКА

ОПТИКА И ВОЛНЫ

Перевод с английского
под редакцией
А. С. АХМАТОВА



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва 1973

АННОТАЦИЯ

Этой книгой издательство продолжает второе издание американского курса физики для средней школы (первое издание вышло в 1965 г. в одной книге). В каждую часть курса в этом издании дополнительно включен перевод соответствующей части из «Методического руководства для преподавателей», содержащего разбор трудных мест курса. Курс состоит из четырех частей: I. «Вселенная», II. «Оптика и волны», III. «Механика», IV. «Электричество и строение атома». Часть I вышла в этом году, части III и IV выйдут в 1974 г.

Во II части «Оптика и волны» излагаются основы геометрической и волновой оптики, дается понятие о корпускулярной и волновой моделях света.

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

© Перевод на русский язык, издательство «Наука», 1973.

ОГЛАВЛЕНИЕ *)

От редактора русского перевода	5
Глава 11. Как ведет себя свет?	7, 195
11.1. Источники света (7, 197). 11.2. Прозрачные, окрашенные и непрозрачные материалы (8, 198). 11.3. Отражение (11, 198). 11.4. Светочувствительные приспособления (13, 200). 11.5. Невидимый свет (14, 200). 11.6. Как распространяется свет? (15, 200). 11.7. Дифракция (17, 200). 11.8. Скорость света (19, 202). <i>Домашние, классные и лабораторные задания</i>	20, 203
Глава 12. Отражение и изображения	22, 208
12.1. Тени (22, 210). 12.2. Пучки световых лучей, параллельные пучки и лучи (23, 210). 12.3. Как мы определяем положение предмета? (25, 213). 12.4. Законы отражения (27, 214). 12.5. Изображения в плоских зеркалах (28, 215). 12.6. Параболические зеркала (32, 218). 12.7. Проекторы (34, 221). 12.8. Астрономические телескопы (35, 222). 12.9. Изображения и оптические обманы (38, 224). 12.10. Действительные и мнимые изображения (42, 228). <i>Домашние, классные и лабораторные задания</i>	44, 228
Глава 13. Преломление	48, 236
13.1. Преломление (48, 237). 13.2. Измерение углов при преломлении (49, 238). 13.3. Показатель преломления. Закон Снеллиуса (52, 240). 13.4. Абсолютный показатель преломления (56, 240). 13.5. Прохождение света из стекла (или воды) в воздух. Обратимость хода лучей (56, 242). 13.6. Прохождение света из стекла в воду (58, 243). 13.7. Полное внутреннее отражение (60, 244). 13.8. Преломление в призмах. Дисперсия (62, 247). 13.9. Собирающее действие системы призм на лучи света (66, 250). 13.10. Линзы (67, 252). 13.11. Действительные изображения, образуемые линзами (69, 255). <i>Домашние, классные и лабораторные задания</i>	71, 253
Глава 14. Корпускулярная модель света	75, 265
Введение (75, 268). 14.1. Отражение (76, 268). 14.2. Преломление (77, 269). 14.3. Сила света источника и освещенность поверхности (81, 269). 14.4. Давление света (84, 271). 14.5. Поглощение света и нагревание (85, 272). 14.6. Некоторые трудности корпускулярной теории (86, 272). 14.7. Скорость света и теория преломления (87, 273). 14.8. Роль корпускулярной модели (89, 273). <i>Домашние, классные и лабораторные задания</i>	89, 274

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

Глава 15. Введение в учение о волнах	92, 280
15.1. Волна как новая форма движения (92, 282). 15.2. Волны на спиральных пружинах (93, 284). 15.3. Наложение волн. Пересечение импульсов (96, 288). 15.4. Отражение волн и их прохождения через среды (100, 293). 15.5. Идеализации и приближения (104, 294). 15.6. Можем ли мы принять волновую модель света? (105, 295).	
<i>Домашние, классные и лабораторные задания</i>	106, 295
Глава 16. Волны и свет	109, 301
16.1. Волны на воде (109, 303). 16.2. Прямолинейные и круговые волновые импульсы (110, 303). 16.3. Отражение (111, 303). 16.4. Скорость распространения волн и периодические волны (113, 306). 16.5. Преломление (115, 307). 16.6. Дисперсия (118, 309). 16.7. Дифракция (120, 309).	
<i>Домашние, классные и лабораторные задания</i>	123, 310
Глава 17. Интерференция	127, 319
17.1. Интерференция волн на пружине (127, 321). 17.2. Интерференция волн, посылаемых двумя точечными источниками (129, 322). 17.3. Форма узловых линий (133, 324). 17.4. Длины волн, расстояния между источниками и углы (134, 324). 17.5. Фаза (137, 325). 17.6. Заключение (140, 326).	
<i>Домашние, классные и лабораторные задания</i>	141, 326
Глава 18. Световые волны	144, 337
18.1. Можно ли наблюдать интерференцию света? (144, 338). 18.2. Интерференция световых волн. Опыт Юнга (146, 339). 18.3. Разность фаз источников света. Атомы (148, 339). 18.4. Цвет и длина волны света (150, 340). 18.5. Дифракция. Интерференция от одной щели (153, 341). 18.6. Теория дифракции от щели (155, 342). 18.7. Экспериментальная проверка теории для одной и двух щелей (158, 344). 18.8. Разрешающая способность (159, 344). 18.9. Интерференция в тонких пленках и слоях (161, 345). 18.10. Интерференция света, проходящего сквозь тонкую пленку (164, 346). 18.11. Цвета тонких пленок интерференционного происхождения (166, 346). 18.12. Заключение (166, 347).	
<i>Домашние, классные и лабораторные задания</i>	168, 347
Лабораторные работы	171, 356
II.1. Отражение от плоского зеркала (171, 357). II.2. Изображение в вогнутом зеркале (172, 359). II.3. Преломление (173, 360). II.4. Изображения, образованные с помощью собирающей линзы (175, 361). II.5. Преломление частиц (176, 363). II.6. Волны на спиральной пружине (177, 365). II.7. Волновые импульсы в волновой кювете (179, 366). II.8. Периодические волны (181, 367). II.9. Преломление волн (183, 369). II.10. Волны и препятствия (184, 370). II.11. Волны от двух точечных источников (185, 371). II.12. Интерференция и фаза (186, 373). II.13. Опыт Юнга (186, 374). II.14. Дифракция света от одной щели (188, 375). II.15. Разрешающая способность (188, 377). II.16. Измерение малых расстояний с помощью интерференции (190, 378).	
Методическое руководство	191
Приложения	379

Во второй части курса физики Комитета содействия изучению физики*) «Оптика и волны» излагаются основы геометрической и волновой оптики.

Изложение геометрической оптики ведется в традиционном порядке.

После краткого общего введения (источники света, прозрачные и окрашенные тела, восприятие и регистрация света, прямолинейность распространения и скорость света) в гл. 12 рассматриваются явления и закономерности отражения света, куда входит и построение изображений в зеркалах. Гл. 13 посвящена преломлению света, линзам и оптическим приборам; здесь же рассматривается преломление в призме и даются начальные представления о дисперсии света.

В дальнейшем световые явления рассматриваются с точки зрения двух моделей света — корпускулярной и волновой. Не трудно понять замысел авторов — подготовить учащихся к пониманию двойственной корпускулярно-волновой природы света.

Перед тем как изложить основы волновой оптики, авторы ввели гл. 14 (Корпускулярная модель света). Здесь с помощью остроумных экспериментов со стальными шариками показывается применимость этой модели к объяснению отражения и преломления света и одновременно ее ограниченность (дифракция).

Волновая оптика открывается введением в учение о волнах как особой форме движения (гл. 15). Здесь рассматривается распространение упругих волн вдоль спиральных пружин (по одной оси). В дальнейшем (гл. 16) закономерности отражения, преломления,

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

дисперсии и дифракции рассматриваются и демонстрируются на примере волн в двухмерном пространстве (на поверхности воды) и, наконец, в объеме (гл. 17 и 18).

Главы 17 и 18 посвящены основам учения об интерференции и дифракции света. Заканчивается изложение волновой оптики рассмотрением разрешающей способности и интерференции в тонких пленках.

Перевод второй части курса сделан Д. М. Толстым, за исключением глав 15—18 Методического руководства, перевод которых выполнен А. Н. Гордеевым.

А. С. Ахматов

Большая часть сведений об окружающем мире поступает к нам через посредство зрения. Уже на заре истории люди интересовались природой света, действующего на глаза. Они, вероятно, задавали себе те же вопросы, которые приходят в голову и вам. Что такое свет? Как и насколько быстро он распространяется? Всегда ли можно доверять тому, что мы видим? Почему одни предметы — цветные, а другие — белые или черные?

11.1. Источники света

Всякий, кому приходилось проводить безлунную ночь в сельской местности, в лесу или на море, знает, какая бывает темнота, когда Солнце находится по другую сторону земного шара. С наступлением рассвета постепенно вырисовываются предметы, которые были невидимы несколько минут назад. Затем все резче начинают различаться детали предметов, появляются и проясняются цвета и в конце концов разливается дневной свет. Именно Солнце, поднявшееся над горизонтом на востоке, посылает свет, придающий видимую форму и цвет предметам на поверхности нашей планеты.

Свет излучают Солнце, звезды, лампы и даже светлячки. Такие тела называются светящимися. Остальные предметы — деревья, трава, страницы этой книги, например, — сами по себе не являются светящимися. Они видимы только потому, что получают свет от какого-нибудь светящегося тела и отражают этот свет в наши глаза.

Является ли тело светящимся или нет, зависит от материала и состояния тела. Изменяя условия, мы можем делать многие из хорошо известных нам тел светящимися или несветящимися. Тонкая проволоочная нить в электрической лампочке не светится, пока она не нагреется пропущенным через нее электрическим током. Можно взять холодный кусок железа и заставить его светиться красным, желтым или белым светом, нагрев его на горящих углях или на газовой горелке. Когда твердые тела или такие жидкости, как расплавленные металлы, нагреваются до 800°C и выше, они становятся источниками света. Такие источники являются *калильными*.

Как установлено тщательными наблюдениями, свет пламени свечи исходит от огромного количества мельчайших раскаленных частиц угля, горящих в пламени. Будучи нагреты до достаточно высокой температуры, они и испускают свет свечи. Таким образом, пламя свечи также является калильным источником света. Следует

отметить, что многие из частиц угля не полностью сгорают в обычном пламени. Когда нагретый воздух выносит их в пространство над пламенем, они остывают, перестают светиться и образуют основную часть поднимающегося дыма.

Не все источники света являются калильными. Неоновые и люминесцентные лампы испускают яркий свет, пока через них пропускается электрический ток. Однако простое прикосновение к ним сразу убеждает нас в том, что их излучение имеет другое происхождение. Неоновые и люминесцентные лампы остаются совершенно холодными, тогда как лампочки накаливания быстро нагреваются после их включения. Существует и другое различие. Постепенно повышая силу тока в нити лампочки накаливания, можно увеличивать ее яркость, причем изменяется также и цвет каления: от темно-красного до ярко-желтого и при достаточной силе тока — до белого. При увеличении же силы тока в неоновой лампе яркость ее свечения усиливается, но цвет не изменяется. Таким образом, мы установили основное различие между калильными и другими источниками света. В первых изменения температуры, яркости и цвета тесно связаны между собой, тогда как в других цвет свечения зависит главным образом от материала светящегося тела и не зависит от яркости свечения.

Значительная часть света, поступающего в наши глаза, исходит от несветящихся поверхностей. Чтобы убедиться в этом, достаточно представить себе, как выглядела бы обычная комната после окраски ее стен идеально черной краской, совершенно не отражающей падающий на нее свет. На всех предметах в комнате были бы видны только участки, обращенные к окнам. Теневые стороны предметов были бы невидимыми. Если бы земной шар не был окружен атмосферой, отражающей или рассеивающей солнечный свет, то можно было бы видеть одновременно Солнце и звезды на совершенно черном небе. Белый потолок и светлые стены отражают и рассеивают значительную часть падающего на них света и благодаря этому увеличивают освещенность комнаты. Принцип действия осветительной «арматуры отраженного света» заключается в том, что скрытые от прямого зрения лампы освещают только потолок и часть стен, и уже эти поверхности освещают всю комнату отраженным или рассеянным светом. Переходя к более крупным масштабам, можно сказать, что и Луна, о которой мы часто думаем как о ночном свете, в действительности является лишь своеобразным отражателем солнечного света. Учтявая это, постарайтесь объяснить фазы Луны, т. е. изменение ее вида в течение лунного месяца. Попробуйте также объяснить, почему полная Луна восходит приблизительно во время заката Солнца, а молодой месяц встает на рассвете.

11.2. Прозрачные, окрашенные и непрозрачные материалы

Когда вы смотрите сквозь чистое оконное стекло на ярко освещенный пейзаж, вы вряд ли помните о присутствии стекла. Вещества, подобным образом пропускающие свет, называются *прозрач-*

ными. Попробуйте, однако, взглянуть на тот же пейзаж через то же самое стекло в сумерки, когда свет в комнате уже зажжен. Кроме наружного пейзажа вы теперь увидите изображение самого себя и комнаты. Свет, дающий это изображение, падает на стекло из комнаты, но, вместо того чтобы полностью проходить через стекло наружу, он частично возвращается к вам. Это — *отраженный свет*.

Влияет ли толщина прозрачного тела на количество пропускаемого света? Один лист чистого оконного стекла почти полностью

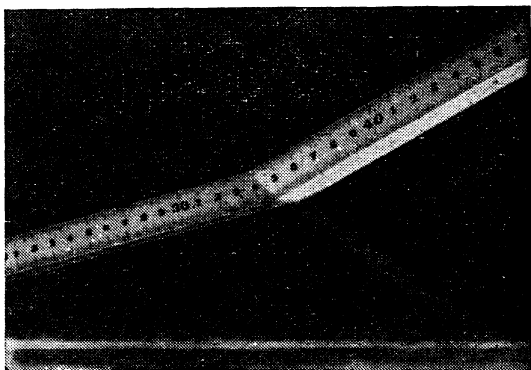


Рис. 11.1 Кажущийся излом линейки там, где она погружается в воду. Серая полоса, отходящая от точки излома, является отражением сухой части линейки.

пропускает свет, но при прохождении сквозь стопу из 10—20 таких листов, сложенных вместе, свет частично *поглощается*. Пропущенный свет заметно ослабляется и приобретает некоторую окраску. Очевидно, зрение позволяет нам замечать присутствие прозрачных тел, подобных стеклу, пластикам или воде, отчасти благодаря тому, что они не только пропускают, но и отражают свет, и отчасти вследствие поглощения ими некоторого количества света.

Подобного рода вещества влияют на свет еще в одном существенном отношении. При входе в такое вещество или при выходе из него свет изменяет направление своего распространения. На рис. 11.1 показана масштабная линейка, один конец которой погружен в чистую воду. Кажущийся излом линейки в месте пересечения поверхности воды может объясняться только тем, что здесь что-то происходит со светом, идущим от линейки в фотоаппарат. Другой иллюстрацией этого обстоятельства может служить рис. 11.2, а. Справа сфотографирована монета, лежащая на дне пустого сосуда. Слева мы видим фотоснимок совершенно такой же монеты, лежащей на дне сосуда, наполненного водой. Обе монеты были сфотографированы одновременно на одной пластинке в фотоаппарате, показанном на рис. 11.2, б. Монета, покрытая водой, выглядит более крупной и более близкой к фотоаппарату, чем другая монета. Это кажущееся

«испльвание» монеты, так же как и иллюзия «перелома» линейки, объясняется изменением направления распространения света при переходе его из одной среды, например из стекла или воды, в другую, например в воздух. Такой излом пути распространения света называется *преломлением* света. Подробное изучение преломления света весьма важно для выяснения природы света. Мы неоднократно будем еще возвращаться к этому явлению.

До сих пор речь шла только о бесцветных, почти идеально прозрачных телах. Мы знаем, однако, что существует много прозрачных

окрашенных материалов. Сквозь них можно рассматривать предметы, но эти предметы приобретают не свойственную им окраску. Ясно, что цветные прозрачные материалы оказывают какое-то влияние на проходящий через них свет. Добавляют ли они что-либо к свету или отнимают что-нибудь от него? На первый взгляд этот вопрос может показаться очень сложным, однако несколько простых опытов позволяют на него ответить.

Прежде всего взгляните через пластинку красного стекла на лист белой бумаги, освещенный солнечным или электрическим светом. Бумага покажется красной. От бумаги шел белый свет, но красное стекло сделало с ним что-то, в результате чего он стал красным. Поместим теперь между красным стеклом и глазом вторую пластинку красного стекла. Если красное стекло добавляет что-то к свету, то теперь лист бумаги должен казаться окрашенным в более яркий красный цвет, чем при одной пластинке. Если же красное стекло отнимает что-то, то следует ожидать, что первое стекло уже отняло значи-

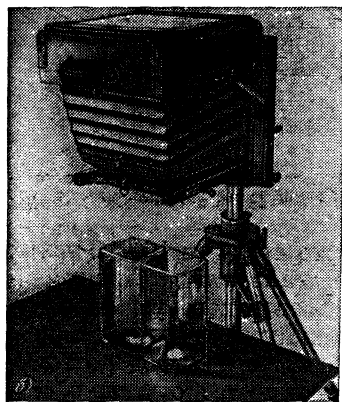


Рис. 11.2. а) Фотоснимок «плавающей» монеты. б) Расположение фотоаппарата и сосудов, использованных при получении снимка а).

тельную часть этого что-то. Тогда второе стекло не должно оказать сильного влияния. Именно последнее и наблюдается, когда мы воспроизводим этот опыт.

То небольшое изменение красного цвета, которое все же наблюдается под действием второго стекла, можно приписать неспособности первого стекла отнять все некресные части от белого света. Кое-что остается и на долю второго стекла. Поэтому красный цвет, видимый через оба стекла, кажется несколько более густым. Этот опыт можно повторить и с зелеными стеклами. Как и следовало ожидать, вторая зеленая пластинка оказывает лишь слабое влияние;

самое большое, что можно заметить, это — некоторое потемнение кажущегося зеленого цвета бумаги. Посмотрим теперь, что получится, если рассматривать бумагу сразу через два стекла: красное и зеленое. После того как зеленое стекло отнимет *все, кроме зеленого света*, а красное — *все, кроме красного*, естественно ожидать, что прошедший свет не будет ни красным, ни зеленым. На данном этапе нашего исследования мы еще недостаточно знакомы с процессом отнятия составных частей света, чтобы предсказать, какой именно цвет мы теперь увидим. Мы можем только утверждать, что через эти две пластинки пройдет гораздо меньше света, чем через каждую в отдельности. Осуществив этот опыт, мы в самом деле убеждаемся, что освещенность бумаги разительно уменьшается, а оставшийся слабый свет не является ни красным, ни зеленым; он имеет мутно-желтоватый или янтарный оттенок. Этот результат убеждает нас в правильности предположения об отнятии, а не добавлении составных частей света при прохождении через окрашенную среду.

Что же именно отнимается от белого света при его окрашивании? Ответ на этот вопрос мы отложим, так как он требует значительного расширения наших сведений о свете. Пока мы должны удовлетвориться признанием того, что белый свет есть нечто более сложное, чем свет любого определенного цвета. Вообще многие вопросы, касающиеся цвета, мы не будем подробно рассматривать в этом курсе. Любой художник знает, что видимый цвет зависит от многих факторов: от природы освещенного объекта, от природы света, освещающего объект, от состояния глаз в момент наблюдения и от того, каковы цвета и степень освещения окружающих видимых предметов.

Красное и зеленое стекла, сложенные вместе, отнимают почти все от проходящего белого света. Большая часть распространенных материалов действует в этом отношении еще сильнее, отражая или поглощая почти все, что содержится в белом свете, и, таким образом, почти не пропуская его. Мы ничего не видим даже сквозь тончайшие слои металлов, дерева, картона или плотного сукна. Такие материалы называются непрозрачными. Часть падающего света непрозрачные материалы отражают, а остальную поглощают, так что свет сквозь них не проходит.

11.3. Отражение

Все тела, как прозрачные, так и непрозрачные, отражают часть падающего на них света, т. е. посылают часть света назад, в ту же сторону от поверхности, откуда свет падал. Большинство поверхностей дает *диффузное отражение*. Каждый участок их поверхности рассеивает свет в самых разнообразных направлениях. Именно через посредство этого диффузно отраженного или рассеянного света можно видеть освещенные тела, наблюдать детали и цвет их поверхностей и различать их среди окружающих предметов.

Поверхности некоторых тел, таких, как хорошо отполированные серебряные, алюминиевые или стальные предметы, мало что погло-

щают от падающего белого света, а отражают свет более упорядоченно, чем шероховатые поверхности. Обычное зеркало состоит из плоского стекла, на заднюю поверхность которого нанесен тончайший слой серебра. На рис. 11.3 показано, как свет от одного и того же источника освещает зеркало и лист белой бумаги. Бумага кажется хорошо освещенной и резко выделяется своей белой поверхностью на темном фоне. Зеркало же выглядит совсем темным. На обе

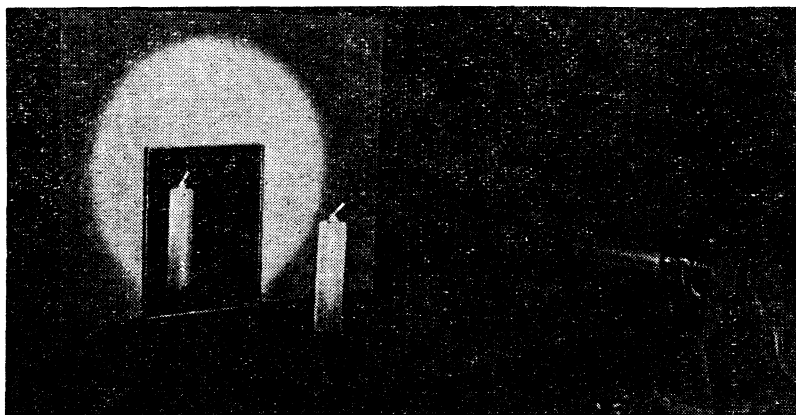


Рис. 11.3. Зеркальное и диффузное отражение. Лист белой бумаги (слева на заднем плане) посылает в фотоаппарат больше света от лампы, чем зеркало.

эти поверхности падает одинаковое количество света, причем мы знаем, что зеркало отлично отражает свет, как это и видно по отражению белой свечи. Почему же тогда бумага выглядит на снимке более светлой, чем зеркало? Все дело в том, что зеркало посылает весь падающий на него свет мимо объектива фотоаппарата, тогда как бумага рассеивает свет по всем направлениям, так что часть отраженного света попадает в фотоаппарат.

Именно упорядоченность отражения от гладких поверхностей позволяет видеть изображения предметов. На рис. 11.4 показана водная гладь, в которой отражаются лодки и пирсы. Не перевернут ли снимок? Переверните книгу и вновь осмотрите снимок. На нем можно найти несколько признаков, позволяющих установить, где верх и где низ.

Что можно узнать о зеркальных изображениях путем простого наблюдения? Посмотрите на себя в зеркало. Видите ли вы себя совершенно таким же, каким вас видят другие? Шевельните своей правой рукой. Правой или левой рукой шевелит ваше изображение? Приложите к зеркалу карандаш, а на некотором расстоянии от зеркала держите в руке другой такой же карандаш. Сравните их изображения. Где, как вам кажется, находится изображение карандаша, который вы держите в руке: рядом с карандашом, приложенным

к зеркалу, или в глубине за зеркалом? Какой из карандашей кажется более крупным? Что можно сказать о расстоянии от поверхности зеркала до карандаша, который вы держите в руке, и расстоянии от поверхности зеркала до изображения этого карандаша?

В гл. 12 мы постараемся найти такие сведения об отражении света, которые позволили бы отвечать не только на вопрос, что



Рис. 11.4. Почти идеальное отражение. Не перевернут ли снимок? Где находятся сами лодки и где — их изображения?

происходит при образовании изображений зеркалами и другими гладкими отражающими поверхностями, но и на вопрос, почему это происходит.

11.4. Светочувствительные приспособления

Мы еще не упоминали о том, откуда мы узнаем о присутствии света и о его цвете. Мы приняли без рассуждений существование нашего удивительного зрительного прибора — глаза. Подробное ознакомление с работой глаза потребовало бы обсуждения того, каким образом свет преломляется, чтобы достигнуть нервных клеток сетчатки на дне глазного яблока, каким образом глаз приспособляется к ясному видению предметов на разных расстояниях или разной яркости, каким образом достигается ощущение цвета, *какие могут быть недостатки нашего зрения*. Исследование этих вопросов могло бы занять у нас целый год, если не больше. Пока же нам придется ограничиться утверждением, что при прохождении через передние части глаза свет преломляется таким образом, чтобы изображение получалось на сетчатке. На нем происходят при

этом химические изменения, в результате которых по нервам посылаются электрические импульсы в головной мозг.

Помимо глаза существует много приборов, реагирующих на действие света химически или электрически. Приборы такого рода нередко используются в лабораториях для исследования света более удобными и точными методами, чем путем зрительных наблюдений. Наиболее известными светочувствительными веществами являются некоторые химические соединения, содержащие серебро. Они используются при изготовлении фотографических пленок. Весь процесс воздействия света на пленку и ее проявления довольно сложен, но сущность его заключается в том, что на тех участках пленки, на которые попадал свет, после химической обработки образуются отложения мельчайших частичек серебра. В таком тонкоизмельченном состоянии серебро, не похожее на блестящий металл, выглядит как мутные непрозрачные пятна, образующие те темные участки, которые мы всегда видим на проявленных негативах. Участки, на которые свет не падал, после проявления становятся светлыми и прозрачными. Цветные пленки, чувствительные к разным цветам, изготовляются путем добавления различных красителей и изменения состава.

Существует также ряд устройств, дающих при падении света электрический ток без всяких химических изменений. Важнейшим из этих устройств являются фотоэлементы, которые мы рассмотрим позже (в гл. 33). Электрический ток, протекающий через фотоэлемент, пропорционален освещенности фотоэлемента.

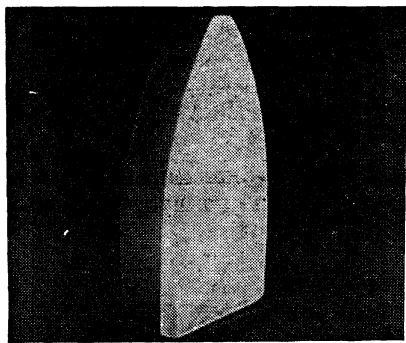


Рис. 11.5. Фотоснимок утюга, сделанный в лучах его собственного невидимого «света». Как называется этот невидимый «свет»?

11.5. Невидимый свет

Фотоэлементы, фотографические пленки и другие средства обнаружения света говорят о его наличии даже в случаях, когда на глаз он не действует. Например, на рис. 11.5 показан снимок обыкновенного утюга, сфотографированного в совершенно темной комнате на специальную фотопленку. По-видимому, утюг излучает особый «свет», хотя для глаза он не является светящимся предметом. Можно высказать догадку, что испускаемый

утюгом невидимый свет и его тепло, ощущаемое рукой на расстоянии нескольких сантиметров от нагретого утюга,— это одно и то же. Как мы увидим позже, эта догадка верна: *тепловые* лучи представляют собой вид света, известный под названием *инфракрасного излучения*. Около одной трети доходящего до нас солнечного излучения приходится на тепловые лучи; большая часть остальных двух третей приходится на долю видимого света.

Как и сетчатка глаза, обычный фотоэлемент не может обнаруживать тепловые лучи. В этом можно убедиться, поместив фотоэлемент около нагретого утюга в темной комнате. Благодаря фотографическим снимкам мы знаем, что утюг излучает тепловые лучи, но фотоэлемент на них не реагирует. Совершенно другой результат мы получим, если в качестве источника света используем ртутную дуговую лампу. Для этой цели вполне пригодна небольшая ртутная лампа, предназначенная для стерилизации продуктов. (Лампы этого типа изготавливаются из особого стекла, носящего название корекс.) При поднесении фотоэлемента к такой лампе электрический ток в фотоэлементе возрастает с увеличением силы падающего на него света. Если же между лампой и фотоэлементом поместить пластинку из обычного оконного стекла, почти идеально прозрачного для видимого света, то сила тока в фотоэлементе заметно уменьшается. Из этого простого опыта мы узнаем несколько интересных фактов. Наши глаза не замечают ослабления света при прохождении его через оконное стекло, а фотоэлемент отмечает явное ослабление. Поэтому должна существовать какая-то составная часть излучения лампы, невидимая для глаза и не пропускаемая оконным стеклом. Очевидно также, что стекло корекс прозрачно для этого невидимого света, иначе он не достигал бы фотоэлемента. Как мы увидим позже, ртутная лампа излучает *ультрафиолетовый* свет, помимо видимого. Этот вид излучения не только невидим, но вдобавок еще и вреден для человеческого глаза.

В разделе 7.8 мы видели, что поверхность с близкими параллельными царапинами, нанесенными на равных расстояниях друг от друга, например поверхность граммофонной пластинки, отражает свет различных цветов в разных направлениях. Образуется спектр, в котором за красным светом следует оранжевый, затем желтый, зеленый, голубой и фиолетовый. С помощью подходящих светочувствительных устройств можно установить, что невидимый свет, испускаемый ртутной лампой, всегда отклоняется в область, следующую за фиолетовой, а невидимый свет от горячего утюга — в противоположный конец спектра, «ниже» красной области. Названия «ультрафиолетовый» и «инфракрасный» означают соответственно «крайний фиолетовый» и «ниже красного». Где кончается видимый свет и начинается ультрафиолетовый или инфракрасный, зависит от индивидуальных особенностей устройства, воспринимающего свет. Мы видим лишь определенную часть спектра; некоторые животные, судя по разным признакам, видят несколько смещенную область спектра; фотопластинки же и другие светочувствительные устройства «видят» значительно расширенную область спектра, включающую невидимые для глаза области.

11.6. Как распространяется свет?

Солнце и звезды настолько для нас привычны, что мы редко думаем о гигантской протяженности почти пустого пространства, отделяющего нас от них. Однако мы знаем, что расстояние от Земли до

Солнца составляет около $1,5 \cdot 10^{11}$ м; ближайшая звезда еще примерно в триста тысяч раз дальше, и, наконец, существуют бесчисленное количество звезд, удаленность которых настолько велика, что совершенно не укладывается в сознание. Все сведения об этой безграничной Вселенной «мчатся к нам верхом на резвых световых лучах». Следует поэтому признать, что свет способен пересекать огромные пространства и, в частности, легко перемещаться в пустоте. В этом отношении свет резко отличается от звука, так как звук может распространяться от источника к нашим ушам не иначе, как через вещественные среды, например через воздух, воду, сталь и т. д.

Различие между распространением света и звука можно иллюстрировать простым лабораторным опытом. Электрический звонок и небольшая электрическая лампочка подвешиваются на проволоках под стеклянным колоколом, из-под которого можно откачивать воздух. При откачке звук, издаваемый звонком, постепенно ослабевает и после откачки почти совершенно не слышен. Если бы на свет откачка оказывала такое же действие, мы наблюдали бы постепенное потемнение колокола и его содержимого. На самом деле видимость этих предметов остается такой же, как до откачки.

Тени, отбрасываемые предметами при солнечном освещении, для нас так же привычны, как само Солнце. Что можно узнать о свете по этим теням? При нашей ходьбе или беге в солнечный день наша тень нисколько не отстает от нас. Этот простой факт доказывает, что скорость света намного превышает скорость нашего передвижения,

так как в противном случае тень головы заметно отставала бы на расстояние, пробегаемое нами за время распространения света от головы до земли. Сведения о распространении света дает также и форма теней. На рис. 11.6 проведены прямые линии, соединяющие различные точки тени с соответствующими точками предмета, отбрасывающего тень. Продолжения всех этих почти параллельных линий сходятся к источнику света. Отсюда очевидно, что свет распространяется по прямым линиям.

Для получения дальнейших сведений о распространении света

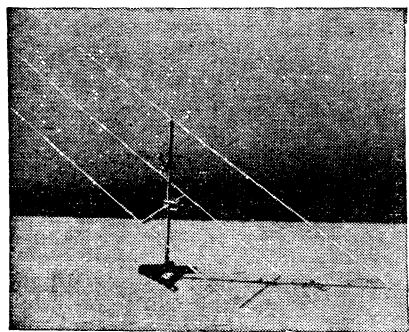


Рис. 11.6. Образование теней. Продолжения почти параллельных прямых линий, соединяющих точки тени с соответствующими точками предмета, отбрасывающего тень, сходятся к источнику света.

рассмотрим поведение световых лучей в затемненном пространстве — комнате или ящике. На рис. 11.7 показан источник света, направленный на лист бумаги. Мы знаем, что свет исходит от источника, и мы видим места его отражения от бумаги, но мы не видим лучей света между источником и бумагой. Здравый смысл подсказывает,

однако, что свет должен проходить от источника к бумаге. На рис. 11.8 изображен тот же опыт, но после введения в воздух мельчайших частичек дыма. Теперь пучок лучей ясно виден на всем своем пути. Прямолинейные края пучка соединяют источник с краями освещенного пятна, подтверждая тем самым, что свет распространяется прямолинейно. Тот факт, что до введения дыма лучи были



Рис. 11.7. Лучи света невидимы. Мы видим здесь только источник света и освещенный лист бумаги. Между ними ничего не видно.

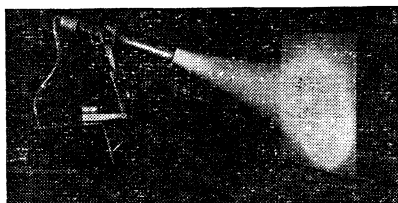


Рис. 11.8. После введения в воздух мельчайших частичек дыма пучок световых лучей ясно виден на всем своем пути от источника до освещаемой бумаги. Сравните с рис. 11.7.

невидимы, говорит о том, что свет попадает в глаза только тогда, когда мы смотрим непосредственно на источник или когда имеются освещенные тела, способные отражать свет непосредственно в наши глаза. В последнем опыте (см. рис. 11.8) свет отражался от бумаги и от частичек дыма, которые действовали как новые источники света, посылающие его по прямым линиям в глаза.

11.7. Дифракция

Мы познакомились с примерами того, что свет обычно распространяется прямолинейно. Нетрудно, однако, обнаружить некоторые исключения из этого правила. Вам, вероятно, приходилось смотреть на далекий источник света, например на лампу уличного освещения, через оконную занавеску из легкой полупрозрачной ткани. Тогда вы должны были видеть не только лампу, но, кроме того, две взаимно перпендикулярные светлые полосы, пересекающиеся в центре лампы. Эффект того же происхождения можно наблюдать, если держать перед глазом два пальца так, чтобы видеть источник света через очень узкую щель, образуемую пальцами, не слишком сильно прижатыми друг к другу (рис. 11.9, а). Этот опыт особенно показателен, если свет исходит от удлиненного тонкого источника, вроде неоновой или люминесцентной лампы, причем пальцы располагаются параллельно источнику. Видимые при этом узкие чередующиеся светлые и темные полосы (рис. 11.9, б), бесспорно, представляют собой нечто отличное от того, что вы обычно видите при прохождении света через широкие отверстия.

Этим явлениям можно дать частичное объяснение, предположив, что свет слегка загибается на краях препятствий. Тогда следует ожидать некоторой размытости краев всякой тени, отбрасываемой препятствием. При больших размерах источника света и отверстий

эта размытость незначительна по сравнению с размерами всей освещенной площади, и мы не замечаем ее. Если же источник расположен вдали, а отверстия малы, как в случае легкой ткани на занавесках или в опыте со щелью между пальцами, то эффект загибания света становится значительным.

Весь ход рассуждений, в которых мы только что участвовали, является хорошим примером того, каким образом ученые шаг за шагом приближаются к правильному пониманию явления. В большинстве случаев утверждение о прямолинейности распространения света хорошо объясняет результаты наблюдения. Более тщательное

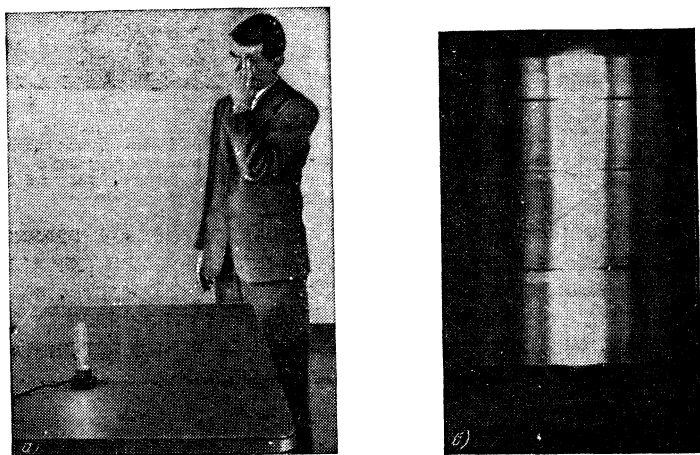


Рис 11.9. Простой способ наблюдения дифракции (а) и дифракционная картина (б), наблюдаемая через щель между двумя пальцами. Приведен фотоснимок источника синего света, полученный на пленке, чувствительной к этому свету; черные линии являются изображениями держателей нити накала.

исследование световых явлений показывает, что это утверждение не всегда полностью отвечает действительности: свет все же несколько загибается на краях препятствий. Однако это огибание препятствий настолько незначительно, что в большинстве случаев им можно пренебрегать. Мы говорим, что предположение о прямолинейности распространения является первым приближением к правильному описанию поведения света. Второе приближение сложнее и приводит к более громоздким рассуждениям. Поэтому мы будем применять его только тогда, когда исследуемые явления не могут быть объяснены проще. В частности, в дальнейшем нам придется столкнуться с некоторыми световыми эффектами, которые кажутся совершенно не связанными друг с другом, пока мы не подойдем к их объяснению с точки зрения огибания светом препятствий.

Картина, показанная на рис. 11.9, б, представляет лишь один из многих типов картин, получаемых в результате огибания светом непрозрачных препятствий. Это огибание называется *дифракцией*.

Дифракцией объясняется отчасти то обстоятельство, что изображения звезд в телескопах имеют вид расплывчатых пятен вместо резко очерченных точек. Расплывчатость здесь обусловлена загибанием света при прохождении наименьшего отверстия в телескопе. На рис. 11.10 показана тень от экрана, имеющего малое отверстие.

11.8. Скорость света

Каждому из нас приходилось слышать рев реактивного самолета. В таких случаях мы ищем самолет, инстинктивно направляя взор туда, откуда слышится рев, но находим самолет далеко впереди. При этом, отвечая себе на вопрос, где же все-таки находится самолет, мы доверяем

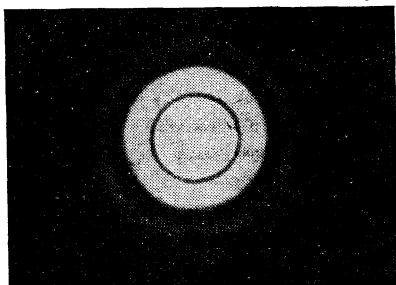


Рис. 11.10. Тень от экрана с малым круглым отверстием. Отсутствие резко очерченных краев тени и наличие светлых и темных колец обусловлены дифракцией света.

больше глазам, чем ушам. Почему? Потому, что знаем, что звуку требуется некоторое время для прохождения такого большого расстояния и что свет распространяется гораздо быстрее звука. Мы не представляем себе, что самолет находится впереди той точки, где мы его видим, так как считаем скорость света огромной.

Галилей предложил метод определения скорости света, сходный с его же методом измерения скорости звука. На известном расстоянии друг от друга располагаются два человека с затемненными фонарями. Один из них открывает фонарь и пускает в ход часы. Другой открывает свой фонарь в момент, когда он видит свет первого. Первый останавливает часы, когда он видит свет второго фонаря, и таким образом определяет время прохождения светом измеренного расстояния туда и обратно, — так, по крайней мере, думал Галилей. Этим способом не удалось определить скорость света, однако опыт Галилея нельзя считать совершенно бесполезным. Он показал, что скорость света слишком велика для того, чтобы ее можно было измерить на сравнительно коротких расстояниях с помощью существовавших в то время механических измерителей времени.

Удовлетворительный метод измерения скорости света был впервые предложен Рёмером в 1676 г. Этот метод не связан с необходимостью точных измерений весьма коротких промежутков времени. Более длительные отрезки времени легче измерять. Рёмер увеличил измеряемый отрезок времени путем использования более длинных путей прохождения света. Он использовал астрономические измерения для определения времени прохождения светом диаметра земной орбиты. Отмечалось время начала затмения некоторых из спутников Юпитера, т. е. вхождения их в тень, отбрасываемую Юпитером. Эти затмения происходят через определенные промежутки времени. Например, самый яркий из спутников Юпитера, двигаясь по своей

орбите вокруг этой планеты, делает полный оборот за семь с лишком дней и за каждый оборот один раз испытывает затмение. Исходя из среднего промежутка времени между затмениями и времени полного оборота спутника, Рёмер установил, что затмения происходили приблизительно на 11 мин раньше срока, когда Земля находилась на кратчайшем расстоянии от Юпитера, и опаздывали примерно на 11 мин при наибольшем удалении Земли, так как во втором случае свет должен был пересечь земную орбиту. Из этих данных Рёмер не получил достаточно точного значения скорости света. Его измерения были неточны. Кроме того, размеры земной орбиты в то время были известны с малой точностью. Ценность работы Рёмера заключается, однако, в обнаружении того обстоятельства, что свету требуется измеримый отрезок времени для пересечения земной орбиты, откуда следует, что свет распространяется с конечной скоростью.

Более поздние измерения времени запаздывания затмений спутников Юпитера показали, что свет пересекает земную орбиту не за 22 мин, как считал Рёмер, а за 16 мин 20 с. Среднее расстояние от Земли до Солнца теперь оценивается в $1,47 \cdot 10^{11}$ м; таким образом, скорость света равна $c = 2 \cdot (1,47 \cdot 10^{11} \text{ м}) / 980 \text{ с}$; $c \approx 3,00 \cdot 10^8$ м/с.

Первое измерение скорости света на достаточно коротком пути, позволяющем проводить эксперимент на поверхности Земли, было осуществлено Арманом Физо в 1848 г. Для проведения этого эксперимента потребовалось изобретение системы отсчета времени, позволяющей измерять весьма короткие отрезки времени с достаточной точностью. Метод Физо будет нами рассмотрен в гл. 14.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

1*. Какие из перечисленных здесь предметов являются светящимися в нормальных условиях: фотоаппарат, светлячок, лампа-вспышка, зеркало, хромированная отделка автомобиля, спираль электроплитки, бриллиант? (Раздел 11.1.)

2*. Как узнать, является ли предмет светящимся? (Раздел 11.1.)

3. Постарайтесь выяснить, принимает ли свет, отраженный от стекла, цвет этого стекла?

4*. При освещении белым светом предмет *A* выглядит белым, а *B* — зеленым. Какими они будут казаться при освещении красным светом? (Раздел 11.2.)

5. Мы уже видели, что стекло, хотя оно и прозрачно, пропускает не все составные части света: часть света поглощается. Обладает ли этим свойством чистая вода? Какие факты могут быть привлечены для обоснования ответа?

6. Цвет солнечного диска непостоянен: на закате он более красный, чем в полдень. Что отсюда можно заключить относительно прохождения лучей различного цвета через атмосферу? Нельзя ли связать это с голубой окраской неба?

7. На рис. 11.8 ясно видно, что дым рассеивает свет по направлению к нашим глазам, даже если свет сначала распространялся в таком направлении, что не мог попасть в глаза. Как увязать это с тем, что густое облако дыма над головой кажется скорее темным, чем светлым? Дайте обоснование ответа.

8. В разделе 11.2 было отмечено, что цвет предмета зависит от многих факторов, а не только от природы падающего света и поверхности. В этом легко убедиться. Вырежьте небольшой квадрат со стороной примерно 2,5 см из светло-серой бумаги или картона. Поместите его в центре большого листа белой бумаги. Вглядитесь в него с расстояния около 60 см при ярком освещении. Опишите его цвет и яркость. Переложите серый квадрат на середину листа ярко-красной бумаги и осмотрите его в тех же условиях. Вновь опишите его цвет и яркость. Есть

ли разница с предыдущим результатом? Переложите испытуемый квадрат на лист черной бумаги. Что теперь видно?

9. Как уже было указано, свет, исходящий от белой поверхности, после падения на фотопленку создает черные отложения серебра при проявлении пленки. Так получаются знакомые нам негативные изображения предметов. Какое получится изображение после проявления второй пленки, если предварительно осветить ее через проявленную негативную пленку?

10. Закройте или заслоните один глаз и постепенно приближайте к себе эту книгу. Когда расстояние станет таким, что при дальнейшем приближении шрифт начнет расплываться, попросите кого-нибудь измерить расстояние между книгой и глазом. Повторите измерение для другого глаза. Являются ли эти два результата приблизительно одинаковыми? Проведите эти измерения для нескольких человек разного возраста и запишите результаты вместе с данными о возрасте. Существует ли предел способности глаза добиваться ясного видения при изменении расстояния предмета? Является ли этот предел одинаковым для разных людей и для разных глаз одного человека? Не существует ли определенной тенденции изменения этого предела с возрастом?

11*. Почему на рис. 11.5 рабочая поверхность утюга кажется ярче остальных частей? (Раздел 11.5.)

12*. Загар от Солнца создается его ультрафиолетовым излучением. Можно ли загореть в солярии с застекленной крышей? (Раздел 11.5.)

13*. Свет распространяется прямолинейно. Назовите случаи, в которых этот закон не соблюдается. (Раздел 11.6.)

14. Помня, что Луна видна в отраженном свете, постарайтесь объяснить следующие явления.

а) Почему, если Луна восходит на востоке в полночь, не может быть полнолуния?

б) Почему молодой месяц не может быть долго виден после наступления темноты? (Нарисуйте схемы расположения Солнца, Земли и Луны в ее различных фазах.)

15. При измерении как больших, так и малых расстояний мы предполагаем, что свет распространяется прямолинейно.

а) Опишите опыт, подтверждающий прямолинейность распространения света.

б) Нельзя ли изменить условия опыта так, чтобы доказать возможность отклонений света от прямолинейных путей?

16. Искусственные спутники Земли можно иногда долго наблюдать после захода Солнца в виде ярко светящихся точек. Какова должна быть наименьшая высота спутника, движущегося вдоль экватора, чтобы он был виден прямо над головой через два часа после захода Солнца?

17. а) Сколько времени свет идет от Солнца до Земли?

б) Свет от ближайшей звезды достигает Земли через 4,3 года. Каково расстояние от этой звезды до Земли?

в) Почему удобнее выражать расстояния до звезд в световых годах вместо метров, километров?

18. Радиоволны распространяются с такой же скоростью, как свет.

а) За какое время радиосигнал проходит расстояние между Нью-Йорком и Сан-Франциско (4800 км)?

б) Радиолокаторы посылают на Луну радиосигналы определенного типа. Отраженный сигнал возвращается обратно через 2,7 с, считая с момента его послышки. Что дает нам этот эксперимент для оценки расстояния Луны от Земли?

19. а) Для распространения радиоволн до Луны и обратно требуется 2,7 с. Как это скажется на разговоре космонавта, находящегося на Луне, с персоналом наземной станции?

б) Дайте ответ на тот же вопрос в случае космонавтов на Марсе, когда эта планета находится на кратчайшем и на наибольшем расстояниях от Земли (расстояние от Земли до Солнца $1,5 \cdot 10^{11}$ м, а от Марса до Солнца $2,3 \cdot 10^{11}$ м).

в) Каков будет результат в случае космонавта, проносящегося мимо ближайшей к нам звезды, от которой свет идет до Земли 4,3 года?

12 ОТРАЖЕНИЕ И ИЗОБРАЖЕНИЯ

12.1. Тени

Осмотрите вашу собственную тень, отбрасываемую в солнечных лучах на ровный пол или асфальт. Обратите внимание на различие в резкости очертаний тени ног и головы. Это различие наблюдается еще отчетливее на тени тонкого вертикального стержня, как показано на рис. 12.1, *а*. Как видно из рисунка, тень расширяется и становится менее отчетливой с увеличением расстояния от предмета

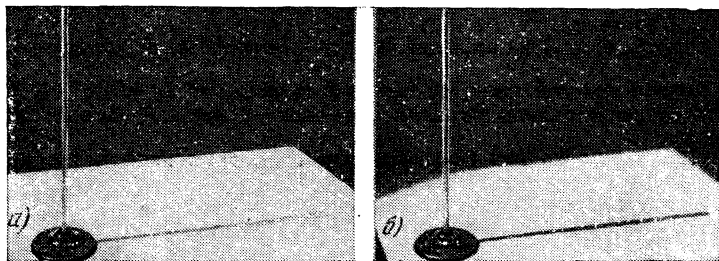


Рис. 12.1. Тени, образуемые источником света больших размеров (*а*) и точечным источником (*б*). Обратите внимание на разницу в резкости теней.

до его тени. Резкость тени зависит от источника света. На рис. 12.1, *б* показана тень того же предмета, когда источником света является лампа, помещенная за экраном с очень малым круглым отверстием в виде булавочного прокола. В этом случае тень очень резко очерчена по всей своей длине. Тени, образуемые в лучах источников очень малых размеров, обычно весьма резки, что указывает на прямолинейность распространения света.

Резкость теней от источников света столь малых, что их можно считать точечными, наводит на мысль о причине меньшей резкости теней в солнечном свете. Свет излучается каждой точкой поверхности Солнца, и тень в солнечных лучах не является единой, а представляет собой совокупность огромного числа отдельных теней, образуемых каждой точкой солнечной поверхности. На рис. 12.2 показано, как образуется тень, если источник света велик, подобно Солнцу. На круговой участок между *с* и *д* свет, распространяясь прямолинейно, не попадает ни с какой части источника. Поэтому

область cd выглядит черной. На область, отмеченную точками, между окружностями ab и cd свет попадает мимо препятствия от той или иной части источника. Поэтому тень здесь менее темная и постепенно сходит на нет, совершенно исчезая на окружности ab . За пределами области ab свет попадает от всех точек источника.

Наиболее темная часть тени, на которую свет от источника вовсе не попадает, называется *полной тенью*. Менее темные участки тени образуют *полутень*. Когда мы находимся в полной тени Луны, мы наблюдаем полное солнечное затмение. Находясь в полутени Луны, мы видим часть солнечного диска и наблюдаем частичное затмение Солнца.

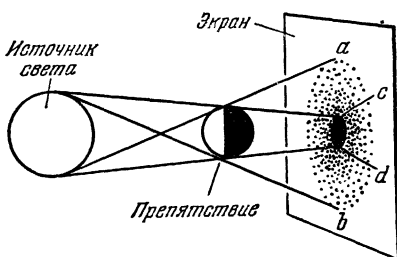


Рис. 12.2. Образование тени при большом источнике света. Показано сечение источника и препятствия плоскостью, перпендикулярной к экрану.

12.2. Пучки световых лучей, параллельные пучки и лучи

Точечные источники света дают явно менее сложные тени, чем протяженные источники. На рис. 12.3, *а* показан пучок лучей, выходящий из точечного источника — из булавочного прокола в экране.

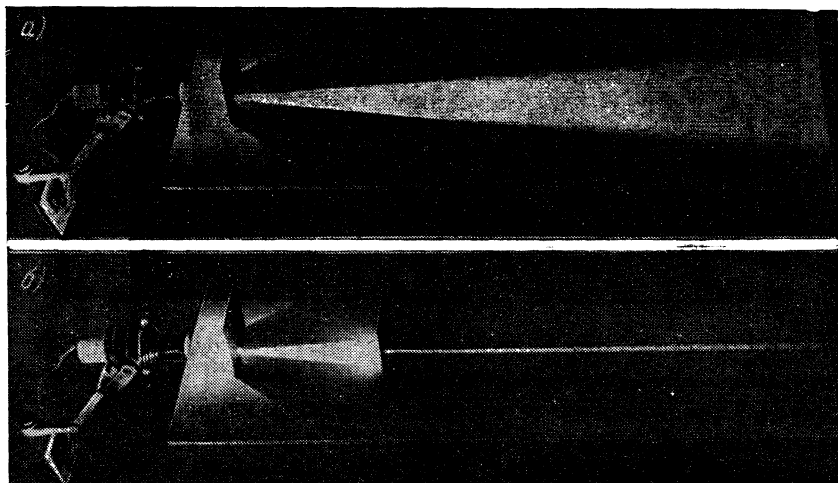


Рис. 12.3 Конические и параллельные пучки световых лучей. *а*) Свет, проходящий от источника через булавочный прокол, образует конический пучок лучей. *б*) Второй булавочный прокол, расположенный на одной прямой с первым и с источником, дает узкий параллельный пучок световых лучей.

Этот пучок образует конус. Попробуйте объяснить, почему это конус, а не цилиндр. Ось конуса (прямая, соединяющая центр

булавочного прокола с центром основания конуса) проходит через центры источника и булавочного прокола в экране.

Располагая на одной прямой булавочные проколы в двух экранах, как показано на рис. 12.3, б, мы получаем весьма узкий *параллельный пучок* лучей. Иногда бывает удобно пользоваться представлением о параллельном пучке лучей, более узком, чем предельно узкий параллельный пучок, который мы можем получить на практике. Самый узкий параллельный пучок, какой только можно себе представить, образует просто геометрическую прямую линию. Такой воображаемый предельно узкий параллельный пучок лучей света мы называем просто световым *лучом*. На практике, разумеется, никогда нельзя получить единичный световой луч, но это понятие очень полезно. Оно позволяет проводить на схемах прямые линии, указывающие направления распространения света. В природе можно встретить параллельные пучки световых лучей, но отдельные световые лучи являются лишь отвлеченными понятиями, придуманными для изображения предельно тонких параллельных пучков лучей

Мы нередко проводим на схемах несколько лучей, например для обозначения границ освещенного пространства, полных теней и полутеней, как это сделано на рис. 12.2. В действительности эти лучи неразличимы в пучках лучей света, который распространяется

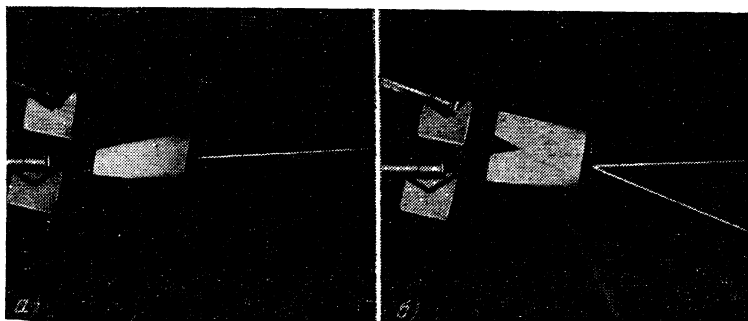


Рис. 12.4. Опыт, показывающий, что два луча света могут проходить друг через друга.

от каждой точки поверхности источника во всех направлениях. Проводимые нами лучи так же полезны, как линии на плане архитектора, но они имеют такое же отношение к реальным пучкам лучей, как линии на плане — к стенам или окнам. Свет не образует «лучей»; мы же их проводим, чтобы облегчить описание поведения света.

Нам известно, что пучки световых лучей, ударяясь об отражающие препятствия, освещают их, причем эти препятствия действуют как новые источники света. Таким образом, свет взаимодействует с веществом, образуя препятствие, т. е. световой пучок действует на это вещество, а оно в свою очередь влияет на поведение

света. Могут ли пучки света также взаимодействовать друг с другом? На этот вопрос можно ответить, пропуская пучки лучей от двух разных источников через одно общее отверстие — булавочный прокол в экране, как показано на рис. 12.4. Оказывается, что каждый из пучков проходит через прокол так, как если бы другого пучка не существовало.

Вообще каждый из световых пучков от двух или более источников ведет себя так, как будто остальные пучки отсутствуют. Эта независимость поведения световых пучков имеет большое значение. Если бы ее не было, то исследование хода лучей от разных источников или разных точек источника было бы бесполезным. Например, проведя лучи, показывающие направления двух водяных струй, мы вряд ли могли бы что-нибудь узнать об их распространении после того, как они столкнутся друг с другом. Находить освещенные области и области тени при наличии разных источников можно именно благодаря тому, что свет распространяется от каждого источника независимо.

12.3. Как мы определяем положение предмета?

Мы всегда можем определить положение точечного источника света, если известны направления нескольких лучей, выходящих из этого источника. Следует просто продолжить хотя бы два таких луча в направлении, противоположном их распространению, до их пересечения. Точка их пересечения и является положением точечного источника. Когда конус лучей попадает из источника в глаз, мы автоматически изменяем форму глаза *) так, чтобы расходящиеся из точечного источника лучи фокусировались, таким образом мы получаем изображение точки. Этот процесс фокусировки глаза дает сведения, аналогичные тем, которые мы получаем, продолжая лучи до их пересечения. В некоторых условиях мы бессознательно используем эти сведения для оценки расстояния до источника.

Смотря обоими глазами, мы легче оцениваем расстояния, чем с помощью одного глаза. Чтобы удостовериться в этом, попросите товарища поддержать отрезок тонкой проволоки вдали от других предметов (рис. 12.5). Возьмите другой отрезок такой же проволоки и попытайтесь дотронуться ее концом до конца первой проволоки, стоя подальше от нее, чтобы рука была вытянута. Вы убедитесь, что поставленная цель может быть достигнута со значительной точностью. Затем повторите эксперимент, закрыв один глаз. Теперь свести концы проволок гораздо труднее.

Этот опыт выявляет одну из причин, по которым оценка расстояний легче производится двумя глазами. Свет от конца предмета должен идти по разным направлениям, чтобы попасть в разные глаза (рис. 12.6). Этот процесс является простым случаем триангуляции (см. гл. 3). Здесь базисной линией является расстояние между глазами. Если бы два глаза были двумя независимыми наблю-

*) Точнее — форму хрусталика в глазу. (Прим. ред.)

дателями, они определили бы расстояние до предмета, начертив базисную линию и построив два угла, образуемых этой линией с двумя линиями зрения, или вычислили бы это расстояние посредством

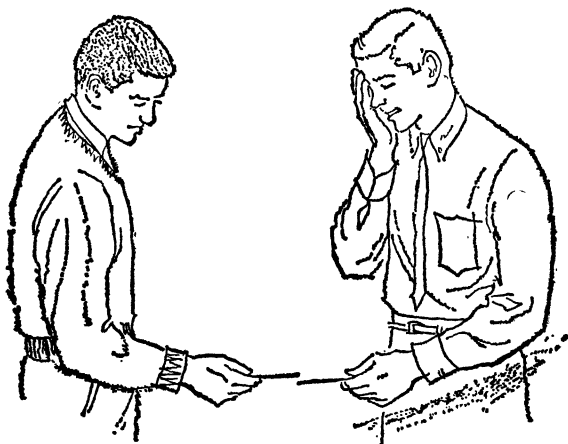


Рис. 12.5. Опыт, иллюстрирующий трудность оценки расстояний одним глазом.

тригонометрических формул. Разумеется, наш мозг не прибегает к подобным расчетам при оценке расстояний. Вместо этого весь процесс сведения глаз на нужный угол и их фокусировки на угол раствора

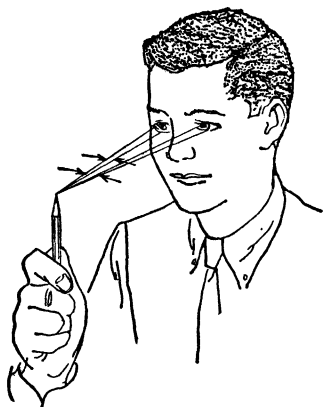


Рис. 12.6. Бинокулярное зрение. Расстояние до предмета оценивается по углу, под которым оба глаза сводятся к наблюдаемой точке, а также по степени фокусировки глаза для восприятия конических пучков лучей.

конуса лучей, идущих от точки предмета, заранее подсознательно проградуирован в течение всего нашего жизненного опыта. Наши сведения о расстояниях, в комбинации с актами наведения обоих глаз на одну точку и их фокусировкой, сразу говорят нам, где находится предмет, причем ответ гораздо точнее, чем при простой фокусировке одного глаза.

Если поблизости имеются другие предметы или если вместо проволок пользоваться брусками, то добиться соприкосновения двух предметов еще легче. В этих условиях наш мозг использует и другие средства оценки расстояний, например стереоскопический эффект, связанный с различным видом граней бруска при наблюдении разными глазами. Это различие усиливается при приближении предмета к глазам. Раз-

меры и расположение соседних предметов также помогают мозгу оценить расстояние концов проволок от глаз.

Существует много других средств оценки расстояний предметов от наблюдателя, таких, как размеры, тени и движение знакомых

нам предметов. При наличии этих средств оценка углов расхождения пучков, входящих в оба глаза, и угла между осями этих двух пучков отчасти теряет свое значение, но на близких расстояниях эти факторы становятся решающими при оценке расстояний.

12.4. Законы отражения

Все, что говорилось в предыдущем разделе, относится к кажущимся положениям источников света. Кажущееся положение, однако, не всегда является истинным положением источника. Если направление световых лучей, исходящих из источника, изменялось в результате отражения или преломления (см. гл. 11), то прослеживание лучей против их хода и затем их продолжение до пересечения даст точку, из которой фактически лучи не выходят. Тем не менее нам будет казаться, что источник находится в этой точке. Мы видим лишь изображение источника, а не сам источник.

В гл. 11 затрагивался вопрос об изображениях, видимых в зеркалах. В частности, отмечался тот факт, что наблюдатель видит свое изображение за зеркалом на расстоянии от зеркала, равном

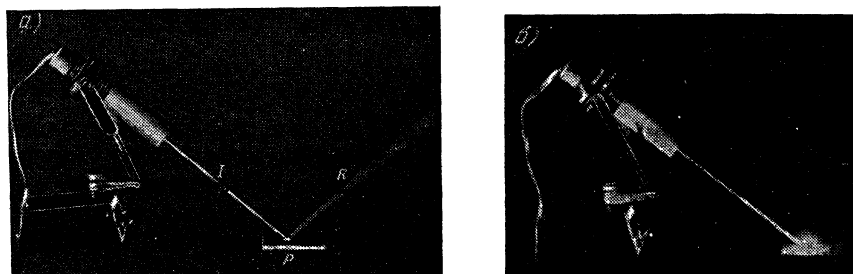


Рис. 12.7. Иллюстрация двух видов отражения. а) Зеркальное отражение — пучок световых лучей, падающий на полированную металлическую поверхность, создает резко очерченный отраженный луч. б) Диффузное отражение — при падении параллельного пучка световых лучей на белую бумагу, свет отражается по всем направлениям.

расстоянию между зеркалом и самим наблюдателем. Нельзя ли найти законы отражения, объясняющие такое положение изображения? На рис. 12.7, а показан параллельный пучок лучей, падающий на металлическую пластинку; пучок виден благодаря дыму. Мы замечаем, что *отраженный* пучок PR так же резок, как *падающий* пучок IP . Полированные поверхности металлов, поверхности жидкостей и зеркала, отражающие свет так, что отраженный пучок резко очерчен, называются *зеркальными отражателями*. Такие материалы, как белая бумага, дают *диффузное отражение* (рис. 12.7, б).

Для исследования зеркального отражения поставим лист картона на отражающую пластинку в таком положении, чтобы оба пучка скользили по поверхности картона, как показано на рис. 12.8. Мы обнаруживаем, что для этого картон должен быть перпендикулярен к отражающей поверхности. Повторяя опыт много раз и каж-

дый раз изменяя направление падающего луча, получаем всегда один и тот же результат: плоскость, в которой лежат оба пучка лучей во всех случаях перпендикулярна к отражающей поверхности.

В качестве второго этапа опыта проведем на картоне прямую линию, перпендикулярную к одной из кромок картона. Затем расположим картон перпендикулярно к отражающей пластинке, как и на

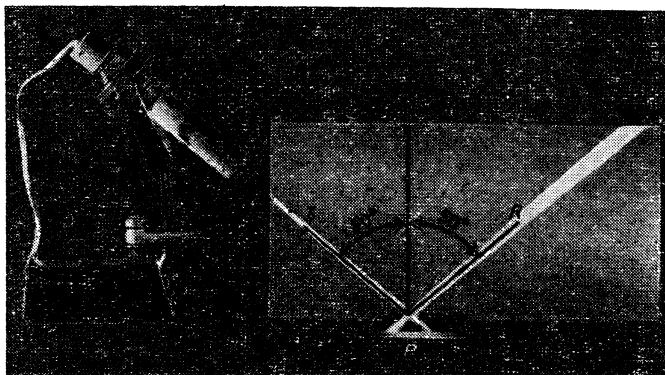


Рис. 12.8 Опыт, демонстрирующий первый и второй законы отражения. Пучки лучей кажутся пересекающимися, так как в зеркале видны отражения освещенных полос на картоне.

первом этапе опыта, и притом так, чтобы начерченная вертикальная линия своим нижним концом упиралась в точку падения пучка лучей. Поскольку эта линия проведена на плоском картоне, она лежит в одной плоскости с обоими пучками лучей и, кроме того, перпендикулярна к отражающей поверхности. Результат этого наблюдения составляет первый закон зеркального отражения:

При отражении света от плоской зеркальной поверхности падающий луч, отраженный луч и нормаль (перпендикуляр), восставленная к поверхности в точке падения, лежат в одной плоскости.

Измерим теперь углы между нормалью и обоими лучами, как показано на рис. 12.8. Мы убеждаемся, что угол между отраженным лучом и нормалью, называемый углом отражения, равен углу между падающим лучом и нормалью, называемому углом падения. Этот результат подтверждается во всех случаях; таким образом, мы можем сформулировать второй закон зеркального отражения:

Угол отражения равен углу падения.

12.5. Изображения в плоских зеркалах

Не помогут ли эти два закона выяснить положение и происхождение изображений в обыкновенных зеркалах? На рис. 12.9 показана стрелка *НТ*, расположенная перед зеркалом. Возникает вопрос, будут ли лучи, выходящие из одной точки, например из острия стрелки *Н*, и отраженные зеркалом в глаз, казаться выходящими из одной точки? На рис. 12.9 отраженные лучи очень тщательно начерчены согласно законам отражения. Как показывает рисунок, оба

луча, вышедшие из H , попадают в глаз по таким направлениям, как если бы они выходили из точки H' . Это подсказывает, что острие стрелки должно казаться расположенным в точке H' . Аналогичное построение лучей показывает, что другая крайняя точка стрелки, T , должна представляться находящейся в T' .

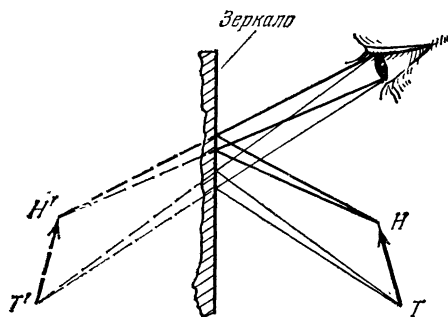


Рис. 12.9. Образование изображения в плоском зеркале

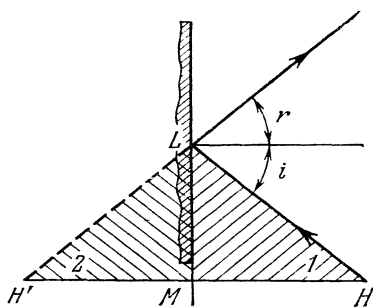


Рис. 12.10. Ход одного из лучей, отраженных от плоского зеркала.

Будет ли третий луч, исходящий из H , отражаться так, что его продолжение пройдет тоже через H' ? Будет ли и четвертый луч вести себя таким же образом? Исходя из законов отражения, можно доказать, что все лучи, выходящие из H и отраженные плоским зеркалом, кажутся выходящими из одной точки H' .

Рассмотрим ход одного из лучей, выходящих из H . В соответствии с законами отражения этот луч проходит в одной плоскости с перпендикуляром к поверхности зеркала, восставленным в точке падения, и с отраженным лучом. Плоскость рис. 12.10 изображает именно эту плоскость, причем угол падения i и угол отражения r , отсчитанные в этой плоскости, равны друг другу, а плоскость рисунка перпендикулярна к плоскости зеркала. Следовательно, перпендикуляр HM , опущенный на зеркало из H , лежит в той же плоскости. Пунктирное продолжение отраженного луча пересекает этот перпендикуляр в точке H' (находящейся в той же плоскости).

Углы, обозначенные цифрами 1 и 2, равны, так как угол 1 равен углу i , а угол 2 — углу r . Таким образом, два прямоугольных треугольника, заштрихованных на рис. 12.10, имеют равные соответственные углы и общую сторону LM между соответственными углами. Поэтому соответственные стороны $H'M$ и HM равны. Следовательно, H' и H равноудалены от зеркала (если отсчитывать расстояние по перпендикуляру к зеркалу).

Можно повторить все это рассуждение для всякого произвольно выбранного луча, выходящего из H по любому другому направлению. Точка падения луча на зеркало будет тогда другой, но точки H и M останутся прежними. Следовательно, прямоугольные треугольники HML и $H'ML$ будут по-прежнему конгруэнтны (т. е. совместимы при наложении). Поэтому точка H' также не изменит сво-

его положения. Этот довод можно повторить для произвольно выбранного третьего луча и т. д. Таким образом, все лучи, вышедшие из H и отраженные зеркалом, кажутся расходящимися из одной общей точки H' . Следовательно, точка H' является изображением точки H .

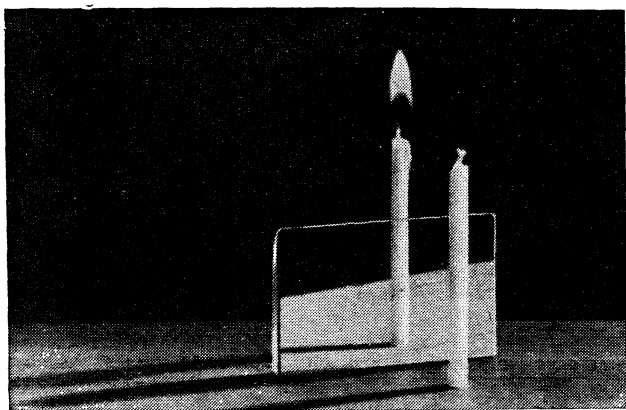


Рис. 12.11. Определение положения мнимого изображения. Этот опыт подтверждает наши построения, основанные на законах отражения.

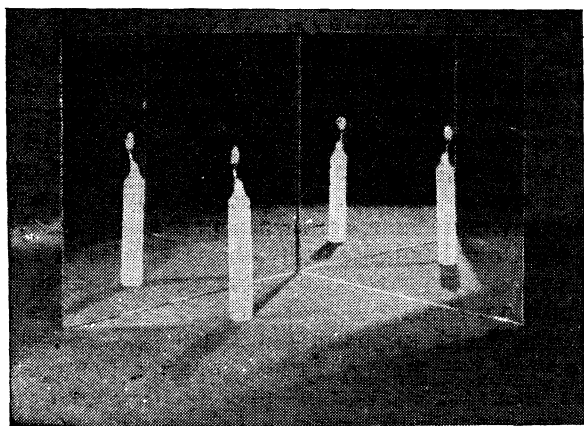


Рис. 12.12. Многократное отражение в двух зеркалах. Одна свеча имеет три изображения.

Точка H' лежит на перпендикуляре к поверхности зеркала, опущенном из H на таком же расстоянии от зеркала, на каком находится и точка H перед зеркалом.

Итак, мы показали, что лучи, вышедшие из точки H и отраженные плоским зеркалом, кажутся расходящимися из точки H' , расположенной на продолжении перпендикуляра, опущенного из H на зеркало. H' находится на таком же расстоянии от плоскости

зеркала, как и H . Отраженный свет попадает в глаз так, как будто он исходит из источника, расположенного в точке H' . Поэтому точку H' мы называем *изображением* точки H .

Прибегая к тем же рассуждениям, можно найти положение изображения любой точки стрелки и таким образом установить положение всего изображения стрелки. Каждая точка изображения лежит на продолжении перпендикуляра, опущенного из соответствующей точки предмета, и находится на таком же расстоянии от плоскости зеркала, как и изображаемая ею точка предмета. Предмет и его изображение в точности подобны и равны друг другу.

В нашем построении мы продолжили отраженные лучи за плоскость зеркала, но совершенно ясно, что мы не обнаружили бы никаких световых лучей, исходящих от стрелки, если бы зашли за зеркало. Так как зеркало создает лишь впечатление, что лучи исходят от точек изображения, находящегося за зеркалом (тогда как в действительности этого не происходит), мы называем такие изображения *мнимыми* в отличие от *действительных* изображений, с которыми мы познакомимся позже.

Мы определили положение мнимого изображения, пользуясь построением, основанным на законах отражения. Нетрудно проверить результаты этого построения, проделав следующие простые опыты. Небольшое зеркало укрепляется перпендикулярно к плоскости стола. Перед зеркалом ставится предмет, высота которого несколько превышает высоту зеркала, как показано на рис. 12.11. Совершенно такой же предмет ставится за зеркалом и передвигается до тех пор, пока его верхняя часть (видимая поверх зеркала) не будет казаться продолжением изображения, откуда бы мы ни смотрели. Это значит, что предмет за зеркалом совместится с мнимым изображением предмета, находящегося впереди зеркала. Измерение показывает, что положение заднего предмета и мнимого изображения переднего предмета согласуется с предыдущим построением.

Теперь, после того как мы узнали, каким образом находить положение изображений, получаемых от одного зеркала, нам легко определять положение всех изображений, создаваемых несколькими зеркалами, как, например, на рис. 12.12, где мы видим свечу и три ее изображения, образуемые двумя взаимно перпендикулярными зеркалами. Положение единственного из этих трех изображений, которое требует дополнительных разъяснений, показано на рис. 12.13. Проследив с помощью одних лишь законов отражения обратный ход лучей, мы убеждаемся, что эти лучи расходятся от свечи.

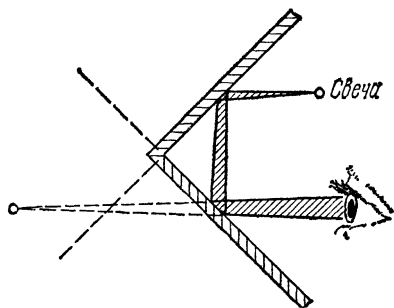


Рис. 12.13. Образование изображения при двукратном отражении.

12.6. Параболические зеркала

На вершине горы Пик дю Миди во французских Пиренеях исследователи, интересовавшиеся влиянием сверхвысоких температур на свойства стали, применили зеркала для концентрации потока солнечных лучей, достаточно интенсивного для плавления стали. В Индии, пользуясь недорогими в эксплуатации «зеркальными печами», домашние хозяйки готовят обед с помощью концентрированных солнечных лучей. Астрономы используют огромные зеркала

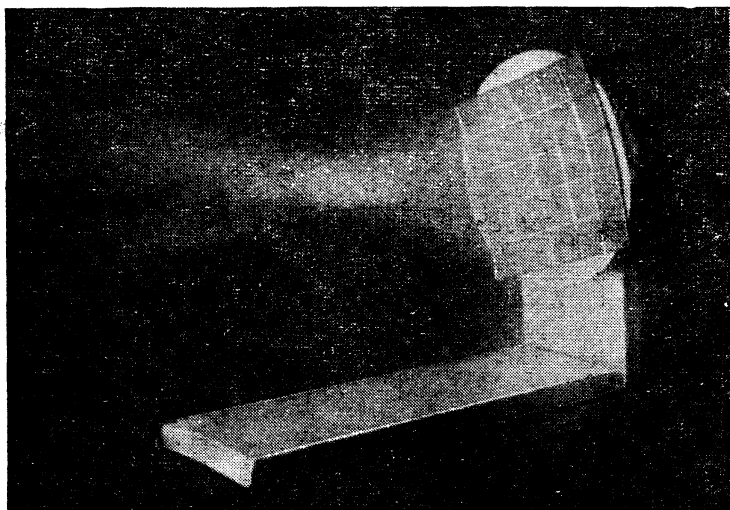


Рис. 12.14. Образование почти параболического зеркала из плоских зеркал.

своих телескопов для концентрации слабого света, испускаемого далекими звездами; это дает возможность фотографировать звезды, не доступные наблюдению невооруженным глазом. Какова должна быть форма зеркала, чтобы оно могло концентрировать свет?

Для концентрации лучей нельзя пользоваться плоскими зеркалами, так как отражаемые ими лучи всегда расходятся и кажутся выходящими из мнимых изображений, расположенных за зеркалом. Однако пользуясь несколькими плоскими зеркалами, можно добиться пересечения на узком пространстве нескольких пучков лучей от одного источника. Для конкретности предположим, что использован очень далекий источник света, например звезда, так что пучки лучей, падающие на наши зеркала, являются почти параллельными. Чем дальше источник света, тем меньше углы между пучками лучей, так что при использовании звезды в качестве источника все пучки лучей, достигающие Земли, становятся практически параллельными. На рис. 12.14 изображено двадцать пять зеркал, ориентированных под слегка отличающимися друг от друга углами, подобранными так, чтобы отражать параллельные пучки лучей по сходящимся направ-

лениям и чтобы все пучки проходили через одну узкую область. На фотоснимке эта область ясно видна, так как дым рассеивает по всем направлениям часть света, приносимого в эту область многочисленными перекрещивающимися пучками лучей. Другие области в такой же степени заполнены дымом, но они кажутся более темными, так как пучки лучей пересекаются в них в меньшем числе. Пучки лучей, отраженные от отдельных зеркал, проходят через узкую область пересечения и затем расходятся по своим начальным направлениям так, как если бы они не пересекались другими лучами.

Можно еще резче концентрировать свет, если уменьшить размеры зеркал и увеличить их число. Разрежем каждое из наших двадцати пяти зеркал, например, на четыре части. Тогда каждый параллельный пучок будет иметь вчетверо меньшую площадь поперечного сечения, и можно заставить все пучки пересекаться в соответственно меньшей области. Вновь разрежем каждое зеркало на еще меньшие

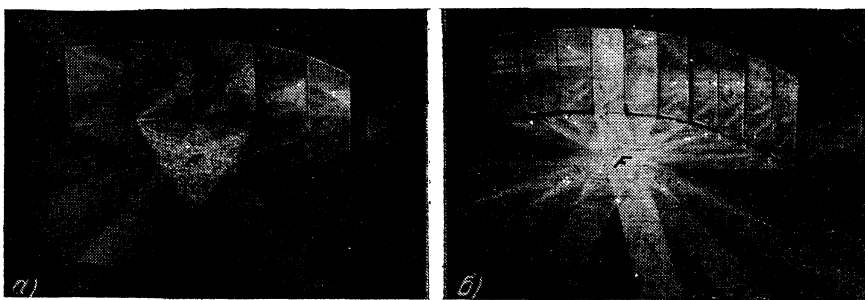


Рис. 12.15. а) Схождение первоначально параллельных друг другу пучков лучей под действием пяти плоских зеркал. б) После замены пяти зеркал десятью свет собирается на более узкой полосе.

части. Тогда область пересечения еще больше сузится. Будем многократно повторять это последовательное деление зеркал. В конце концов зеркала станут бесконечно малыми или по крайней мере сколь угодно малыми, но на них падает то же самое количество света, как и на исходные двадцать пять зеркал. Отражают они также прежнее количество света, но концентрируют его на исчезающе узкой площадке.

Описанное сложное зеркало, состоящее из различно ориентированных мельчайших зеркалец, фокусирующих большое количество света в одну точку, легко представить, но трудно изготовить. Процесс составления такого зеркала можно иллюстрировать на примере более легкой задачи концентрирования первоначально параллельных лучей на линии вместо одного круглого пятна. На рис. 12.15 показаны два этапа этого процесса, который не так трудно осуществить. Можно также представить себе аналогичный процесс в пространстве с образованием пятна вместо линии.

При последовательном дроблении и переориентировке плоских зеркал в пространстве достигается все большее приближение

к единому зеркалу с непрерывной изогнутой поверхностью; можно себе представить неограниченное продолжение этого процесса, приводящее в итоге к сплошному гладкому зеркалу, фокусирующему параллельный свет в одну точку. Форма получающейся гладкой поверхности (называемой параболоидом вращения или, в данном случае, параболическим зеркалом) определяется именно предыдущим воображаемым процессом последовательного деления зеркал. Точка F , в которой сходятся все падающие на зеркало параллельные лучи, называется *главным фокусом* параболического зеркала. Рис. 12.16 изображает сечение зеркала через главный фокус, па-

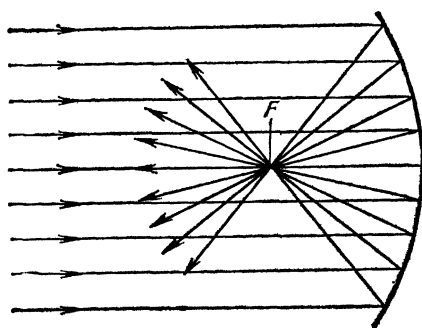


Рис. 12.16. Собирающее действие параболического зеркала на лучи света.

раллельное падающим лучам. Каждый из проведенных лучей подчиняется законам отражения света. Согласно первому из этих законов ни один из этих лучей не сходит с плоскости чертежа; согласно второму закону отражения угол отражения каждого луча равен углу его падения. Показанная на рис. 12.16 кривая, изображающая линию пересечения параболического зеркала с плоскостью чертежа, является параболой, а вся отражающая поверхность называется

параболоидом вращения, так как она образуется вращающейся параболой при вращении всего чертежа вокруг падающего луча, проходящего через главный фокус F .

Производство параболических зеркал обычно начинают с изготовления гладкой, приблизительно параболической поверхности; затем в случае необходимости поверхность улучшается деформированием, шлифовкой и полировкой, которые продолжаются до тех пор, пока пучок лучей, параллельных оси параболоида вращения, не сойдется в точечном фокусе.

12.7. Проекторы

Мы уже видели, что весь свет, падающий на параболическое зеркало параллельно его оси, отражается через главный фокус. Поскольку свет одинаково легко распространяется по заданному пути в обоих направлениях, можно поменять ролями падающие и отраженные лучи, поместив в фокусе зеркала сильный источник света очень малых размеров. Иначе говоря, свет, излучаемый из главного фокуса, после отражения от зеркала будет всегда распространяться параллельно оси зеркала. На основе этого принципа действуют многие проекторы. Схема проектора такого типа приведена на рис. 12.17. Весь свет, попадающий из источника на параболическую поверхность, идет от нее по параллельным путям, образуя узкий и яркий пучок, пробивающий огромную толщу в

атмосфере. Только свет, испускаемый в пределах конуса AFB , не попадает на зеркало и распространяется мимо него. Но даже этот свет может быть использован с помощью небольшого сферического зеркала, изображенного на рис. 12.17 в виде дуги. Это зеркальце укрепляется перед источником так, чтобы центр сферической поверхности зеркала совпадал с положением источника. Такое сферическое зеркальце отражает весь падающий на него свет обратно через главный фокус, так как все лучи падают из фокуса на сферическое зеркальце по его радиусам и, следовательно, перпендикулярно к поверхности зеркала; согласно второму закону отражения света они отражаются обратно по тем же радиусам и, пройдя через фокус, попадают на параболическое зеркало (см. также конец раздела 12.9). Разумеется, маленькое зеркало задерживает свет, отражаемый от центральной площади параболического зеркала, но эти потери ничтожны, если сферическое зеркальце достаточно мало и расположено достаточно близко к источнику света.

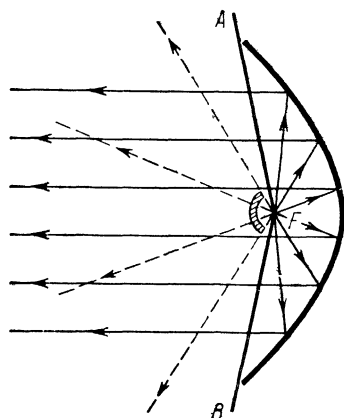


Рис. 12.17. Схема прожектора. Лучи, испускаемые источником и обозначенные сплошными линиями, отражаются в виде параллельного пучка. Лучи, обозначенные пунктирными линиями, рассеивались бы, если бы они не отражались на параболоид небольшого зеркала, обозначенным заштрихованной дугой.

Какова ширина параллельного пучка света, посылаемого прожектором? Это зависит от диаметра параболического зеркала. С другой стороны, форма зеркала зависит от расстояния между главным фокусом и средней точкой поверхности параболического зеркала. Выбор этого расстояния всецело определяет форму параболоида. Поэтому расстояние от фокуса до центра зеркала играет огромную роль. Это расстояние получило определенное название. Оно называется *фокусным расстоянием* параболы. Для обозначения фокусного расстояния любого параболического зеркала мы будем пользоваться буквой f .

12.8. Астрономические телескопы

Мы уже знаем, что параболическое зеркало сводит в фокус все лучи света, падающие на зеркало параллельно его оси (оси параболоида вращения); мы также знаем, что при помещении в фокус параболического зеркала источника света очень малых размеров зеркало отражает свет в виде параллельного пучка лучей. Но что происходит с лучами, падающими под углом к оси, или с лучами, расходящимися из источника, не находящегося в главном фокусе? Ответы на эти вопросы подведут нас к пониманию действия столь различных приборов, как астрономические телескопы и увеличивающие зеркала для бритвы.

Возможны два подхода к поискам ответа на эти вопросы. Можно либо ставить соответствующие опыты с параболическими зеркалами, либо искать ответ путем логических рассуждений, исходя из законов отражения света. Ничто, однако, не мешает нам использовать оба подхода; при этом целесообразно проверять логические заключения соответствующими измерениями.

Начнем с рассмотрения лучей, испускаемых звездой и падающих на параболическое зеркало. Предположим на этот раз, что

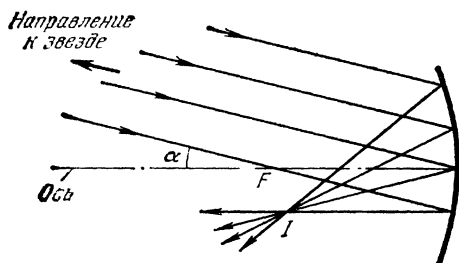


Рис. 12.18. Образование изображения звезды, расположенной не на оси телескопа.

параллельные лучи света не направлены вдоль оси зеркала, а образуют с ней угол α . Рис. 12.18 представляет собой плоскость, в которой лежит как ось зеркала, так и некоторые из лучей, изображающих направления распространения света от звезды. Произведя тщательное геометрическое построение отраженных лучей, наблюдая требование равенства всех углов отражения

соответствующим углам падения, можно получить общую картину того, каким образом должно действовать зеркало. Как видно из рис. 12.18, различные отраженные лучи проходят через очень узкую область, расположенную вблизи главного фокуса с другой стороны от главной оси (по отношению к звезде). Они не проходят через одну общую геометрическую точку. Для этого ось зеркала должна была бы быть направлена вдоль падающих лучей. Однако очень тщательное геометрическое построение (или вычисления, основанные на геометрических соображениях) показывает, что эти лучи проходят очень близко к одной общей точке, включая и те лучи, которые не лежат в плоскости чертежа. Таким образом, зеркало должно образовывать несколько размытую светлую точку в положении I , в котором свет фокусируется почти как в геометрической точке.

Положение пятна I можно приближенно определить, проведя лишь два луча. Мы выбираем такие лучи, которые легче всего провести. В частности, мы знаем, что луч, прошедший через главный фокус, должен отражаться параллельно оси в соответствии с тем, что луч, параллельный оси, отражается через главный фокус. Кроме того, луч, падающий на центр симметричного зеркала, должен отражаться в виде луча, симметрично расположенного по другую сторону оси. Эти два луча дают возможность найти изображение I . На рис. 12.19 положение I определяется как точка пересечения луча, падающего через главный фокус и отраженного параллельно оси, и луча, отраженного от центра зеркала. Точка I находится приблизительно на таком же расстоянии от центра зеркала, как и главный фокус F . Что же касается ее углового расстояния (угла α) от оси, то оно в точности равно угловому расстоянию звезды, рас-

положенной под тем же углом α по другую сторону от оси. Отсюда следует, что изображения нескольких звезд, если смотреть на них вдоль оси от зеркала, образуют ту же фигуру, что и сами звезды на небосводе, но это изображение повернуто ровно на 180° : верх фигуры становится низом, а правая сторона — левой. Поэтому и фотоснимок звезд, полученный на фотопластинке, поставленной в фокусе F перпендикулярно к оси, показывает правильные относительные расстояния между звездами (рис. 12.20). Таким образом, параболическое зеркало может служить астрономическим телескопом.

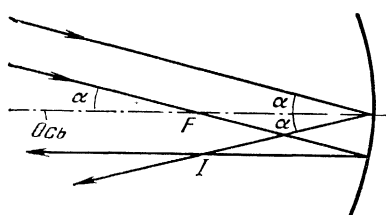


Рис. 12.19. Упрощенный вариант рис. 12.18, поясняющий способ нахождения положения изображения.

*Вид созвездия
на небосводе*

*Фотоснимок
созвездия*

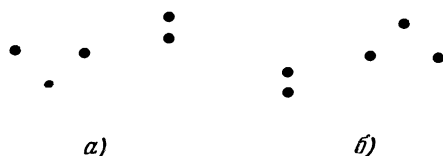


Рис. 12.20. Вид созвездия при наблюдении невооруженным глазом (а) и фотоснимок того же созвездия, полученный с помощью телескопа (б). Вглянитесь на рисунок, повернув книгу на 180° .

Оно собирает свет, излучаемый звездами, и концентрирует его в точках, расположенных соответственно действительному расположению звезд на небосводе. Почти все крупные современные телескопы используют параболические зеркала.

Основной частью телескопа Гэйля на горе Паломар является параболическое зеркало диаметром в 5 м. Металлическая конструкция, в которой укреплено параболическое зеркало, смонтирована на осях и подшипниках так, чтобы зеркало могло быть наведено на различные точки небосвода. Предусмотрено плавное автоматическое изменение направления его оси, благодаря которому телескоп может следовать за кажущимся движением звезды с востока на запад во время фотографирования. Фотоснимки различных участков неба, полученные с помощью этого телескопа, подтверждают во всех деталях приведенные выше теоретические выводы об отражении лучей, а также результаты более точных вычислений, касающихся степени размытости точечных изображений.

При длительной экспозиции на фотопленке собирается больше света и она может давать изображения менее ярких точек, чем те, которые способен видеть глаз. Кроме того, фотопленка осуществляет непрерывную регистрацию относительной яркости и расположения звезд. Для получения изображений, видимых глазом, астрономические телескопы используются лишь в редких случаях, так как глаз малочувствителен и ненадежен как регистрирующий прибор.

Для фотографирования изображений звезд и галактик малой яркости даже при длительных экспозициях требуется как можно больше света; для этого используются телескопы с зеркалами большого

диаметра, чтобы увеличить количество света, собираемого зеркалом. Самые крупные телескопы собирают столько света, что на наиболее чувствительных фотопластинках при длительных экспозициях фотографируются галактики, находящиеся на расстояниях 10^{22} км от солнечной системы. Светособирающая способность некоторых крупных телескопов настолько велика, что свет, поступающий в них от звезд, может фотографироваться через спектроскоп, смонтированный на телескопе. Благодаря этому можно наблюдать характерные спектральные линии химических элементов, присутствующих в звездах. Как выяснилось, звезды состоят из тех же элементов, которые присутствуют на Солнце и на Земле (см. раздел 7.8).

12.9. Изображения и оптические обманы

Электролампу, изображенную на рис. 12.21, можно прострелить пулей, не погасив ее и нисколько не повредив ее поверхности. Можно пересечь рукой эту лампу, даже не почувствовав ее присутствия. Этой лампы нет там, где она видна. Впрочем, свет оттуда действительно идет, и он был виден тому, кто находился вблизи фотоаппарата во время фотографирования. Присутствовала там и настоящая масштабная линейка, которая видна на фотоснимке. Если бы в нее попала пуля, она была бы пробита. Рука не могла бы ее пересечь.

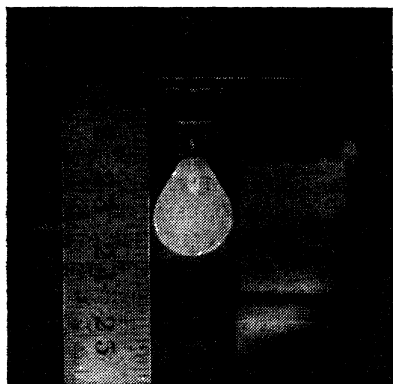


Рис. 12.21. Действительное изображение, образуемое параболическим зеркалом. Обратите внимание на размеры лампы, отсчитываемые по линейке.

Маленькая электролампа на фотоснимке является лишь изображением настоящей электролампы, расположенной вне поля зрения, примерно в 17 м впереди своего изображения. Это изображение образовано параболическим зеркалом, находящимся почти в 2 м за кажущейся лампой.

На этом примере мы убеждаемся, что параболические зеркала образуют изображения также и предметов конечных размеров, расположенных недалеко от зеркала. Но этот опыт говорит еще и о другом. Нам известно, что сама лампа во время фотографирования стояла вертикально стеклянным баллоном вверх; изображение же ее перевернуто баллоном вниз. Далее, при перемещении лампы относительно зеркала изображение также перемещается и притом изменяет свои размеры. При приближении лампы к зеркалу ее изображение удаляется от зеркала по направлению к приближающейся лампе и увеличивается в размерах.

Из серии таких опытов, проводимых над параболическими зеркалами с различными фокусными расстояниями при самых различ-

ных расстояниях лампы от каждого зеркала, можно найти простые соотношения между расстояниями предмета и изображения от зеркала, а также между величиной изображения и предмета (в такого рода опытах предметом обычно называют источник света). Найти эти соотношения можно, не прибегая к законам отражения, а используя только результаты подобных опытов, но это требует огромного числа повторных опытов и большого искусства в подборе правильного, простого и точного математического описания результатов.

С другой стороны, поскольку мы знаем из опыта, что изображения действительно образуются, достаточно провести лишь несколько лучей на основании законов отражения, чтобы без особых трудностей получить интересующие нас соотношения между величинами, относящимися к предмету и его изображению. Несколько экспериментальных проверок полученных соотношений покажут, что

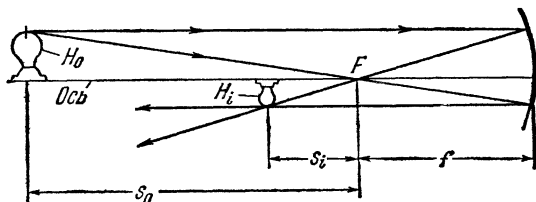


Рис. 12.22. Определение размеров и положения изображения предмета, расположенного на расстоянии от зеркала, соизмеримом с фокусным расстоянием. Положение изображения определяется пересечением двух лучей.

законы отражения приводят к правильным результатам, так что можно с уверенностью предсказывать действие параболического зеркала при любом расстоянии предмета от него.

Пусть предмет расположен перед главным фокусом параболического зеркала на расстоянии s_0 от главного фокуса (рис. 12.22). Обозначим высоту предмета, считая от оси, через H_0 . Рассмотрим свет, исходящий от вершины предмета и падающий на зеркало. В частности, проследим два луча, показанные на рисунке. Один из них изображает свет, падающий на зеркало через фокус F и отражаемый параллельно оси. Другой падает на зеркало параллельно оси и потому должен отражаться через фокус. Точка, в которой они пересекаются после отражения, должна быть тем местом, в котором свет, исходящий от вершины предмета, вновь собирается, чтобы образовать изображение этой вершины. Других лучей нам не потребуется, так как всякий другой отраженный луч, вышедший из вершины предмета, пройдет через очень малую область, окружающую точку пересечения двух выбранных лучей. Мы уже видели, что то же самое относится к лучам, посылаемым звездой под некоторым углом к оси зеркала.

Изображение вершины предмета в этой точке получается благодаря тому, что свет, идущий от нее по разным путям, проходит через эту точку и именно из нее поступает в виде расходящегося пучка в глаз или объектив фотоаппарата совершенно так же, как если

бы в этой точке располагалась вершина самого предмета, хотя и уменьшенного в своих размерах (см. рис. 12.22). Точка пересечения двух рассмотренных лучей определяет не только расстояние вершины изображения предмета от F , но и высоту H_i изображения, считая от оси. Всякий раз, когда мы изображаем ход этих двух лучей с сохранением геометрического подобия, мы можем узнать об изображении все то, что предсказывают законы отражения. Рассмотрим, например, первый опыт, описанный в данном разделе. При получении фотоснимка, приведенного на рис. 12.21, была собрана следующая установка. Лампочка была помещена перед главным фокусом зеркала на расстоянии 17,5 м от него. Фокусное расстояние зеркала, найденное при помощи параллельных солнечных лучей, составляло 1,75 м. Таким образом, расстояние от зеркала до источника равнялось 19,25 м. Изображение образовалось на расстоянии 0,175 м от главного фокуса и 1,925 м от зеркала. Источником служила обычная электролампа высотой 19 см.; изображение же ее, измеренное по расположенной рядом линейке, было перевернутым и имело высоту 1,9 см. Построив ход двух лучей на чертеже всей установки с соблюдением масштаба, мы узнаем, что изображение должно находиться в 0,175 м перед F и иметь высоту, составляющую 0,1 высоты предмета. Это согласуется с опытными данными. Пользуясь подобными двухлучевыми чертежами, можно предсказывать размеры и положение изображения и для других расположений предмета и зеркала, а также для зеркал с различными фокусными расстояниями.

Геометрические построения на такого рода двухлучевых схемах настолько просты, что вряд ли есть смысл на них долго останавливаться. Однако нецелесообразно каждый раз строить схемы хода лучей. Простота геометрических построений наталкивает на мысль, что наши результаты могут быть очень просто выражены математически в форме, удобной для числовых расчетов. Начнем с соотношения между размерами предмета и изображения.

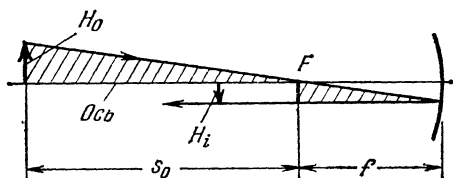


Рис. 12.23. Нахождение отношения высоты изображения к высоте предмета из подобия треугольников. Используя луч, проходящий из вершины предмета через главный фокус, можно связать отношение высот с отношением фокусного расстояния к расстоянию предмета от главного фокуса.

На рис. 12.23 оставлен только луч, проходящий из вершины предмета через главный фокус. Поскольку этот луч после отражения идет параллельно оси зеркала, отношение H_i к H_0 можно получить из подобия заштрихованных треугольников. Так как f и s_0 являются основаниями, а H_i и H_0 — соответственными высотами этих треугольников, можно написать $H_i/H_0 = f/s_0$.

Строго говоря, основание малого треугольника несколько меньше фокусного расстояния f из-за кривизны зеркала; но если предмет не слишком велик, падающий луч образует с осью малый угол; в таком случае точка падения луча на зеркало находится от главного фокуса на расстоянии, почти равном f . С учетом этого приближения, для нахождения отношения высоты изображения к высоте предмета требуется только знать отношение фокусного расстояния к расстоянию предмета от главного фокуса. Пользуясь примером, представленным на рис. 12.21, где $f=1,75$ м и $s_0=17,5$ м, получаем $H_i/H_0=1,75/17,5=0,1$. Из опыта получилось также 0,1.

Рассмотрим теперь дополнительные сведения, которые дает луч, проходящий параллельно оси и отражаемый через главный фокус.

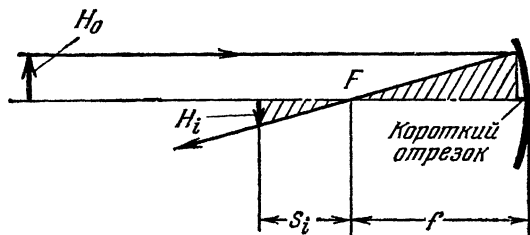


Рис. 12.24. К получению зависимости между размерами изображения и предмета. Чтобы связать отношение высот изображения и предмета с отношением фокусного расстояния к расстоянию изображения от фокуса, используется луч, проходящий из вершины предмета параллельно оси

Этот луч можно использовать для построения подобных треугольников, заштрихованных на рис. 12.24. Из подобия этих треугольников имеем $H_i/H_0=s_i/f$. Эта пропорция опять включает в себе небольшую ошибку, так как вместо f следовало бы подставить f за вычетом короткого отрезка, указанного на рис. 12.24. Объединяя эту пропорцию с пропорцией $H_i/H_0=f/s_0$, находим

$$s_i/f=f/s_0, \text{ или } s_0 s_i=f^2.$$

Расстояния предмета и изображения от фокуса обратно пропорциональны друг другу. При приближении предмета к зеркалу изображение должно удаляться от него настолько, чтобы произведение $s_0 s_i$ оставалось равным f^2 .

Именно так обстояло дело при передвижении электролампы в опыте, описанном в начале этого раздела. Сначала s_0 составляло 17,5 м при $s_i=0,175$ м. Произведение этих величин было равно $s_0 s_i=17,5 \cdot 0,175=(1,75)^2$, что составляет квадрат фокусного расстояния. Найдите s_i при передвижении лампы на расстояние 8,75 м от главного фокуса. Для вычисления s_i используйте новое значение s_0 и равенство $s_i=f^2/s_0$. В опыте изображение лампы перемещается на 0,175 м, и размеры его увеличиваются вдвое. Согласуется ли это с вычислениями?

Пользуясь выражениями $s_i=f^2/s_0$ и $H_i=(f/s_0)H_0$, можно легко предсказывать положение и высоту изображений для любого параболического зеркала.

Один из примеров применения соотношения $s_0 s_i = f^2$ напрашивается сам собой. Выясним вопрос: на каком расстоянии от главного фокуса должен помещаться предмет, чтобы изображение с ним совпало, т. е. чтобы s_0 и s_i были равны друг другу? Ясно, что это произойдет, когда и та и другая величины равны фокусному расстоянию, т. е. когда и предмет и изображение расположены на удвоенном фокусном расстоянии от средней точки поверхности зеркала. Кроме того, в этом случае предмет и изображение равны по величине, так как соотношение $H_i = (f/s_0)H_0$ при $s_0 = f$ дает $H_i = H_0$. Если предмет не только расположен на оси на расстоянии $2f$ от зеркала, но при этом и очень мал, то зеркало будет отражать свет обратно в окружающую предмет малую область пространства.

То, что параболическое зеркало способно отбрасывать весь падающий на него свет обратно туда, откуда свет излучается, кажется на первый взгляд удивительным. Как мы уже знаем из обсуждения действия прожектора, отбрасывать лучи назад в светящуюся точку можно с помощью сферического зеркала, причем центр сферической поверхности зеркала должен совпадать со светящейся точкой. Однако, как мы только что видели, и параболическое зеркало способно действовать таким же образом.

Очевидно, рабочая часть параболического зеркала должна быть близка по форме к участку сферической поверхности. В частности, можно сказать, что параболическое зеркало с фокусным расстоянием f должно совпадать с участком поверхности шара, имеющего радиус $2f$.

Это же следует из рис. 12.25, где окружность с центром в C и парабола с фокусом в F проведены через центральную точку (полюс) поверхности зеркала. Только вдали от оси можно заметить расхождение между поверхностями шара и параболоида.

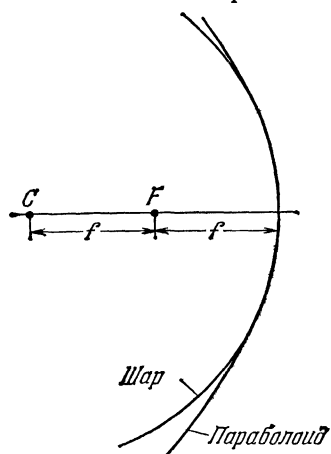


Рис. 12.25. Сходство между сферическим и параболическим зеркалами. Общий для них главный фокус находится в точке F . Точка C является центром сферической поверхности зеркала.

На практике, ввиду того, что изготовление сферического зеркала обходится обычно дешевле параболического, часто пользуются сферическими зеркалами с радиусом $2f$, если хотят получить зеркало с фокусным расстоянием f .

12.10. Действительные и мнимые изображения

Мнимая электролампа, фигурировавшая в разделе 12.9, является действительным изображением настоящей лампы. Пучки лучей, посылаемые этим изображением в глаз, действительно сначала сходятся в этом изображении после отражения зеркалом, а затем расходятся из него и попадают в глаз. Таким образом, действительное

изображение принципиально отличается от мнимого, видимого в плоском зеркале. Через мнимое изображение свет может вовсе не проходить, но через действительное изображение он обязательно проходит, так что, поместив фотопленку в пространство, занимаемое действительным изображением, можно фотографически зафиксировать это изображение, что и делается в астрономическом телескопе. В случае же мнимого изображения, образующегося за плоским зеркалом, было бы бесполезно помещать за зеркалом фотопленку.

Исследование параболических зеркал или их сферических заменителей дает нам сведения об обстоятельствах, при которых изображения являются действительными или, наоборот, мнимыми. Ключ к решению этого вопроса можно найти в заключениях, к которым мы пришли выше. Из соотношения $s_i = f/s_o$ следует, что при приближении предмета к главному фокусу изображение удаляется от зеркала. Когда s_o делается очень малым, расстояние изображения от главного фокуса s_i становится огромным; наконец, когда предмет проходит через главный фокус, действительное изображение исчезает на бесконечно большом расстоянии перед зеркалом.

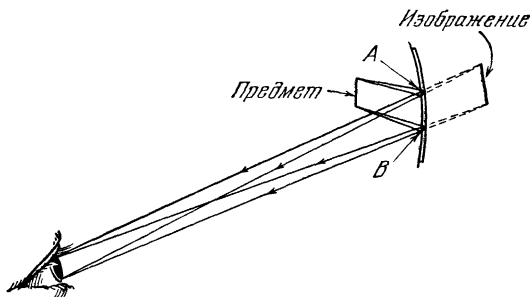


Рис. 12.26. Образование мнимого изображения за вогнутым зеркалом. Лучи от некоторой точки близкого предмета отражаются очень малой площадкой зеркала, которая может приближенно рассматриваться как площадка плоского зеркала. Показаны две такие площадки: *A* — малый участок зеркала, отражающий свет от вершины предмета в глаз; *B* — малый участок зеркала, отражающий свет от нижнего конца предмета в глаз. Обратите внимание на то, что эти две площадки ориентированы не совсем одинаково, т. е. лежат не в одной плоскости. Результатом этого является некоторое увеличение мнимого изображения по сравнению с величиной самого предмета

Если продолжать приближать предмет к зеркалу, то появляется мнимое изображение (уже за зеркалом), приближающееся к зеркалу с бесконечно большого расстояния и достигающее поверхности зеркала одновременно с предметом. Это не должно нас удивлять. Действительно, достаточно малая площадка на зеркале мало отличается от плоской площадки. Когда предмет весьма близок к зеркалу, лишь очень малая часть зеркала отражает в глаз свет от предмета. В этом случае малый эффективный участок зеркала ведет себя как плоское зеркало, которое образует мнимое изображение (рис. 12.26).

Из двухлучевого построения (рис. 12.27) нетрудно убедиться, что всякий раз, когда предмет находится между фокусом и зеркалом, должно получаться мнимое изображение. Используются те же лучи (называемые главными), что и в предыдущих двухлучевых постро-

ниях: один — параллельный оси и отражаемый через фокус, и другой — выходящий по направлению от фокуса и отражаемый параллельно оси. Как видно из рис. 12.27, после отражения эти лучи кажутся выходящими из точки их пересечения, расположенной за зеркалом, причем изображение всегда увеличено по сравнению с предметом. Построение хода лучей, как и в случае действительных изображений, позволяет проанализировать поведение мнимых изображений; экспериментальную проверку полученных выводов можно

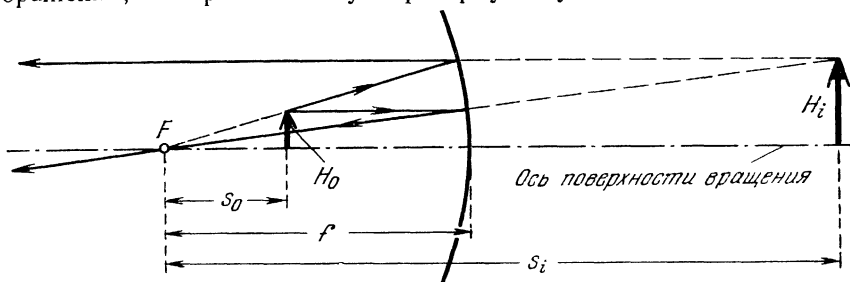


Рис. 12.27. Образование мнимого изображения за вогнутым зеркалом. Предмет находится между главным фокусом и зеркалом.

осуществить с помощью отражения на блестящей внутренней поверхности металлической круглодонной миски или кубка, или даже обыкновенной разливательной ложки, почти так же успешно, как и с вогнутым зеркалом для бритвы. Правильная сферическая или параболическая поверхность дает возможность произвести более точные измерения, но не изменяет общих заключений.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

1*. Можно ли найти такое положение экрана, изображенного на рис. 12.2, чтобы получить полутень без полной тени? (Раздел 12.1.)

2. На рис. 12.2 показано, как образуется нерезкая тень. Как можно было бы получить более резкую тень от того же препятствия?

3. Иногда мы наблюдаем полные, а иногда кольцеобразные затмения Солнца. Во втором случае вокруг диска Луны видно солнечное кольцо.

а) Начертив схему расположения Земли, Луны и Солнца, объясните, почему возможны оба эти вида солнечных затмений. Остаются ли расстояния от Земли до Луны и от Земли до Солнца одинаковыми в обоих случаях?

б) Расстояние от Земли до Луны равно примерно $4 \cdot 10^5$ км, а до Солнца — около $1,5 \cdot 10^8$ км. Если диаметр Луны составляет около 3200 км, то чему приблизительно равен диаметр Солнца?

4*. Что произошло бы со световым конусом, изображенным на рис. 12.3, если бы источник света был отодвинут дальше? (Раздел 12.2.)

5*. Два геодезиста определяют расстояние до башни методом триангуляции. Один из них введен в заблуждение зеркалом, показанным на рис. 12.28. Где, по их данным, будет расположена башня? (Раздел 12.3.)

6*. Который из углов на рис. 12.29 является углом падения и который — углом отражения? (Раздел 12.4.)

7*. Сколько разных лучей может падать на зеркало в одной и той же точке под одинаковым углом? (Раздел 12.4.)

8*. Сколько разных отраженных лучей может дать один заданный луч, падающий на зеркало? (Раздел 12.4.)

9. Если вы видите глаза другого наблюдателя через сложную систему зеркал, сможет ли он, в свою очередь, видеть ваши глаза?

10. При исследовании броуновского движения пользуются пучком световых лучей для повышения точности отсчета угла поворота зеркала, бомбардируемого молекулами воздуха (рис. 12.30). Комбинация источника света с зеркалом

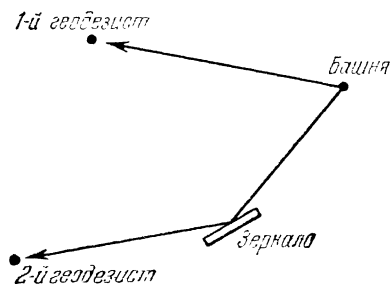


Рис. 12.28. К задаче 5*.

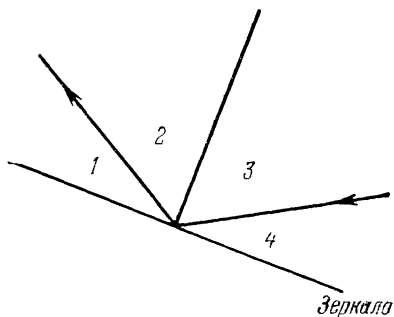


Рис. 12.29. К задаче 6*.

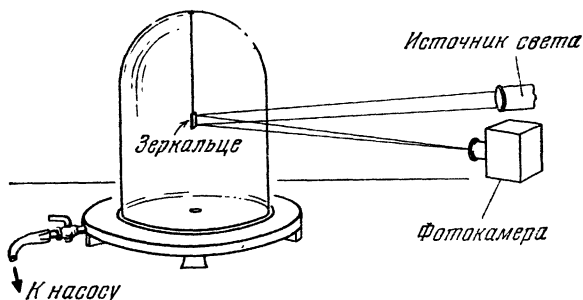


Рис. 12.30. К задаче 10.

при подобном использовании (с целью увеличений малых перемещений) называется оптическим рычагом.

а) Если зеркало поворачивается на $0,06^\circ$, на какой угол отклонится отраженный луч? Какую часть угла в 360° это составит?

б) Если расстояние от зеркала до фотоаппарата 2 м, то приблизительно на сколько передвинется световой луч по поверхности объектива фотоаппарата?

в) Какое влияние оказывает положение источника света на чувствительность оптического рычага?

11. Расположите плоское зеркало высотой 40 см так, чтобы центр зеркала был приблизительно на уровне глаз. Возьмите метровую линейку и держите ее в вертикальном положении у самого лица так, чтобы середина линейки проходила на уровне глаз. Встаньте перед зеркалом, лицом к нему.

а) Приближайтесь к зеркалу и затем удаляйтесь от него. Влияет ли ваше перемещение на величину той части линейки, которая вам видна в зеркале?

б) Сформулируйте общее правило, связывающее длину видимой части линейки с высотой зеркала. Построив ход лучей, докажете, что это правило остается в силе при любых расстояниях от зеркала.

в) В магазинах готовой одежды нередко имеются зеркала, доходящие до самого пола, для того чтобы покупатель мог видеть себя во весь рост. Обязательна ли для этого такая высота зеркала?

г) Если самый низкорослый покупатель имеет рост около 150 см, то до какой высоты от пола можно поднимать нижний край зеркала для того, чтобы все покупатели могли видеть в зеркале свою обувь?

12. Зеркало заднего обзора в автомашине расположено так, что его верхний и нижний края горизонтальны, а его середина находится на одной высоте с центром заднего окна машины. Глаз водителя находится на той же высоте, а горизонтальная прямая, проведенная из глаза в центр зеркала, образует угол 30° с прямой, соединяющей центры зеркала и заднего окна (рис. 12.31). Расстояние от глаза до зеркала 60 см, а от зеркала до окна 240 см. При какой наименьшей ширине зеркала водитель будет видеть все заднее окно, ширина которого 90 см?

13. Перископ можно изготовить, укрепив два плоских зеркала на концах трубки (рис. 12.32). Зеркала обращены друг к другу своими рабочими поверхностями. Они параллельны друг другу и каждое образует угол 45° с осью трубки. Против центра нижнего зеркала в трубке расположено смотровое отверстие, а против центра верхнего зеркала в верхнем конце трубки имеется более широкое отверстие. Пусть расстояние между зеркалами по вертикали составляет 120 см, а наблюдаемым предметом является человек ростом 180 см, стоящий за забором на расстоянии 15 м.

а) Найдите наименьшую допустимую вертикальную ширину верхнего отверстия в трубке перископа.

б) Какова наименьшая допустимая ширина верхнего зеркала? (Проведите лучи, идущие от наблюдаемого человека к глазу наблюдателя, и не забудьте свойство подобных треугольников.)

14*. Измерьте в миллиметрах фокусное расстояние параболического зеркала на рис. 12.17. (Раздел 12.7.)

15*. Что произошло бы с лучами, показанными на рис. 12.16, если бы в точке F было помещено маленькое плоское зеркало, обращенное к параболическому зеркалу? (Раздел 12.7.)

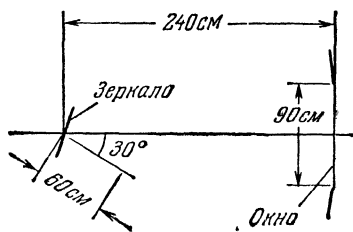


Рис. 12.31. К задаче 12.

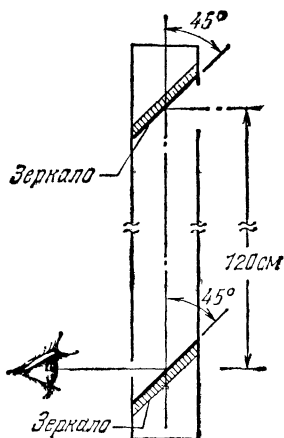


Рис. 12.32. К задаче 13.

16*. Почему на рис. 12.19 достаточно двух лучей, чтобы определить положение изображения звезды? (Раздел 12.8.)

17. а) Что получится, если в установке, показанной на рис. 12.21, на месте действительного изображения поместить настоящую лампочку?

б) Нельзя ли сформулировать общее правило о том, что получается при перемещении предмета на место его прежнего действительного изображения?

18*. Увидите ли вы изображение лампочки, если поместите глаз в точку, в которой находится буква s_1 на схеме, изображенной на рис. 12.22? (Раздел 12.9.)

19. Гвоздь длиной 4 см помещен перед вогнутым зеркалом в 35 см от полюса (средней точки поверхности) зеркала. Найти длину изображения, если фокусное расстояние зеркала равно 20 см.

20. Изображение свечи находится в 30 см от полюса (средней точки поверхности) вогнутого зеркала. Длина свечи 10 см, а ее изображения — 5 см. Найти фокусное расстояние зеркала.

21. Параллельно главной оптической оси вогнутого зеркала с фокусным расстоянием 5 см на расстоянии 1 см от оси расположена стрелка, обращенная своим острием к зеркалу. Расстояние от острия до зеркала равно 11 см.

а) До построения хода лучей опишите вид и положение изображения.

б) Постройте ход лучей, откладывая расстояния в натуральную величину, и определите положение изображения.

в) Опишите, что произойдет с изображением, если поднять хвостовой конец стрелки до расстояния 3 см от оси без смещения острия стрелки. На схеме прежнего хода лучей покажите новые положения предмета и изображения, используя карандаш другого цвета.

г) Каково положение стрелки, если ее изображение параллельно оси?

д) Если, сохраняя все прежние расстояния, расположить стрелку на главной оси, где окажется ее изображение? Изменится ли его длина?

22. Найдите диаметр изображения Солнца в телескопе на горе Паломар, фокусное расстояние которого 18 м, если диаметр Солнца составляет около $1,4 \cdot 10^9$ м, а расстояние от Земли до Солнца — $1,5 \cdot 10^{11}$ м.

23. Чему равно фокусное расстояние плоского зеркала?

24. Расстояния предмета и изображения в случае вогнутого зеркала часто отсчитываются от полюса (средней точки) зеркала вместо главного фокуса. Обозначим эти расстояния соответственно через D_0 и D_i . Тогда имеем $s_0 = D_0 - f$ и $s_i = D_i - f$, где f — фокусное расстояние. Пользуясь этими соотношениями, покажите, что из равенства $s_0 s_i = f^2$ следует $1/D_0 + 1/D_i = 1/f$.

25*. Может ли действительное изображение, образуемое параболическим зеркалом, быть больше самого предмета? (Раздел 12.10.)

26*. Может ли мнимое изображение, создаваемое параболическим зеркалом, как показано на рис. 12.27, оказаться меньше самого предмета? (Раздел 12.10.)

27. В разделе 12.9 спрашивалось, на каком расстоянии от главного фокуса должен быть расположен предмет, чтобы его изображение совместились с предметом. Покажите, что на этот вопрос возможны два ответа, и объясните смысл второго ответа, не обсужденного в этой главе.

28. Подготовьтесь к обсуждению того, что происходит с изображением предмета, перемещаемого по главной оси вогнутого зеркала из бесконечности к зеркалу.

29. Наше исследование неплоских зеркал пока касалось только их внутренней, *вогнутой* поверхности. Внешние (выпуклые) поверхности, образуемые вращением тех же кривых *), также дают изображения. Зеркала, образуемые выпуклыми поверхностями, называются *выпуклыми зеркалами*. Они зачастую используются в качестве боковых зеркал заднего обзора на автомашинах или для украшения помещений. Используя законы отражения света и считая поверхности параболическими, докажете следующие положения соответствующими построениями.

а) Площадь, обозреваемая глазом благодаря отражению на круглом выпуклом зеркале, больше, чем площадь, обозреваемая с помощью плоского зеркала того же диаметра при том же расположении зеркала и глаза.

б) Лучи света, параллельные оси, отражаются так, как если бы они исходили из точки, расположенной за зеркалом, являющейся главным фокусом зеркала. Этот фокус называется мнимым. Почему?

в) Лучи, выходящие из любой точки оси, отражаются так, как если бы они выходили из некоторой точки на продолжении оси за выпуклым зеркалом. Поэтому изображение является мнимым.

г) Изображение меньше предмета и не перевернуто.

д) При приближении предмета к зеркалу изображение приближается к нему.

е) Существует максимальное расстояние изображения от зеркала. Чему оно равно? Попробуйте выяснить это построением хода лучей.

30. Сравните рис. 12.16 (на котором изображен параболоид, отражающий все лучи, параллельные главной оптической оси, через главный фокус) с рис. 12.25 и объясните, почему не все параллельные лучи, направленные на сферическое зеркало, проходят через точку F .

*) Параболы и дуги окружности. (Прим. ред.)

13 ПРЕЛОМЛЕНИЕ

13.1. Преломление

При экспериментальном исследовании отражения света мы пользовались установками, позволяющими наблюдать изолированный пучок лучей, отражаемый поверхностью. В результате систематических наблюдений мы пришли к двум простым законам зеркального отражения света. Эти законы в свою очередь позволяют объяснить образование изображений в зеркалах, как плоских, так и обладающих кривизной. Отсюда видно, что сведение результатов разнообразных наблюдений к паре простых и ясных законов приводит к большому упрощению вопроса и дает мощное средство для предсказания поведения отраженных лучей. Было бы чрезвычайно трудно помнить величину и характер всех изображений, получаемых с различными зеркалами и при различных положениях предмета. Если, однако, уметь применять эти законы, то можно заранее дать полное описание изображения, которое получится от той или иной комбинации зеркал. Можно даже предсказывать характер изображений в зеркалах таких типов, которые мы не исследовали экспериментально.

Посмотрим, нельзя ли подобным же путем подойти к простому объяснению оптических явлений другой группы, затронутых в гл. 11. В ней отмечалось, что свет проходит через поверхности некоторых тел и при этом обычно изменяет направление своего распространения. Этот излом светового луча при переходе из одного вещества в другое был назван *преломлением*. Мы уже познакомились с преломлением света на примерах иллюзии плавающей монеты (рис. 11.2) и излома линейки (рис. 11.1). Хотя эти наблюдения явно доказывают существование преломления света, из них мало что можно узнать о поведении отдельных световых лучей. Исследование может быть упрощено путем выделения отдельного параллельного пучка лучей, как показано на рис. 13.1. На этом фотоснимке показан довольно широкий параллельный пучок света, проходящий из воздуха в воду, налитую в аквариум. Обратите внимание на то, что на поверхности воды луч резко меняет свое направление, а часть света отражается от поверхности обратно в воздух.

Как и при изучении явлений отражения света, луч, идущий к поверхности, называется *падающим*. На рис. 13.1 угол между этим лучом и нормалью к поверхности — это *угол падения*. Продолжение

луча от точки излома на поверхности называется *преломленным* лучом, а угол между преломленным лучом и нормалью называется *углом преломления*.

Опуская в аквариум белый пластмассовый транспортир, как показано на рисунке, можно получить все необходимые сведения о направлении этих лучей. Когда мы укрепляем транспортир строго перпендикулярно к поверхности воды в аквариуме так, что падающие лучи чуть скользят по поверхности транспортира, преломленные лучи также скользят по этой поверхности. Можно повторить этот опыт при различных углах падения и для различных пар сред (верхней и нижней).

Для большинства веществ результат получается тот же. Этот результат формулируется в первом законе преломления:

*Падающий луч, преломленный луч и нормаль к поверхности, восстановленная в точке преломления, лежат в одной плоскости *).*

Обратите внимание на сходство этого закона с первым законом отражения света (см. раздел 12.4).

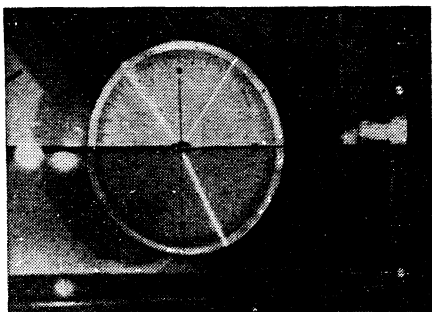


Рис. 13.1. Свет проходит из воздуха в воду.

13.2. Измерение углов при преломлении

Второй закон отражения говорит о том, что углы падения и отражения равны. Выясним, приводят ли эксперименты к аналогичному соотношению между углом падения и углом преломления?

Если мы хотим достичь удовлетворительной точности измерения углов падения и преломления, необходимо сузить параллельные пучки лучей по сравнению с показанными на рис. 13.1 и добиться того, чтобы лучи, насколько возможно, приближались к геометрическим линиям. Необходимо также охватить широкий интервал углов падения и преломления. Наконец, все это необходимо проделать для разных комбинаций первой и второй сред, чтобы установить общий закон.

Опыты, показанные на рис. 13.2, были проведены для комбинации «воздух — стекло». Источник света мог перемещаться по дуге почти на 90° и притом так, что узкий пучок параллельных лучей едва скользил по поверхности листа белой бумаги, чтобы сделать пучок лучей видимым. В качестве второй среды был использован стеклянный полукруг, который виден на рис. 13.2. Задняя плос-

*) В некоторых кристаллических веществах падающий луч, нормаль, восстановленная в точке преломления, и преломленный луч не лежат в одной плоскости.

кость этого полукруга была сделана слегка матовой путем более или менее грубой шлифовки и выкрашена в белый цвет, чтобы пучок лучей был виден при прохождении в стекле. Стекланный полукруг приложен к листу бумаги с круговой шкалой. Центры окружности полукруга и круговой шкалы совпадают. Нормаль к плоскому диаметральному срезу полукруга, проведенная из его центра, проходит через нулевое деление круговой шкалы, так что лучи, проходящие

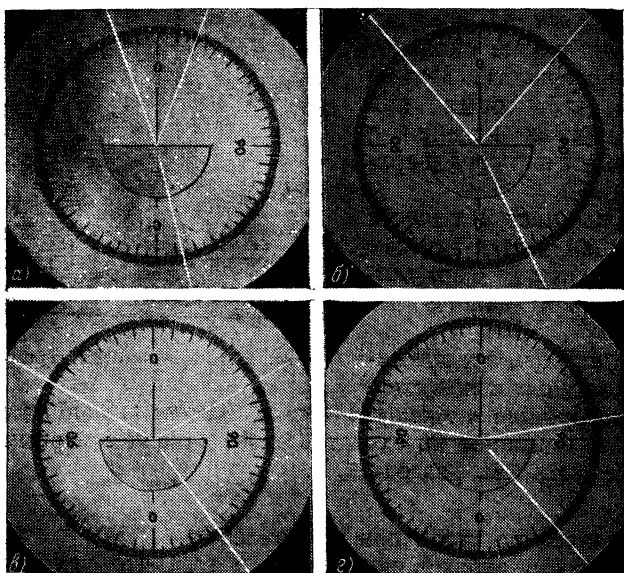


Рис. 13.2. Преломление света, входящего из воздуха в стекло при различных углах падения.

через центр полукруга и шкалы, показывают углы в градусах, образуемые лучами и этой нормалью. Узкий падающий луч направлен прямо в этот общий центр. Такое устройство позволяет измерять углы падения и соответствующие им углы преломления. Отраженный луч также виден, так что угол отражения может измеряться для проверки того, что направления падающего луча и среза полукруга согласуются с положением шкалы.

Фотоснимки были сделаны при падении света под углами 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 и 80°. Некоторые из этих фотоснимков показаны на рис. 13.2, а все полученные числовые данные приведены в табл. 13.1. Внимательно изучите приведенные фотоснимки. Согласны ли вы со следующими заключениями?

1. Угол преломления света, проходящего из воздуха в стекло, всегда меньше угла падения, кроме случая, когда они оба равны 0°.
2. Поведение отраженного луча согласуется с обычными законами зеркального отражения света.

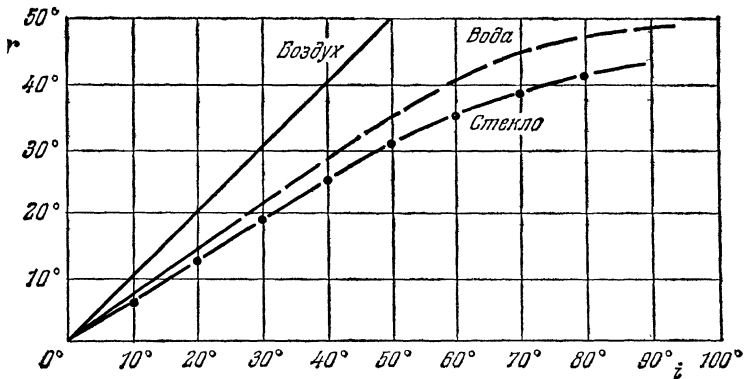
ТАБЛИЦА 13.1

Зависимость угла преломления r от угла падения i при прохождении света из воздуха в стекло

i°	r°	i/r	i°	r°	i/r
0	0	Неопределенно	50	30,7	1,63
10	6,7	1,5	60	35,1	1,71
20	13,3	1,50	70	38,6	1,81
30	19,6	1,53	80	40,6	1,97
40	25,2	1,59			

3. Свет, проходящий в стекле, распространяется по радиусам и потому падает на цилиндрическую поверхность полудиска по нормали к ней. Он не преломляется на этой поверхности, а выходит в воздух, не изменяя своего направления.

Каждое из этих заключений пригодится нам в дальнейшем, а пока сосредоточим внимание на первом из них и исследуем соотношение между углами более тщательно.

Рис. 13.3. График зависимости r от i .

Как видно из табл. 13.1, угол r всегда меньше соответственного угла i . Последний столбец таблицы показывает, что отношение i/r не постоянно, а изменяется приблизительно от 1,5 для малых углов до величины, превышающей 1,9, для $i=80^\circ$. Хотя это отношение и не постоянно, однако при изменении угла падения угол преломления изменяется систематически. Зависимость между этими углами наглядно показана на рис. 13.3. График построен путем нанесения экспериментальных точек, отмеченных черными кружками, и проведения через них плавной кривой.

Этот график позволяет предсказать значение угла преломления при любом заданном угле падения. Например, можно с уверенностью

утверждать, что при угле падения 45° угол преломления будет равен $27,8^\circ$. Непосредственное измерение на установке, с которой были получены исходные данные, дало значение $27,6^\circ$, что очень близко к графической оценке.

Далее напрашивается следующий вопрос: справедлив ли полученный график для любой пары сред или он относится только к прохождению света из воздуха в стекло? Для ответа на этот вопрос можно повторить опыт с другими средами. Штриховая линия на рис. 13.3 построена по данным измерений при прохождении света из воздуха в воду. Можно видеть, что при заданном угле падения угол преломления в воде всегда больше, чем в стекле. При прохождении же света из воздуха в воздух той же плотности луч не преломляется, так что $r=i$. Это дает линейную зависимость с углом наклона прямой в 45° вместо загибающейся кривой. В общем, различным парам сред соответствуют различные графики зависимости r от i .

13.3. Показатель преломления. Закон Снеллиуса

Можно было бы привести серию аналогичных измерений для разнообразных сред и построить целый ряд графиков такого же типа, как на рис. 13.3. Атлас таких графиков был бы полезен при описании преломления света на границе любых двух исследованных сред. Но такой атлас был бы все же менее удобен, чем общий закон преломления света.

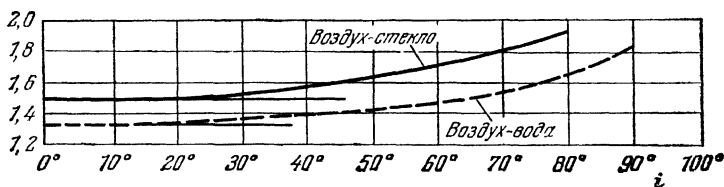


Рис. 13.4. Зависимость i/r от i .

Мы уже убедились, что зависимость $i/r = \text{const}$ не оправдывается для всех углов. Однако, как показывает рис. 13.4, для малых углов падения закон преломления заключается в том, что отношение i/r постоянно и равно около 1,5 для стекла и 1,33 для воды. При больших углах постоянство нарушается и отношение i/r возрастает.

Один из способов отыскания удобного выражения зависимости r от i заключается в подборе простых функций от i и r , отношение которых сохраняется при всех углах. Следуя этому плану, мы должны искать такие функции, которые пропорциональны самим углам, когда они малы, и компенсируют рост отношения i/r , когда углы становятся большими. Мы не могли бы утверждать заранее, что такие функции существуют; действительно, данные о преломлении света были хорошо известны еще Птолемею и затем использовались в течение целого тысячелетия, прежде чем был сформулирован простой закон преломления. Только в 1621 г. Виллеброрд Снеллиус

дал изящную формулировку зависимости между i и r . Та же самая зависимость была опубликована в 1638 г. Декартом в той форме, в которой мы теперь ею пользуемся.

Открытие Снеллиуса и Декарта можно пояснить рис. 13.5. Луч, идущий слева сверху, входит в стекло в точке P , где он и преломляется. В плоскости прохождения лучей проведена окружность с центром в P ; проведена также нормаль BP к поверхности стекла. Длины дуг AB и ED пропорциональны углам i и r :

$$i/r = AB/ED.$$

Это и есть отношение, отложенное по оси ординат на рис. 13.4, которое почти постоянно при малых, но не при больших углах.

По существу работа Снеллиуса и Декарта свелась к попытке связать i и r путем рассмотрения отношения полухорд AC и FD .

Иначе говоря, вместо AB/ED они вычисляли отношение AC/FD для широкого диапазона углов. Для малых углов это отношение не отличается от i/r , так как хорды и дуги малых углов почти одинаковы, но для больших углов длины хорд и дуг существенно различаются, так что отношение хорд и дуг изменяется по-разному. Рассмотрим отношение полухорд по экспериментальным данным, полученным для стекла (табл. 13.1). Значения отношения AC/FD могут быть найдены измерением полухорд для различных углов падения по схеме, изображенной на рис. 13.5. Схемы такого типа могут быть построены на основании таблицы экспериментальных результатов, в которую занесены измеренные значения углов i и r . Измерение полухорд и вычисление их отношений дают результаты, приведенные в табл. 13.2.

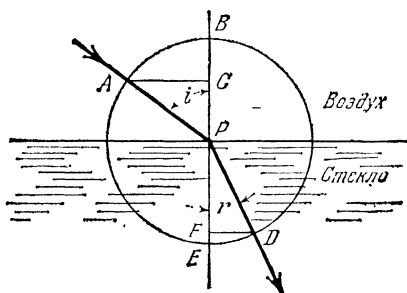


Рис. 13.5. Геометрическое построение, приводящее к закону Снеллиуса.

ТАБЛИЦА 13.2

Отношение полухорд при преломлении света в стекле
(см. рис. 13.5)

i°	AC , см	r°	FD , см	AC/FD	i°	AC , см	r°	FD , см	AC/FD
10	3,47	6,7	2,3	1,5	50	15,32	30,7	10,2	1,50
20	6,84	13,3	4,60	1,49	60	17,32	35,1	11,5	1,51
30	10,00	19,6	6,71	1,49	70	18,79	38,6	12,5	1,50
40	12,83	25,2	8,52	1,51	80	19,69	40,6	13,02	1,51

Наши измерения i , r , AC и FD не являются абсолютно точными. Действительно, последние цифры во всех числах вызывают

некоторое сомнение. Но значения AC/FD почти одинаковы при всех углах падения; очень вероятно, что отношение AC/FD постоянно. Значение этого постоянного отношения для использованного сорта стекла явно заключается между 1,49 и 1,51 — вероятно, очень близко к 1,50. Если предположить, что мы действительно имеем дело с постоянной величиной, и, в соответствии с нашими данными,

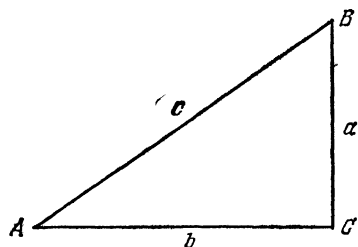


Рис. 13.6. Синусом угла A называется величина a/c .

принять эту постоянную равной 1,50, то получается хорошее согласие со всеми нашими отдельными измерениями. Все они, в пределах точности отсчетов, согласуются со значением 1,50. Более точные измерения, с меньшими возможными ошибками отсчетов, подтверждают вывод, что искомая постоянная равна 1,50.

Рассматриваемое отношение можно выразить через величины, называемые синусами углов. В прямоугольном треугольнике на рис. 13.6 синус каждого из острых углов определяется как отношение противолежащего катета к гипотенузе треугольника:

$$\sin A = a/c.$$

Синусы всех углов приводятся в таблицах. Возвращаясь к рис. 13.5, мы видим, что

$$\sin i = AC/AP \quad \text{и} \quad \sin r = FD/PD.$$

Так как AP и PD являются радиусами одной и той же окружности, можно выразить $\sin r$ как FD/AP , откуда

$$\sin i / \sin r = (AC/AP) / (FD/AP) = AC/FD.$$

Итак, отношение синусов углов падения и преломления равно отношению соответствующих полухорд. Это отношение равно той постоянной, которая была найдена выше. Таким образом, при переходе света из воздуха в стекло

$$\sin i / \sin r = 1,50$$

в согласии с нашими опытами. Поскольку синусы всех углов могут быть найдены в таблицах, подобная форма записи наших результатов обычно удобнее, чем использование отношения AC/FD . При такой записи нет надобности строить и измерять полухорды на серии схем; достаточно находить значения синусов в таблице.

Использование синусов углов i и r вместо самих углов позволило решить задачу подбора такой функции, которая оставалась бы постоянной при больших углах, как и при малых. Решение этой задачи привело к установлению простого закона преломления, описывающего прохождение света из воздуха в стекло при любых углах падения.

Напрашивается следующий вопрос: будет ли отношение $\sin i / \sin r$ постоянным также при прохождении света из воздуха в какую-либо другую среду? Для многих веществ опыт отвечает «да». Например, для воды отношение $\sin i / \sin r$ постоянно и равно 1,33. Можно было бы даже заранее ожидать этой величины, так как при малых углах падения отношение i/r также равно этой величине, а при малых углах отношения углов и их синусов почти равны (см. рис. 13.4). Для других веществ отношение $\sin i / \sin r$ имеет другие значения. Для каждого вещества это отношение является неотъемлемым свойством — таким, как его температура кипения или плавления. Эта величина может быть полезной для выяснения, с каким веществом мы имеем дело. Рассматриваемое отношение называется *показателем преломления* вещества, или, точнее говоря, показателем преломления вещества относительно воздуха. Показатели преломления некоторых веществ приведены в табл. 13.3.

ТАБЛИЦА 13.3

Показатели преломления некоторых веществ

Вещество	Показатель преломления	Вещество	Показатель преломления
Стекло *)	1,5—1,9	Глицерин	1,47
Алмаз	2,42	Этиловый спирт	1,36
Плавленый кварц	1,46	Олеиновая кислота	1,46
Кристаллический кварц	1,54	Вода	1,33

*) Показатель преломления стекла зависит от его состава. Большинство обычных сортов стекол имеет показатели преломления, несколько превышающие 1,5.

Закон постоянства величины $\sin i / \sin r$ для всех углов падения называется законом Снеллиуса *). Он в огромной степени упрощает описание явления преломления света. Если нас интересует, как преломится свет при вхождении в ту или иную среду из воздуха, достаточно знать показатель преломления среды. Значения показателей преломления важнейших сред могут поместиться на одной странице и заменить многочисленные книги, заполненные графиками типа рис. 13.3. Кроме того, когда в гл. 14 мы приступим к построению теории или модели света, мы будем располагать общим законом поведения света (в виде закона преломления), который теория должна будет объяснить. Любую придуманную модель света можно будет испытать, выясняя вопрос, объясняет ли она второй закон преломления — закон Снеллиуса.

*) Или вторым законом преломления света, а иногда просто законом преломления света. (Прим. ред.)

13.4. Абсолютный показатель преломления

Заметим, что все приведенные выше фотоснимки преломления света относятся к свету, идущему из *воздуха* в стекло, воду и т. д. Каков будет показатель преломления для света, идущего из *вакуума* в стекло? При ограниченной точности, которую допускает экспериментальное оборудование, мы не заметили бы никакой разницы; для показателя преломления результат получился бы прежним. Это можно приписать очень малой плотности воздуха. Однако при высокой точности измерений можно обнаружить, что показатель преломления стекла на границе с вакуумом все же несколько больше, чем на границе с воздухом. Для образца стекла с показателем 1,50000 относительно воздуха показатель преломления относительно вакуума равен 1,50044.

Показатель преломления вещества относительно вакуума называется абсолютным показателем преломления. Но показатели преломления относительно воздуха настолько близки к абсолютным, что в большинстве случаев нет надобности их различать.

13.5. Прохождение света из стекла (или воды) в воздух. Обратимость хода лучей

До сих пор мы концентрировали свое внимание на прохождении света в стекло или какое-нибудь другое вещество из воздуха. Исследуем теперь прохождение света в обратном направлении, например из стекла в воздух.

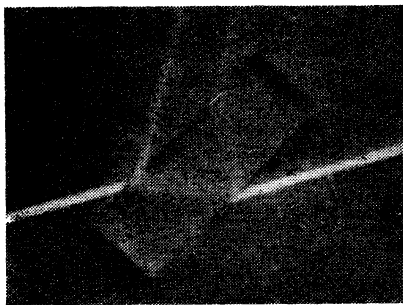


Рис. 13.7. Прохождение света через стеклянный брусок с параллельными гранями

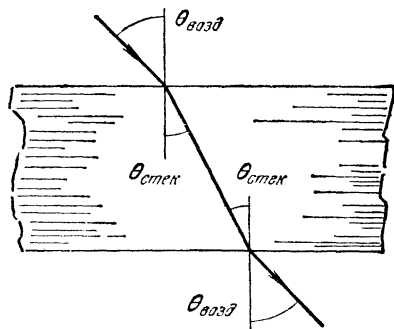


Рис. 13.8. Соотношение углов при прохождении света сквозь брусок с параллельными гранями

Нам уже известно, что при падении света по нормали проходящий свет идет без преломления. Чтобы выяснить, что происходит, когда свет подходит из стекла к воздуху под косым углом, можно воспользоваться стеклянным бруском с параллельными гранями. Как видно из рис. 13.7, параллельный пучок света, падающий на одну грань, выходит из стекла на другой грани, распространяясь параллельно входящему лучу. Следовательно, преломление при выходе из стекла в воздух в точности равно и противоположно преломлению, происходящему при входе луча из воздуха в стекло.

Этот случай иллюстрируется также схемой хода лучей, построенной на рис. 13.8. Здесь стрелки указывают направление распространения света. При прохождении света из воздуха в стекло угол падения равен $\theta_{\text{возд}}$, а угол преломления $\theta_{\text{стек}}$. Эти два угла связаны законом Снеллиуса

$$\sin \theta_{\text{возд}} / \sin \theta_{\text{стек}} = n_{\text{стек}},$$

где $n_{\text{стек}}$ — показатель преломления для света, проходящего из воздуха в стекло (что с очень большой точностью равно абсолютному показателю преломления стекла). При подходе света ко второй грани, на которой он выходит из стекла в воздух, он падает на грань под углом $\theta_{\text{стек}}$, так как грани параллельны друг другу. Кроме того, известно из опыта, что луч, выходящий из стекла, в данном случае параллелен лучу, входящему в стекло; а так как нормали на обеих гранях параллельны друг другу, два угла, образуемых лучами с нормалью в воздухе, также равны друг другу. Таким образом, лучи выходят из стекла в воздух под тем же углом $\theta_{\text{возд}}$, под которым подходят к стеклу. Из всего этого следует, что при выходе из стекла в воздух углы падения и преломления связаны соотношением

$$\sin i / \sin r = \sin \theta_{\text{стек}} / \sin \theta_{\text{возд}} = 1/n_{\text{стек}}.$$

Это соотношение тоже выражает закон Снеллиуса, так как отношение $\sin i$ и $\sin r$ постоянно, но показатель преломления лучей, идущих из стекла в воздух, является величиной, обратной показателю преломления лучей, идущих в обратном направлении. Поскольку каждый из этих показателей преломления обратен другому, нет надобности пользоваться двумя показателями преломления: для лучей, идущих из воздуха в стекло, и для лучей, идущих в обратном направлении. Достаточно пользоваться одним показателем преломления для границы «воздух — стекло» и писать соотношение между углами в воздухе и стекле, независимо от направления луча, в виде

$$\sin \theta_{\text{возд}} = n_{\text{стек}} \sin \theta_{\text{стек}}.$$

Из опытов, в которых свет идет из других веществ в воздух, вытекает заключение, что закон Снеллиуса оправдывается одинаково точно при входе света в вещество и выходе из него. Поэтому удобно писать этот закон в следующем общем виде:

$$\sin \theta_{\text{возд}} = n_m \sin \theta_m,$$

где n_m — показатель преломления света на границе вещества m с воздухом, а θ_m — угол между нормалью к поверхности и лучом в веществе m . Символ m заменяет название вещества. Например, для света, идущего из воздуха в алмаз или из алмаза в воздух, следует писать: $\sin \theta_{\text{возд}} = n_{\text{алм}} \sin \theta_{\text{алм}} = 2,42 \sin \theta_{\text{алм}}$.

В общем соотношении $\sin \theta_{\text{возд}} = n_m \sin \theta_m$ заключена мысль, что ход лучей, подчиняющихся закону Снеллиуса, обратим. В этом отношении имеется полное сходство с ходом лучей при зеркальном

отражении (см. раздел 12.7). В этой обратимости легко убедиться на следующем опыте. Пусть один из экспериментаторов находится под водой, а другой в воздухе. Они смотрят друг другу в глаза, как показано на рис. 13.9. Можно воспользоваться общей формой закона Снеллиуса, чтобы описать ход лучей света, пересекающих поверхность воды:

$$\sin \theta_{\text{возд}} = 1,33 \sin \theta_{\text{вод}},$$

независимо от того, является ли углом падения угол $\theta_{\text{возд}}$ или угол $\theta_{\text{вод}}$; таким образом, луч света от глаза одного наблюдателя

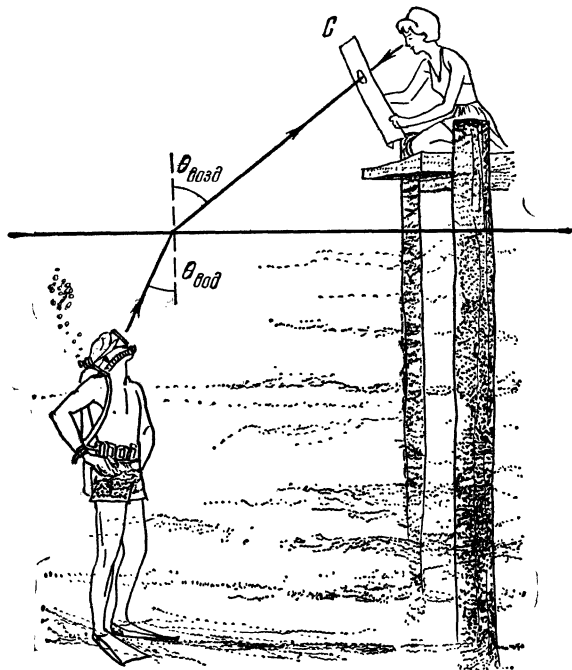


Рис. 13.9. Обратимость хода лучей.

к глазу второго пойдет по тому же пути, как и обратный луч. Теперь обратимся к проверке этого утверждения. Ставится экран (С на рис. 13.9) с небольшим круглым отверстием, через которое один из наблюдателей видит только один глаз другого наблюдателя. Оказывается, что и второй наблюдатель при этом видит смотрящий на него глаз первого наблюдателя. Многочисленные другие опыты подтверждают закон Снеллиуса и обратимость хода падающего и преломленного лучей.

13.6. Прохождение света из стекла в воду

Теперь можно предсказать, что произойдет при прохождении света из стекла в воду. Предположим, что между двумя параллельными поверхностями стекла и воды имеется слой воздуха, как пока-

зано на рис. 13.10. Тогда при выходе из стекла луч проходит в воздухе под углом $\theta_{\text{возд}}$, причем

$$\sin \theta_{\text{возд}} = n_{\text{стек}} \sin \theta_{\text{стек}}.$$

Затем он входит в воду и проходит в ней под углом $\theta_{\text{вод}}$, причем

$$\sin \theta_{\text{возд}} = n_{\text{вод}} \sin \theta_{\text{вод}}.$$

Из последних двух равенств следует

$$n_{\text{стек}} \sin \theta_{\text{стек}} = n_{\text{вод}} \sin \theta_{\text{вод}}.$$

Это равенство связывает $\theta_{\text{стек}}$ и $\theta_{\text{вод}}$ и не зависит от толщины слоя воздуха между стеклом и водой. Отсюда напрашивается предположение, что и в предельном случае, когда толщина слоя воздуха равна нулю, последнее соотношение остается в силе, т. е. оно остается в силе, когда стекло и вода соприкасаются непосредственно. Опыт подтверждает это. Более того, это соотношение справедливо не только для стекла и воды. В самом общем случае, для любых двух сред, подчиняющихся закону Снеллиуса, справедливо равенство

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

независимо от направления распространения света. Сама симметричность этого соотношения согласуется с обратимостью хода лучей через поверхность раздела, подчиняющегося закону Снеллиуса.

Может показаться, что переход от формулы $\sin i / \sin r = \text{const}$ к формуле $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ существенно изменяет закон Снеллиуса. Однако это неверно, в чем легко убедиться после небольшой перестановки членов последнего равенства. При переходе из среды 1 в среду 2 углом падения будет θ_1 , а углом преломления θ_2 . Поэтому общее уравнение может быть переписано в виде

$$\sin i / \sin r = \sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1.$$

Это равенство по-прежнему показывает, что отношение синусов углов падения и преломления есть величина постоянная, поскольку отношение n_2/n_1 постоянно для данных двух сред. Это отношение называется *относительным показателем преломления* двух сред или показателем преломления света, проходящего из среды 1 в среду 2 *). Он нередко обозначается символом n_{12} (читается: $n_{\text{один, два}}$).

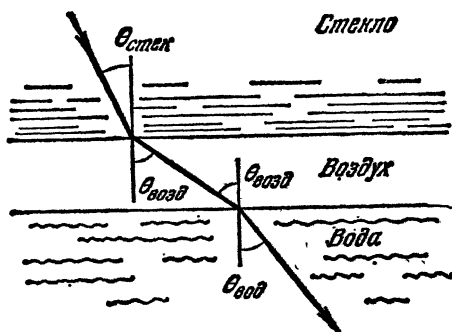


Рис. 13.10. Прохождение света из стекла в воду через слой воздуха.

*) Или показателем преломления среды 2 относительно среды 1. (Прим. ред.)

Таким образом, утверждение, что

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_{12},$$

приводит нас назад к первоначальной формулировке закона Снеллиуса. Кроме того, поскольку

$$n_{12} = n_2 / n_1,$$

можно выражать относительные показатели преломления через абсолютные показатели преломления для любой пары сред. Сравнительно немногочисленные абсолютные показатели преломления позволяют вычислить относительные показатели преломления для разнообразных комбинаций сред. Например, относительный показатель преломления для границы раздела «стекло — вода» равен

$$n_{\text{вод, стек}} = n_{\text{стек}} / n_{\text{вод}} = 1,50 / 1,33 = 1,13.$$

13.7. Полное внутреннее отражение

Применяя закон Снеллиуса ко всем случаям без разбора, мы можем очень скоро попасть в тупик. Затруднения могут возникнуть при попытках найти направление преломленного луча для света,

идущего из среды с более высоким показателем в среду с более низким показателем преломления. Рассмотрим, например, прохождение света из стекла, в котором $n=1,50$, в воздух при угле падения $41,8^\circ$. Синус этого угла равен 0,667. Синус угла преломления по закону Снеллиуса равен

$$\sin \theta_{\text{возд}} = n_{\text{стек}} \sin \theta_{\text{стек}},$$

откуда

$$\sin \theta_{\text{возд}} = 1,50 \cdot 0,667 = 1,00.$$

Когда $\sin \theta = 1$, $\theta = 90^\circ$; итак, $\theta_{\text{возд}} = 90^\circ$. Иными словами, преломленный луч выходит из стекла параллельно поверхности: он как раз скользит по по-

верхности. Такой угол является наибольшим возможным углом преломления. Что же получится, если луч упадет из стекла на границу воздуха под углом падения еще большим, чем $41,8^\circ$?

Попытаемся поставить опыт, отвечающий на этот вопрос. Подобный опыт можно осуществить посредством установки, изображенной на рис. 13.11, где несколько расходящихся лучей входят в стекло через левую грань стеклянной призмы. После преломления на этой грани они падают на верхнюю грань призмы под разными углами. Обратите внимание на то, что крайние правые лучи расходящегося пучка не дают преломленных лучей; вместо этого они пол-

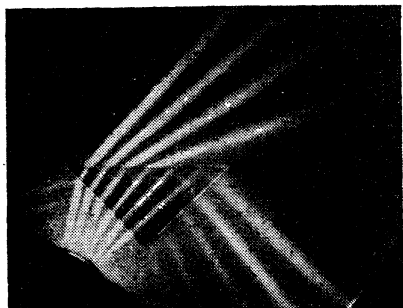


Рис. 13.11. Пучки световых лучей входят в призму слева снизу. Два крайних пучка, входящих в призму ближе к ее правой грани, испытывают полное внутреннее отражение на горизонтальной границе стекла с воздухом, остальные четыре пучка частично отражаются и частично преломляются на той же поверхности.

ностью отражаются обратно в стекло. Это явление известно под названием *полного внутреннего отражения*. Наименьший угол падения, при котором происходит полное внутреннее отражение, называется *предельным углом*. Если измерить углы падения для двух крайних правых лучей на рис. 13.11, можно убедиться, что они превышают $41,8^\circ$.

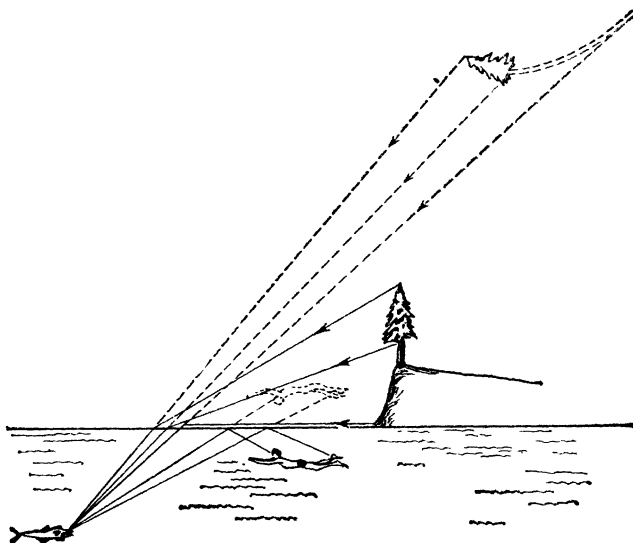


Рис. 13.12. Влияние преломления и полного внутреннего отражения света на изображения, видимые рыбой. Лучи света, исходящие от дерева, кажутся рыбе приходящими от мнимого изображения, расположенного в небе. Так как это изображение сильно удалено от рыбы, она может не замечать, что ствол вытянут вдаль своим нижним концом. Рыба почти не видит земли, так как земля кажется сжатой в очень узкое кольцо. (Изображения пловца и дерева построены путем проведения более одного луча от каждой точки предмета — от вершины дерева, от его основания и т. д. На рисунке же показано только по одному лучу от каждой точки.

Вообще для света, идущего из среды 1 в среду 2, как, например, на рис. 13.11, предельный угол в среде 1 имеет место при $\theta_2 = 90^\circ$. Тогда на основании закона Снеллиуса

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

получаем

$$n_1 \sin \theta_{\text{пр}} = n_2,$$

откуда

$$\sin \theta_{\text{пр}} = n_2/n_1,$$

где $\theta_{\text{пр}}$ — предельный угол на границе «стекло — воздух». Ясно, что полное внутреннее отражение может происходить лишь в тех случаях, когда n_1 превышает n_2 .

Может показаться странным, что свет внезапно перестает преломляться и полностью отражается, когда угол падения достигает предельного. Но в действительности здесь нет никакого внезапного изменения. Как можно видеть на рис. 13.11, по мере увеличения

угла падения все большая часть света отражается (отраженный луч становится ярче) и все меньшая часть преломляется (преломленный луч тускнеет); наконец, при достижении предельного угла яркость преломленного луча становится равной нулю, и весь свет отражается.

Иногда заставляют свет «огигать» углы по «проводам» благодаря полному внутреннему отражению. «Светопровод» — это гибкий прозрачный пластмассовый стержень. Свет входит в один конец изогнутого стержня почти по нормали к его поперечному сечению. В любом месте свет подходит к боковой поверхности стержня под углом, превышающим предельный угол, и потому не выходит наружу. Вместо этого последовательные полные внутренние отражения несут свет вдоль изогнутого стержня, и свет в конце концов выходит из дальнего конца светопровода.

Интересный пример полного внутреннего отражения может наблюдаться рыбами, смотрящими вверх через поверхность широкого пруда или озера при отсутствии волн на этой поверхности (рис. 13.12). Рыба видит деревья как бы нависшими над водой. Они окружены зеркальной поверхностью, отражающей дно и человека, плывущего под водой, так что он кажется рыбе плывущим где-то в воздухе.

13.8. Преломление в призмах. Дисперсия

При прохождении света через стеклянный брусок с параллельными гранями выходящие лучи параллельны лучам, падающим на брусок. Можно, однако, изменить направление лучей, воспользовавшись куском стекла с двумя непараллельными гранями (рис. 13.13).

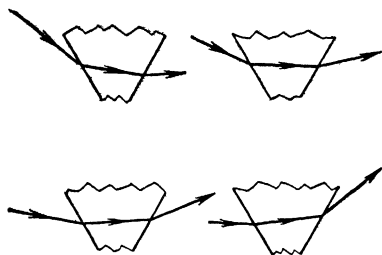


Рис. 13.13. Отклонение луча при прохождении через стеклянный брусок с непараллельными гранями.

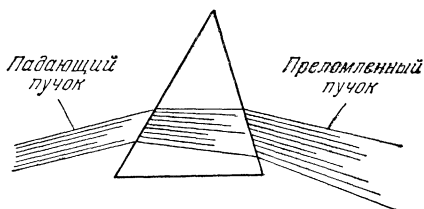


Рис. 13.14. Расхождение пучка лучей в результате прохождения через призму. (На рисунке расхождение преувеличено.)

Во всех случаях входа и выхода света через непараллельные грани свет выходит по новому направлению.

Более тщательное исследование показывает, что, даже если на призму падает параллельный пучок лучей, выходящий из нее пучок оказывается расходящимся (рис. 13.14). Чтобы исследовать это расхождение, которое на первый взгляд не согласуется с законами преломления, дадим возможность выходящим лучам пройти значительное расстояние от призмы и затем исследуем их. Воспользуемся очень узким параллельным падающим пучком, чтобы расхождение

ние было широким по сравнению с шириной начального пучка. Для этого можно воспользоваться простым устройством, изображенным на рис. 13.15, а. Свет от далекого белого источника, например от Солнца или от электрической лампочки накаливания, пропускается через узкую щель, прорезанную в непрозрачном экране. Эта щель пропускает узкий пучок лучей. На некотором расстоянии за призмой ставится другой экран. При этом оказывается, что свет,

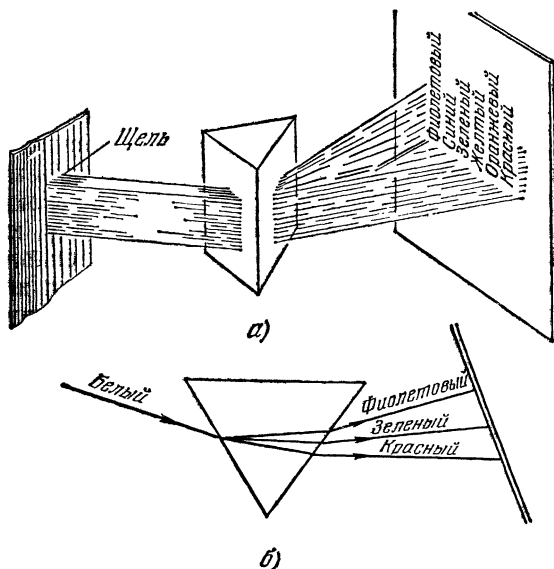


Рис. 13.15. Дисперсия белого света в призме с образованием цветного спектра.

падающий на второй экран, уже не является «белым». Вместо белой полосы на экране разворачивается целый спектр различных цветов: фиолетового, синего, зеленого, желтого, оранжевого и красного. Цвета имеют такие же оттенки, как в радуге, причем один конец спектра имеет красный цвет, а другой — фиолетовый. Красные лучи отклоняются от начального направления слабее всего, а фиолетовые — сильнее всего.

Отклонение, вызываемое призмой, зависит от угла между гранями, через которые проходит свет, от направления луча, падающего на первую грань, и от показателя преломления призмы. Из этих трех величин различаться для разных цветов может только показатель преломления. Это вынуждает нас пересмотреть некоторые упрощенные представления, связанные с нашими прежними экспериментами. Несмотря на наше прежнее заключение о возможности описать преломляющую способность каждого вещества одним числом (показателем преломления), теперь приходится признать, что показатель преломления, по-видимому, зависит от цвета! Очевидно, белый свет состоит из лучей различного цвета, причем материалы

вроде стекла имеют различные показатели преломления для разных цветов. Если это объяснение правильно, то разделение белого света на расходящиеся цветные лучи должно было бы обнаружиться в той или иной степени и в некоторых наших прежних опытах по преломлению света. И действительно, при внимательном наблюдении преломленного пучка можно заметить некоторое разделение пучка на цветные лучи в опытах, изображенных на рис. 13.2 и 13.7. Для этого в первом случае необходимо обследовать преломленные лучи на достаточно большом расстоянии от стеклянного полукруга, а во втором нужно воспользоваться достаточно толстым стеклянным бруском. В обоих случаях эффект усиливается при больших углах падения. Важно, однако, что эффект так или иначе существует. Он, по-видимому, действительно связан с самой природой показателя преломления, а не со свойствами призмы. Форма призмы позволяет лишь усиливать эффект и делает его доступным наблюдению.

При падении пучка лучей белого света на призму, как показано на рис. 13.15,б, фиолетовый свет отклоняется сильнее всего, а красный — слабее всего. Независимо от того, где и как проходит свет между воздухом и другой средой, закон Снеллиуса говорит, что отклонение луча в этой среде от его направления в воздухе тем сильнее, чем больше показатель преломления данной среды. Отсюда мы узнаем, что показатель преломления стекла больше для фиолетового света, чем для красного.

ТАБЛИЦА 13.4

Показатель преломления кронгласа

Цвет	Фиолетовый	Синий	Зеленый	Желтый	Оранжевый	Красный
Показатель преломления	1,532	1,528	1,519	1,517	1,514	1,513

В табл. 13.4 показана зависимость показателя преломления от цвета для одного из сортов стекла, используемых во многих линзах. Как видно из таблицы, разность показателей преломления для фиолетового и красного цветов составляет только 0,019, что лишь незначительно превышает 1% от среднего показателя преломления, равного 1,52. Не удивительно, что в наших опытах трудно было уловить столь слабое изменение. Если не интересоваться специально подобными цветовыми эффектами, можно во многих случаях производить вычисления, согласующиеся с опытом, исходя из предположения, что показатель преломления одинаков для всех цветов.

Развертывание света в спектр носит название *дисперсии*. Она впервые изучалась в XVII в. Декартом и Ньютоном. Ньютон, кроме того, пытался повторно разложить отдельную часть спектра, ставя призму на пути лучей определенного цвета, например красного. Все,

что при этом происходит, сводится к незначительному дальнейшему расхождению лучей, которые, однако, остаются красными (рис. 13.16, а). В отличие от начального белого света, красный свет не разветвляется в полный разноцветный спектр.

Вспомним, что не все источники света излучают свет всех цветов (см. раздел 7.8). Что будет видно на экране при пропускании желтого света натриевого пламени через узкую щель и далее через призму? На экране будет видно только желтое изображение щели. При широком разветвливании спектра будут выявляться новые

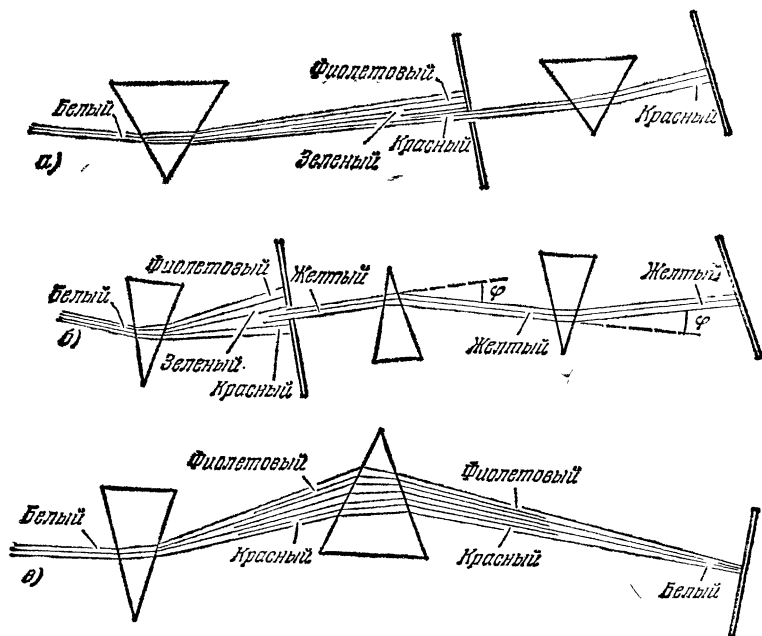


Рис. 13.16. Опыты с призмами. а) Свет одного спектрального цвета сохраняет этот цвет при повторном разложении другой призмой. б) Свет одного спектрального цвета отклоняется всегда на один и тот же угол при прохождении одинаковых путей в тождественных призмах. в) Смещение всех спектральных цветов дает белый свет.

подробности. Например, при достаточно сильной дисперсии это желтое изображение распадается на две яркие желтые линии (см. рис. 7.9). Но как бы мы ни расширяли эти желтые линии, мы не изменим их цвета и не выявим ничего, кроме, может быть, более тонких подробностей их строения. Отдельные спектральные цвета не могут быть разложены; в противоположность белому свету, они являются простыми и основными. В призме желтый свет будет отклоняться всегда одинаково: меньше, чем зеленый, и больше, чем красный (рис. 13.16, б), независимо от числа используемых призм. Цветно-слепой человек мог бы пользоваться степенью отклонения лучей для выяснения их цветов.

Наши замечания подтверждаются еще одним опытом Ньютона, доказывающим, что белый свет является комбинацией многих цветов. Вновь собрав спектральные цвета, Ньютон получил опять белый свет. Мы можем воспроизвести этот опыт, разлагая в спектр узкий пучок лучей с помощью призмы и затем помещая на пути цветных лучей другую призму, с большим углом между преломляющими гранями (рис. 13.16, в). Благодаря большему углу эта призма отклоняет лучи различных цветов сильнее, чем первая призма, так что пучок лучей вновь сходится. В некоторой области за второй призмой лучи различных цветов перекрещиваются, и в этой области свет на экране опять кажется белым. Таков был результат опыта Ньютона и таким же будет результат вашего опыта, если вы повторите этот опыт с двумя призмами — стеклянными или из прозрачной пластмассы.

13.9. Собирающее действие системы призм на лучи света

В гл. 12 было выяснено, что ход лучей света можно изменять зеркалами с неплоской поверхностью. Тела, выполняющие ту же задачу посредством преломления

вместо отражения, называются *линзами*. Чтобы понять принцип действия линзы, рассмотрим поведение света при прохождении через комбинацию стекол, из которых одно представляет собой плоскопараллельную пластину, а два других — трехгранные призмы (рис. 13.17, а). Если слева на такую систему падает параллельный пучок лучей, нормальный к вертикальным граням средней пластины, он будет вести себя, как показано на рис. 13.17, а. Свет, проходящий через центральную пластину, будет и дальше идти по прежнему направлению, так как угол падения равен 0° . Свет, падающий на верхнюю призму, отклонится вниз на угол, зависящий от преломляющего угла призмы и от ее показателя преломления. Подобным же образом свет,

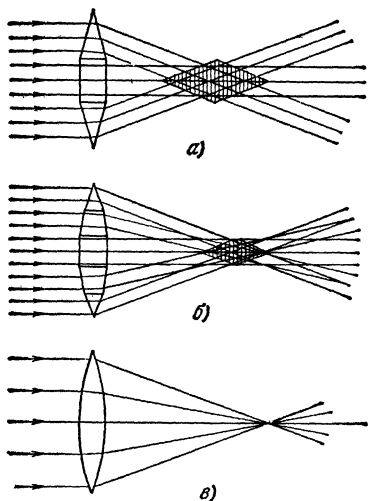


Рис. 13.17. Образование линзы из призм.

падающий на нижнюю призму, отклонится вверх. В результате образуется область, заштрихованная на рисунке, через которую проходит почти весь свет, падающий на пластину и призмы.

Схождение параллельного пучка лучей в ограниченную область под действием описанной системы напоминает собирающее действие соответствующей системы плоских зеркал (см. раздел 12.6). В случае зеркал мы уменьшали размеры области пересечения лучей путем увеличения числа зеркал и соответствующего уменьшения их разме-

ров. Используем тот же метод и здесь. На рис. 13.17, б показаны уменьшенные стекла, образующие почти такую же фигуру, как и на рис. 13.17, а, но размеры заштрихованной области явно уменьшились.

Продолжая тот же процесс замены усеченных призм более короткими усеченными призмами с меньшими преломляющими углами, мы будем все ближе подходить к форме стеклянного тела с плавными искривленными поверхностями, показанного на рис. 13.17, в. Это

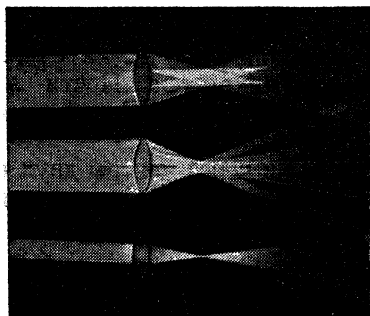


Рис. 13.18. Эксперимент, схема которого изображена на рис. 13.17.

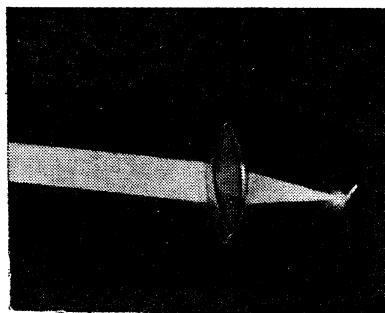


Рис. 13.19. Собирающее действие цилиндрической линзы, аналогичной линзе, изображенной на рис. 13.17, в. Свет собирается в фокус, имеющий вид прямой линии.

тело является пределом, достигаемым при неограниченном увеличении числа усеченных призм, подобно тому как параболическое зеркало (см. рис. 12.16) было пределом, достигнутым при неограниченном увеличении числа плоских зеркал, собирающих лучи параллельного пучка.

На рис. 13.18 показаны в действии реальные системы стекол, изготовленные и собранные согласно схеме рис. 13.17. Линза, изготовленная по принципу, описанному выше, собирает весь параллельный пучок в одну прямую линию, как показано на рис. 13.19.

13.10. Линзы

Последнее из описанных прозрачных тел называется цилиндрической линзой. Обратите внимание на то, что мы пока никак не определяли форму поверхностей линз, если не считать указания, что они получают неограниченным увеличением числа усеченных призм, оказывающих собирающее действие на свет. Можно доказать, что поверхности цилиндрических линз очень близки к поверхностям цилиндров круглого поперечного сечения. Иначе говоря, линии, изображающие поверхности на рис. 13.17, в, являются дугами окружностей. Различие между идеальными поверхностями и поверхностями круглых цилиндров очень мало, если соблюдаются два условия: 1) толщина линзы должна быть значительно меньше

ее ширины; 2) ширина линзы должна быть значительно меньше расстояния от линзы до линии, на которой сходятся параллельные лучи.

Цилиндрические линзы сводят свет от удаленного точечного источника в фокус, распределенный по линии. В большинстве случаев предпочтительно собирать свет

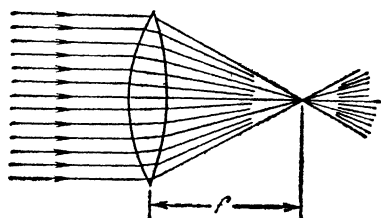


Рис. 13.20. Линза с поверхностями неодинаковых радиусов кривизны.

от точечного источника в точку вместо линии. Подобная фокусировка может осуществляться изготовлением линзы, поверхности которой искривляются одинаково во всех направлениях. Такими поверхностями являются участки сферических поверхностей. Почти все линзы ограничиваются сферическими поверхностями.

Прямая, проходящая через центр линзы и через центры двух ее сферических поверхностей, называется *осью линзы*. Точка на оси,

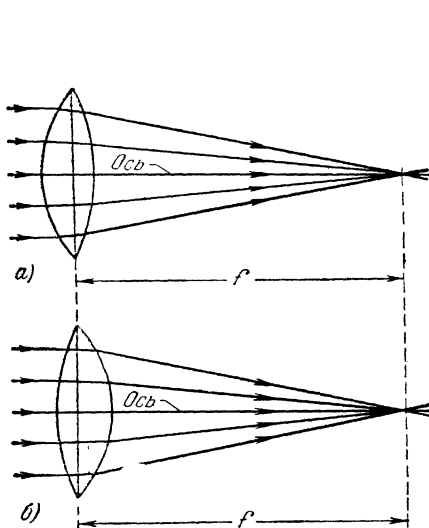


Рис. 13.21. Главные фокусы линзы. В случае тонких линз фокусное расстояние одинаково при падении лучей, параллельных оси, с более выпуклой (а) и с менее выпуклой (б) сторон линзы.

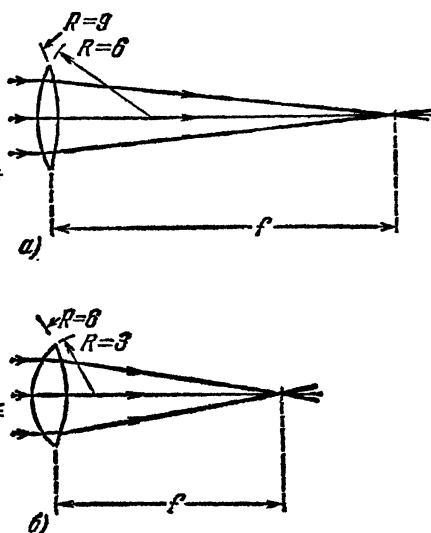


Рис. 13.22. Чем меньше радиусы кривизны поверхностей линзы, тем короче ее фокусное расстояние.

в которой сходятся (фокусируются) падающие на линзу лучи, параллельные ее оси, называется *главным фокусом* (F). Расстояние главного фокуса от центра линзы называется *фокусным расстоянием* (f).

Две поверхности линзы не всегда имеют одинаковый радиус. Например, линза, изображенная на рис. 13.20, имеет справа сферическую поверхность значительно большего радиуса, чем слева.

Если линза тонка по сравнению с ее фокусным расстоянием, то не имеет значения, с какой стороны на нее падает свет: фокусное расстояние в обоих случаях одинаково. Если сама линза симметрична, то симметричное расположение фокусов очевидно. Применимость же приведенного правила к несимметричным линзам легко доказывается следующим опытом. Используем тонкую несимметричную линзу для фокусировки солнечных лучей в одной точке на листе картона. После переворачивания линзы на 180° фокус получается на том же расстоянии от линзы (рис. 13.21).

Этот результат предсказывается также применением закона Снеллиуса, из которого находим $1/f = (n-1)(1/R_1 + 1/R_2)$, где R_1 и R_2 — радиусы противоположных сферических поверхностей, а n — относительный показатель преломления света, проходящего из произвольной среды в стекло. Написанная формула известна под названием «формула оптической силы тонкой линзы». Из этой формулы видно, что перемена местами R_1 и R_2 (равносыльная переворачиванию линзы на 180°) не влияет на вычисляемое значение f .

Кроме того, из этой формулы следует, что при малых R_1 и R_2 фокусное расстояние линзы мало. Это показано на рис. 13.22, на котором видно, что в линзе б) лучи загибаются сильнее, чем в линзе а), так что фокусное расстояние в линзе б) короче.

13.11. Действительные изображения, образуемые линзами

До сих пор наше внимание было сосредоточено на фокусировке линзами света, идущего от очень далеких источников, когда падающие лучи можно считать параллельными. При использовании линз на

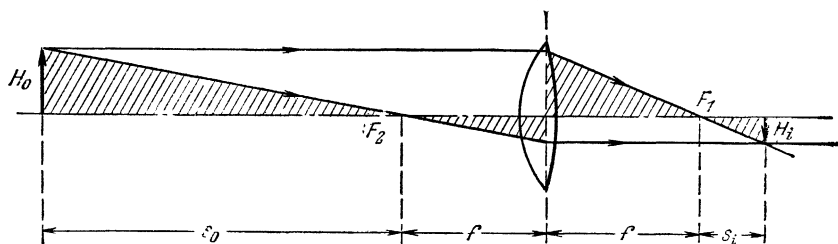


Рис. 13.23. Образование действительного изображения собирающей линзой.

практике нас обычно интересует свет, идущий от близких предметов, причем нам известно, что линзы образуют изображения и таких предметов. Положение изображений можно определять, основываясь на приобретенных нами сведениях о поведении первоначально параллельных лучей.

На рис. 13. 23 показаны линза, предмет высотой H_0 и его изображение высотой H_i . Чтобы найти положение изображения, нужно провести два главных луча, например из вершины предмета: луч, параллельный оси, и луч, проходящий через главный фокус F_2 . Луч, параллельный оси, преломляется линзой так, чтобы затем пройти через главный фокус F_1 . Мы также знаем, что лучи, идущие

справа параллельно оси, должны были бы отклоняться через главный фокус F_2 . Из обратимости хода лучей следует, что луч, выходящий слева из вершины H_0 через F_2 , должен идти за линзой параллельно оси. Все остальные лучи, выходящие из вершины H_0 , должны пересекаться около точки пересечения двух главных лучей, упомянутых выше. Таким образом, точка пересечения главных лучей H_i является действительным изображением вершины H_0 .

Можно было бы выбрать любую другую точку предмета и найти ее изображение тем же способом. Если бы это было сделано, то оказалось бы, что изображение H_i занимает положение, показанное на рис. 13.23.

Читатель, вероятно, заметил, что при проведении двух главных лучей не обращалось никакого внимания на их путь внутри линзы. На рисунках мы просто показываем излом лучей на линзе до нужного угла отклонения. Такое приближенное построение хода лучей вполне пригодно для наших целей, так как описанный способ нахождения главных фокусов достаточно точен только при условии, что толщина линзы в ее центре мала по сравнению с фокусным расстоянием. Поэтому наши построения достаточно точно описывают ход лучей в случае *тонких* линз. При построении хода лучей тонкие линзы можно рассматривать как очень тонкие круглые пластинки, перпендикулярные к оси.

Выпуклые линзы, подобно вогнутым параболическим зеркалам, фокусируют параллельные лучи в одну точку. Поэтому линзы подчиняются тому же уравнению, связывающему расстояние изображения с фокусным расстоянием и расстоянием предмета, что и зеркала:

$$s_0 s_i = f^2.$$

Вывод этого уравнения для выпуклых линз не отличается от соответствующего вывода для зеркал (см. раздел 12.9). Как и в случае зеркал, используются заштрихованные подобные треугольники, образуемые главными лучами, показанными на рис. 13.23. Рассматривая сначала заштрихованные подобные треугольники слева от линзы, находим пропорцию: $H_i/H_0 = f/s_0$. Заштрихованные треугольники справа от линзы дают: $H_i/H_0 = s_i/f$. Деля одно из этих уравнений на другое, получаем

$$s_0 s_i = f^2.$$

Пользуясь этим уравнением и схемой построения хода лучей, показанной на рис. 13.23, мы можем разбираться во многих оптических системах, состоящих как из отдельных линз, так и из их комбинаций. Можно находить расстояния предметов и изображений, определять увеличение, устанавливать характер изображения, т. е. будет ли оно действительным или мнимым, — короче говоря, можно определять для линз все то, что мы делали для неплоских зеркал.

Всевозможные оптические приборы — фотоаппараты, проекционные аппараты, зрительные трубы, микроскопы — состоят из комбинаций линз. Мы лишь едва коснулись этого вопроса, хотя проекти-

рованием и изготовлением подобных приборов и их деталей занимается целая область промышленности. Это — тонкая и сложная задача, несмотря на то, что она почти целиком опирается на один физический закон — закон преломления Снеллиуса.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

- 1*. Укажите угол падения и угол преломления на рис. 13.24. (Раздел 13.1).
- 2*. Сравните рис. 13.1 с фотоснимком б) на рис. 13.2. В каком из этих двух случаев свет преломляется сильнее? (Раздел 13.1.)
3. а) Нельзя ли объяснить, почему падающий луч, преломленный луч и нормаль, восстановленная в точке падения, лежат в одной плоскости?

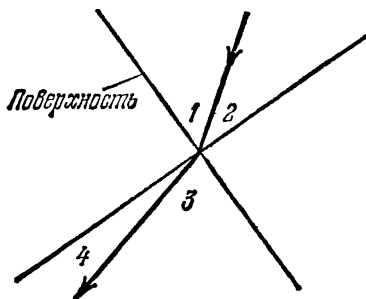


Рис. 13.24. К задаче 1*.

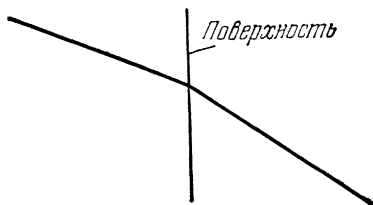


Рис. 13.25. К задаче 4*.

б) Можно ли представить себе преломляющее вещество, для которого это правило не будет соблюдаться?

4*. На рис. 13.25 показан световой луч, проходящий из воздуха в стекло. Где на рисунке стекло: справа или слева? (Раздел 13.2.)

5*. Какова приближенная зависимость между r и i на почти прямолинейном участке кривой (см. рис. 13.3), построенной для воды? (Раздел 13.2.)

6. а) Найдите синусы следующих углов: 4, 30, 45, 60, 73, 17,8, 37,3, 90°.

б) Какие углы имеют следующие синусы: 0,1045; 0,0000; 0,3090; 0,8660; 1,000; 0,5000; 0,5225; 0,9636?

в) Постройте график зависимости $\sin i$ от i в интервале углов от 0 до 90°.

7*. Найдите показатель преломления для света, проходящего из воздуха в вещество X (рис. 13.26). (Раздел 13.3.)

8*. Проверьте рис. 13.1. Соответствует ли ход падающего и преломленного лучей преломлению на границе воздуха с водой? Можно ли утверждать, что преломляющим веществом является здесь именно вода? (Раздел 13.3.)

9*. Какое из веществ, приведенных в табл. 13.3, сильнее всего преломляет свет, входящий в него при заданном угле падения? (Раздел 13.3.)

10. Прямоугольный сосуд глубиной 8 см наполнен до краев водой. Луч света входит в воду через ее верхнюю поверхность у самого края сосуда. После преломления этот луч падает на дно сосуда в 3 см от той же стенки.

- а) Найти синус угла преломления и сам угол преломления.
- б) Найти синус угла падения и сам угол падения луча при входе в воду.
- в) Предположим, что тот же сосуд наполнен другой жидкостью, причем для падения луча на дно на том же расстоянии (3 см) от стенки через ту же точку

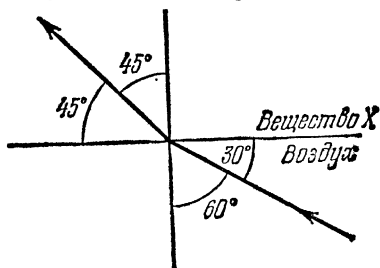


Рис. 13.26. К задаче 7*.

поверхности (у края сосуда) потребовался угол падения луча на воду, равный 31° . Найти показатель преломления этой жидкости.

11. Узкий параллельный пучок света падает на свободную поверхность воды в аквариуме под углом 40° . Преломленный луч продолжает свой путь до дна аквариума, где он падает на горизонтальное плоское зеркало, отражающее луч обратно до поверхности, где луч преломляется в воздух.

а) Найти угол между лучом, падающим на воду, и лучом, вышедшим из воды.

б) Если аквариум наполнен до высоты 10 см, каково расстояние между точками входа и выхода луча на свободной поверхности воды?

12*. Начертите схему к одному из фотоснимков на рис. 13.2, изобразив лучи со стрелками для случая, когда свет идет снизу вверх. (Раздел 13.5.)

13. Если изменить угол падения на рис. 13.7, сохранится ли параллельность лучей, изображенных в верхней части снимка?

14. Свет, излучаемый заходящим Солнцем, пересекает атмосферу по искривленной линии так, что Солнце кажется выше, чем оно есть на самом деле. Чем это объясняется? Поясните свой ответ чертежом.

15. Луна при своем движении заслоняет от нас те или иные звезды. Проведите сравнение между тем, что мы видим при прохождении Луны перед звездой, и тем, что мы видели бы при наличии у Луны атмосферы, аналогичной земной атмосфере.

16*. Что можно сказать о величине относительного показателя преломления для света, идущего из среды *A* в среду *B* на рис. 13.27? Будет ли он больше или меньше единицы? (Раздел 13.6.)

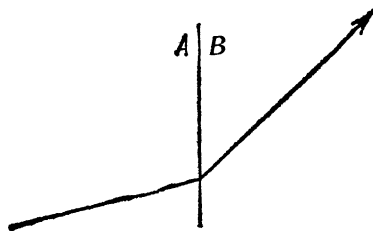


Рис. 13.27. К задаче 16*.

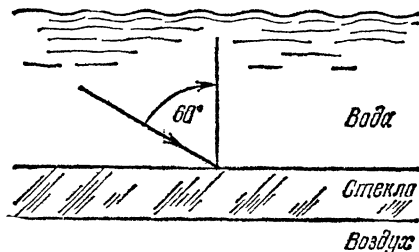


Рис. 13.28. К задаче 22.

17. Если относительный показатель преломления для света, идущего из стекла в алмаз, равен 1,61, а абсолютный показатель преломления стекла составляет 1,50, то чему равен абсолютный показатель преломления алмаза?

18. Если относительный показатель преломления для света, идущего из олеиновой кислоты в воду, равен 0,91, а абсолютный показатель преломления воды равен 1,33, то каков абсолютный показатель преломления олеиновой кислоты?

19. Что вы увидите, наблюдая кусок плавленого кварца, погруженный в олеиновую кислоту? (Воспользуйтесь данными табл. 13.3.)

20. Можно налить в сосуд сероуглерод, затем воду и сверху керосин, так как эти жидкости не смешиваются. На дне сосуда, содержащего эти три слоя одинаковой толщины, помещен источник света, посылающий плоскопараллельный пучок лучей вверх сквозь эти слои под начальным углом в 5° , считая от вертикали.

а) Найти угол преломления в воздухе луча, выходящего из керосина.

б) Пойдет ли луч в обратном направлении через керосин, воду и сероуглерод по тому же пути, по которому он шел вверх?

в) Пусть тот же сосуд наполнен только водой. Как это повлияет на угол преломления выходящего луча в воздухе?

21*. Найти предельный угол полного внутреннего отражения для света, идущего из стекла в воду. (Раздел 13.7.)

22. Постройте продолжение луча, показанного на рис. 13.28, включая его путь по выходе из стекла.

23. Сероуглерод (показатель преломления 1,63) налит в широкий сосуд до высоты 10 см, считая от дна. В центре дна сосуда помещен источник света очень

малых размеров. Найти площадь поверхности сероуглерода, через которую свет выходит наружу.

24*. Существуют светофильтры, пропускающие свет всех цветов, кроме зеленого. Другие светофильтры пропускают только красный свет. Проходящий свет в обоих случаях кажется глазу красным. Можно ли установить различие между проходящими в этих двух случаях лучами с помощью призмы? (Раздел 13.8.)

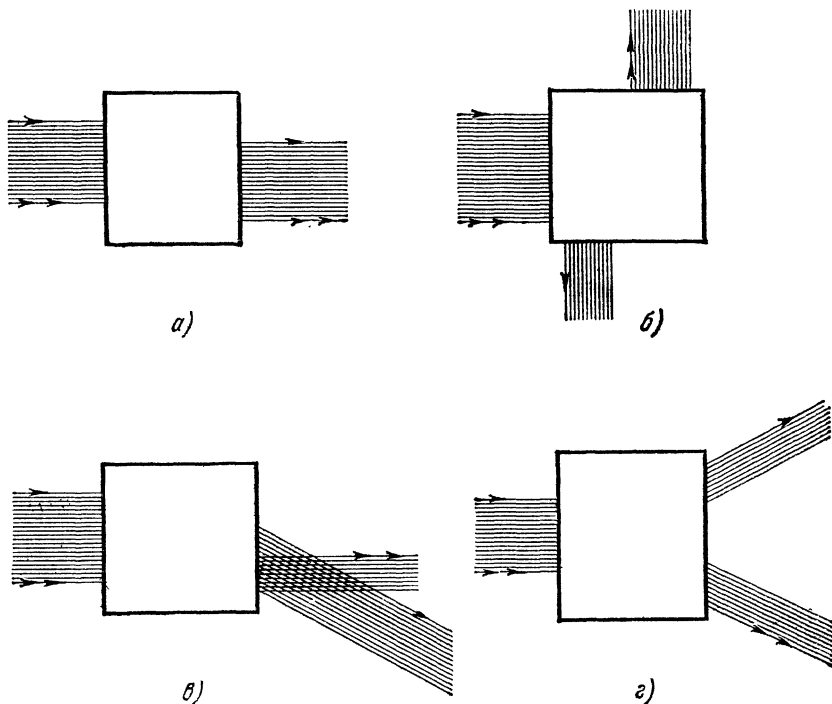


Рис. 13.29. К задаче 26.

25. Почему дисперсию легче наблюдать посредством призмы, нежели в установке, показанной на рис. 13.2?

26. На рис. 13.29 параллельный пучок монохроматических лучей входит в каждый ящик слева. Начертите схему того, что должно быть расположено в каждом ящике, чтобы выходящие лучи имели ход, показанный на рисунке. Одиночные и двойные стрелки на выходящих лучах соответствуют крайним лучам входящего пучка. Прямые без стрелок обозначают остальные лучи выходящих пучков.

27. Можно изготовить грубую собирающую линзу, приложив две трехгранные призмы с углами 30° , 60° и 90° к плоскопараллельной стеклянной пластинке, как показано на рис. 13.30.

а) Определите фокусное расстояние этой «линзы» с точностью до одной значащей цифры.

б) Образуется ли такая «линза» резкое изображение? Приведите обоснование вашего ответа.

28. Если две прямоугольные равнобедренные призмы с показателем преломления 1,50 сложить вместе, как показано на рис. 13.31, они не будут собирать в одну точку параллельные лучи. Почему? Что произойдет с лучами?

29*. Какое фокусное расстояние предсказывает формула тонкой линзы, показатель преломления которой очень близок к показателю преломления окружающей среды? (Раздел 13.10.)

30*. Какой вид примет формула тонкой линзы, если с одной стороны линза имеет плоскую грань? (Раздел 13.10.)

31. Линза (из стекла с показателем преломления 1,50) имеет в воздухе фокусное расстояние 20,0 см.

а) Будет ли ее фокусное расстояние в воде больше или меньше, чем в воздухе?

б) Каково будет ее фокусное расстояние в воде?

(Надо учесть, что преломление на каждой границе зависит от относительного показателя преломления.)

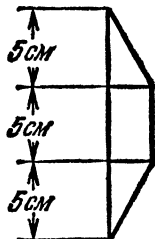


Рис. 13.30. К задаче 27.

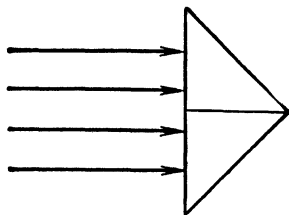
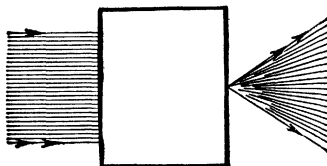
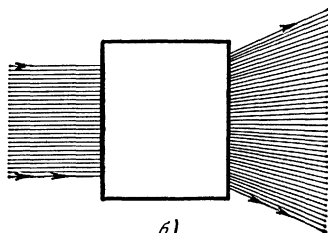


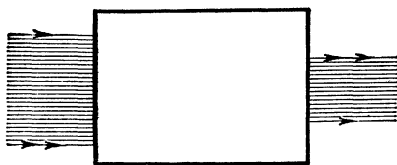
Рис. 13.31. К задаче 28.



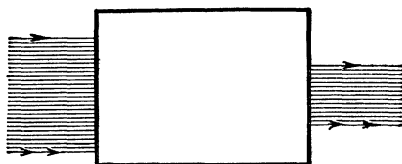
а)



б)



в)



г)

Рис. 13.32. К задаче 34.

32*. Предмет расположен на расстоянии 1 м от главного фокуса объектива фотоаппарата, перед этим фокусом. На каком расстоянии от заднего главного фокуса получится изображение позади этого фокуса, если фокусное расстояние линзы равно 5 см? (Раздел 13.11.)

33. Чему равно наименьшее расстояние между предметом и действительным изображением, образуемым собирающей линзой?

(Постройте график зависимости этого расстояния от расстояния предмета. За единицу длины примите фокусное расстояние f линзы.)

34. На рис. 13.32 параллельный пучок монохроматических лучей входит в ящики слева. Изобразите схему того, что должно находиться в каждом ящике, чтобы получился показанный на рисунке результат. Одиночные и двойные стрелки на выходящих лучах обозначают продолжения соответствующих падающих лучей.

Введение

В гл. 9 была построена молекулярная модель газа. Эта модель объяснила основные свойства газа и собрала их в единую логически связную систему. Попробуем теперь построить модель или теорию света, объясняющую уже знакомые нам свойства света. Как и модель газа, эта модель света поможет нам сделать выводы и предсказания, которые можно будет проверить дальнейшими экспериментами. При этом мы проследим идеи, развивавшиеся в течение нескольких столетий. Главным архитектором модели, рассматриваемой в этой главе, был Исаак Ньютон.

Мы уже видели, что источником света всегда является какое-нибудь светящееся тело и что свет в отсутствие препятствий распространяется прямолинейно. Поэтому всякая модель света должна включать нечто, что исходит из светящегося тела и движется по прямолинейному пути.

Проще всего представить себе, что это «нечто» есть некая корпускула — частица, подобная, скажем, теннисному мячу. Можно предположить, что светящееся тело испускает поток частиц. Вы можете опровергнуть эту модель на том основании, что теннисные мячи или другие частицы движутся не прямолинейно, а по криволинейным траекториям, приближающим их к земле. С другой стороны, мы знаем, что траектория теннисного мяча загибается к земле все меньше и меньше с ростом его скорости. Можно ожидать, что пути световых частиц, движущихся со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с, почти не будут загибаться под действием земного притяжения. Таким образом, корпускулярная модель не противоречит прямолинейности распространения света.

Нет сомнения, что световые частицы имеют мало общего с теннисными мячами. В частности, в противоположность этим последним, они не взаимодействуют друг с другом, как было выяснено в разделе 12.2. Это отсутствие взаимодействия можно приписать исключительно малым размерам световых частиц — настолько малым, что при взаимном пересечении даже двух ярких лучей света вероятность столкновения частиц одного луча с частицами другого чрезвычайно мала. Таково рассуждение, способное примирить отсутствие взаимодействия лучей света с нашей корпускулярной моделью. Таким образом, предполагаемые световые частицы

отличаются от теннисных мячей своей огромной скоростью и ничтожно малыми размерами. Не забывая об этом различии, можно попытаться предсказать свойства потоков световых частиц, изучая поведение таких частиц, как теннисные мячи или камешки.

14.1. Отражение

Нам уже известно, что при падении на поверхность свет отражается. Происходит ли то же самое со стальными шариками? Чтобы ответить на этот вопрос, достаточно просто бросать шарики из подшипников на различные поверхности. Шарики, брошенные на чистую, гладкую стальную пластинку, упорядоченно отскакивают под

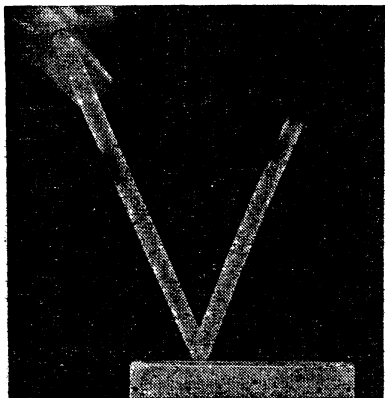


Рис. 14.1. Отражение шарика от стальной поверхности, сфотографированное при длительной экспозиции. Угол отражения равен углу падения.

углом отражения, приблизительно равным их углу падения (рис. 14.1). Их траектории падения и отражения проходят в плоскости, нормальной к отражающей поверхности. Скорость после отражения также приблизительно равна скорости до падения. Если же шарики или отражающая поверхность менее упруги, чем сталь, то отражение не происходит под тем же углом, как падение. Скорость шариков после отражения в таких случаях меньше, чем до падения,— в отличие от света, который не изменяет своей скорости при отражении.

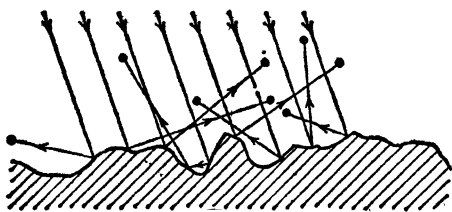


Рис. 14.2. Диффузное отражение частиц. Оно происходит, когда размеры неровностей превышают размеры частиц.

Таким образом, для объяснения зеркального отражения света на гладких поверхностях приходится предположить, что световые частицы отражаются, как идеальные шарики из подшипников, отскакивающие от упругих поверхностей. Итак, объяснение зеркального отражения света требует признания за световыми корпускулами (частицами) идеально упругих свойств; такие же свойства приходится приписать и всем отражающим поверхностям по отношению к отражению света.

Из всего сказанного следует, что наша корпускулярная модель света может вполне удовлетворительно объяснить зеркальное отражение

света. Но она способна также вскрыть причину того, что свет иногда отражается диффузно. Эта причина ясна из рис. 14.2. Каждая отдельная частица отскакивает, соблюдая равенство угла

отражения углу падения; но если поверхность шероховата, отраженные частицы отскакивают в разнообразных направлениях, так что в общем получается диффузное отражение. Напрашивается вопрос: насколько гладкой должна быть поверхность, чтобы суммарное отражение было зеркальным? Ответ заключается в том, что отдельные неровности поверхности должны быть малы по сравнению с размерами частиц. Поверхность может казаться совершенно гладкой, судя по отражению от нее подшипниковых шариков, но шероховатой, судя по отражению маленьких световых частиц. Отсюда ясно, почему металлические поверхности должны тщательно полироваться для превращения их в зеркала.

14.2. Преломление

Может ли наша корпускулярная модель объяснить преломление света, как и отражение? При преломлении частицы света при входе в новую среду изменяют свое направление на новое. Нельзя ли поставить опыт, в котором движущиеся стальные шарики отклоняются подобным же образом?

Пусть шарик катится по гладкой горизонтальной плоскости и затем скатывается по наклонной плоскости на горизонтальную плоскость, расположенную на более низком уровне, чем начальная плоскость. Пока шарик катится по верхней горизонтальной плоскости, он движется прямолинейно и равномерно. Эта верхняя плоскость соответствует, например, воздуху, в котором частица света движется тоже прямолинейно и равномерно. Когда шарик вступает на наклонную плоскость, он испытывает отклоняющее действие в направлении, перпендикулярном к границе этой плоскости. Таким образом, наклонная плоскость может моделировать пограничную область преломляющей среды, такой, например, как стекло. Можно предполагать, что в этой пограничной области частицы света получают толчок, направленный в сторону стекла перпендикулярно к его границе.

Чтобы узнать, что при этом происходит с частицей света, достаточно взглянуть на рис. 14.3, показывающий, что получается с шариком при скатывании по наклонной плоскости. На этом рисунке видно, что шарик ускоряется перпендикулярно к границе

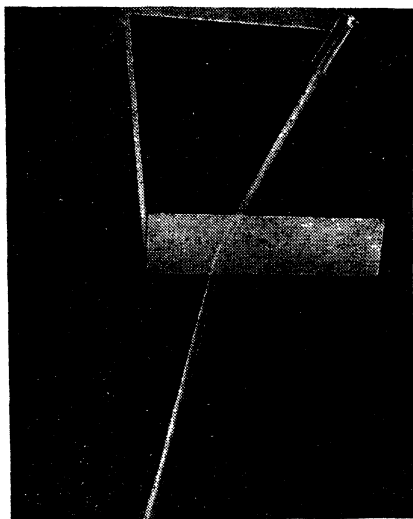


Рис. 14.3. Перекатывание шарика с одной горизонтальной плоскости на другую, более низкую. Сфотографировано при длительной экспозиции. Изменение направления шарика моделирует преломление света.

наклонной плоскости, так что направление его движения изменяется. Если шарик приближается под углом, то он откатывается от нижнего края этой наклонной плоскости по нижней горизонтальной плоскости уже по новому направлению, более близкому к нормали. Подобным же образом частица света, прошедшая через пограничную область, в которой она подталкивается в сторону преломляющего материала, должна ускориться и отклониться к нормали при входе в преломляющую среду. Нижняя горизонтальная плоскость, по которой катится шарик, соответствует внутренней области преломляющей среды. Здесь шарик опять движется прямолинейно и равномерно, как свет в стекле.

Модель с катящимся шариком может быть использована для исследования соотношения углов падения и преломления. Если преломление света вызвано подталкиванием при переходе извне в преломляющую среду, то соотношение углов в описанной шариковой модели должно распространяться и на преломление света. При постановке этого опыта на шариковой модели необходимо катить шарики по верхней плоскости всегда с одинаковой скоростью, так как в вакууме частицы света летят с постоянной скоростью. Измерения многочисленных пар углов на верхней и нижней плоскостях показывают, что преломление пути шарика всегда подчиняется закону Снеллиуса:

$$\sin \theta_v / \sin \theta_n = \text{const},$$

где θ_v — угол между направлением движения шарика на верхней горизонтальной плоскости и нормалью к ее краю, а θ_n — соответствующий угол на нижней горизонтальной плоскости. Более того, постоянная в законе Снеллиуса зависит от разности высот горизонтальных плоскостей и от скорости шариков. Чем больше разность высот этих плоскостей, тем больше показатель преломления; чем больше начальная скорость, тем меньше показатель преломления. Установив раз навсегда одну и ту же начальную скорость, можно плоскостями разных уровней моделировать среды с разными показателями преломления. Например, для моделирования преломления света, идущего из воздуха в воду, перепад уровней на наклонной плоскости должен быть меньше, чем при моделировании перехода света из воздуха в стекло. В каждом случае мы убеждаемся, что модель катящегося шарика подчиняется закону Снеллиуса; при этом, подбирая соответствующую разность высот, можно воспроизвести любой показатель преломления.

Рассматривая модель с катящимся шариком, мы не считаем, что свет состоит из катящихся шариков, скатывающихся под гору. Суть этой модели (выдвинутой Ньютоном для объяснения законов преломления) состоит в том, что преломление света можно объяснить, исходя из представления о толчке, испытываемом частицами света на поверхности каждой преломляющей среды. Это представление правдоподобно. В глубине куска стекла или другой преломляющей среды частица света окружена со всех сторон одним и тем же веществом.

Поэтому она не испытывает неуравновешенного толчка ни в каком направлении. Но на поверхности стекла положение совсем другое: вполне возможен толчок поперек границы раздела. Если это происходит аналогично толчку в модели с катящимся шариком, то преломление получает удовлетворительное объяснение.

Итак, до сих пор наша модель не встречает возражений. Поэтому рассмотрим ее глубже. С помощью стробоскопических снимков можно определить отношение скоростей шарика на верхнем и нижнем уровнях (рис. 14.4). Проанализировав многочисленные пути

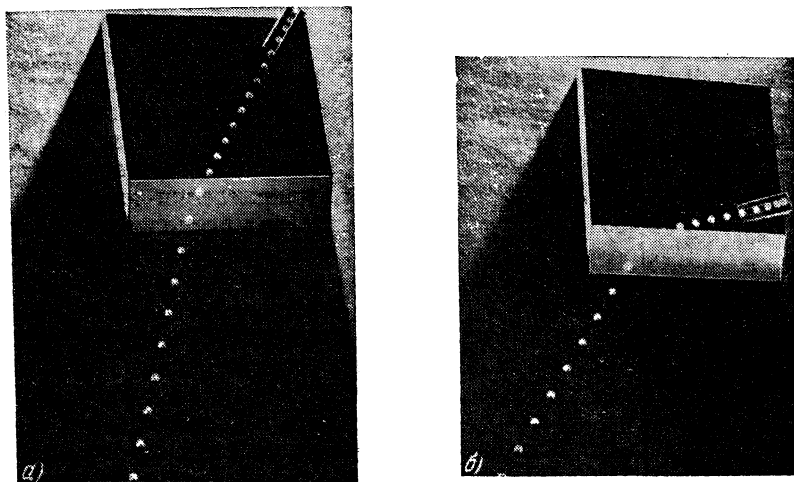


Рис. 14.4. Два стробоскопических снимка шарика, путь которого показан на рис. 14.3. Скорость качения по верхней плоскости одинакова на обоих снимках, так как шарик в обоих случаях скатывается на нее с одинаковой высоты. Заметьте, что скорости на нижней плоскости в обоих случаях также одинаковы, хотя углы «падения» на границу на двух снимках разные.

многих шариков, подкатывающихся к наклонной плоскости под разными углами, мы убеждаемся, что при постоянной скорости качения по верхней плоскости v_v шарик достигает всегда одинаковой скорости v_n на нижней плоскости. Угол «падения» на границу не влияет на v_n . Кроме того, как и при упругом зеркальном отражении шариков, составляющая скорости, направленная вдоль границы, не изменяется при преломлении. Изменяется только составляющая скорости, перпендикулярная к границе; при перекатывании на нижнюю горизонтальную плоскость, моделирующую преломляющую среду, эта составляющая скорости возрастает.

Приведенные данные о скоростях света в двух средах можно связать с законом Снеллиуса. Более того, из этих данных закон Снеллиуса может быть логически выведен. Составляющая скорости вдоль границы равна $v_v \sin \theta_v$ в верхней области и $v_n \sin \theta_n$ в

нижней области (рис. 14.5). Поскольку эта составляющая не изменяется при переходе из одной области в другую, можно написать

$$v_v \sin \theta_v = v_n \sin \theta_n.$$

Это и есть закон Снеллиуса, причем показатель преломления должен быть равен v_n/v_v . Пользуясь значениями скоростей v_v и v_n , измеренными стробоскопически, и непосредственно измеренными углами, мы можем произвести перекрестную проверку нашей модели.

Можно также заставить шарики перекатываться с нижней плоскости на верхнюю, придавая им начальную скорость v_n . Как и следовало ожидать, мы тогда убеждаемся, что все изменяется на обратное. Шарики попадают на верхнюю плоскость с приобретенной скоростью v_v , причем закон Снеллиуса остается в силе, как и для преломления света при изменении его направления на обратное.

Теперь мы располагаем корпускулярной моделью преломления света, и — как это всегда происходит при появлении новой модели — она наталкивает нас на разнообразные эксперименты. Например, из нашей модели следует, что скорость света в преломляющей среде не должна зависеть от угла падения и должна превышать скорость света в пустоте (вакууме). Это подсказывает необходимость измерить скорости света в различных преломляющих средах и, в частности, выяснить, согласуются ли они с соотношением

$$v/c = n,$$

где v — скорость света в преломляющей среде, c — скорость света

в пустоте и n — абсолютный показатель преломления среды. Подобные измерения будут рассмотрены в разделе 14.7. Следует также проверить то обстоятельство, что скорость света в пустоте не зависит от предшествующей истории пучка световых лучей. Согласно нашей модели, частица света должна замедляться при переходе из преломляющей среды в пустоту ровно на столько, на сколько она ускоряется при переходе из пустоты в данную преломляющую среду. Постоянство скорости света в пустоте, независимо от того, откуда в нее идет свет, является одним из условий правильности корпускулярной модели преломления света.

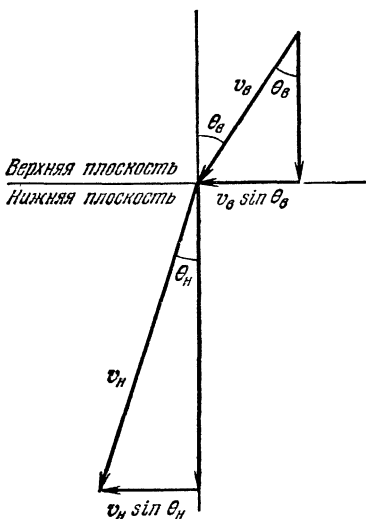


Рис. 14.5. Векторная диаграмма, поясняющая то, что происходит на рис. 14.3 и 14.4. Составляющие скорости $v_v \sin \theta_v$ и $v_n \sin \theta_n$, параллельные границе, равны.

14.3. Сила света источника и освещенность поверхности

Чтобы найти отношение расстояний до двух одинаковых звезд, мы использовали в гл. 4 закон обратных квадратов, связывающий освещенность E с расстоянием: $E=K/r^2$, где r — расстояние до источника света, а коэффициент K должен быть как-то связан с силой источника света. Исследуем теперь освещенность поверхностей и силу источников света несколько подробнее.

Для измерения освещенности поверхности можно воспользоваться фотоэлементом или какими-либо другими фотометрами, например из тех, которыми пользуются любители фотографии. В этих фотометрах обычно имеется указатель, передвигающийся по шкале. Более высокие показания по шкале соответствуют большей освещенности, судя по нашему зрительному ощущению; более низкие показания соответствуют более тусклому свету. Наша первая задача состоит в том, чтобы найти разумный способ градуировки фотометра, пользуясь какой-либо понятной нам шкалой.

Начнем с подбора ряда одинаковых источников света. Под словом «одинаковые» мы подразумеваем, что фотометр дает одинаковые показания, если поочередно помещать источники на постоянном заданном расстоянии r_0 прямо перед фотометром в помещении, которое в отсутствие испытуемого источника было бы совершенно темным и в котором стены не отражают света источника, будучи окрашены в черный цвет. Мы считаем, что одинаковые источники доставляют на чувствительный элемент фотометра одинаковые числа частиц в единицу времени, скажем, в секунду.

Корпускулярная теория света подсказывает, что при помещении двух одинаковых источников на одинаковом расстоянии r_0 от фотометра последний будет освещаться вдвое большим числом частиц света. И действительно, помещение определенного числа одинаковых ламп на расстоянии r_0 от фотометра всегда вызывает одинаковое показание фотометра, которое соответствует большей освещенности, чем от одной из этих ламп, поставленной в то же положение.

Начнем градуировку шкалы фотометра с нанесения на ней деления против указателя когда один из выбранных источников света находится в выбранном положении на выбранном расстоянии r_0 от фотометра. Поставим против этого деления цифру 1. Затем поставим цифру 2 против положения указателя при добавлении второго такого же источника, помещаемого туда же, где находится и первый. Затем можно сделать это для трех одинаковых источников и т. д. Теперь наш фотометр проградуирован на освещенности, кратные той, которая получалась от одного из одинаковых источников, помещенного против фотометра на расстоянии r_0 . При использовании того же фотометра для измерения освещенности от эталонного источника, помещенного на расстоянии, отличном от r_0 , наша шкала покажет, сколько наших эталонных источников нужно поместить перед фотометром на расстоянии r_0 , чтобы получить такую же освещенность. Предположим, что выбранное вначале расстояние r_0 вдоль нормали к чувствительной поверхности фотометра было

несоизмеримо велико по сравнению с размерами как электролампы, так и светочувствительной поверхности фотометра. Тогда можно взять один из эталонных источников и начать передвигать его по нормали к чувствительному элементу фотометра до расстояний, меньших r_0 . Таким путем можно выяснить, как изменяется освещенность чувствительного элемента фотометра при изменении расстояния r от источника до этого элемента. Результаты подобных измерений приведены в табл. 14.1.

ТАБЛИЦА 14.1

Освещенность поверхности на разных расстояниях от источника

$r, \text{ м}$	E	$E r^2$	$r, \text{ м}$	E	$E r^2$	$r, \text{ м}$	E	$E r^2$
1,20	1,0	1,4	0,60	4,3	1,5	0,30	17,7	1,6
1,00	1,5	1,5	0,50	5,4	1,4	0,25	23,5	1,5
0,80	2,3	1,5	0,40	8,5	1,4	0,20	33,3	1,3
0,70	3,2	1,6						

В третьем столбце приведено произведение освещенности на квадрат расстояния. Оно почти постоянно, как и следовало ожидать, если закон обратных квадратов верен. Данные табл. 14.1 нанесены на графике рис. 14.6. Полученный результат, т. е. обратная пропорциональность между освещенностью и квадратом расстояния от точечного источника, выражает именно то, чего мы должны были ожидать на основании корпускулярной теории света. Мы предполагаем, что освещенность прямо пропорциональна числу частиц, падающих на единицу площади в секунду. Из источника частицы летят по прямым линиям по всем направлениям, и мы считаем, что ни одна из них не теряется в пути. На расстоянии r от точечного источника частицы распределяются на сферической поверхности радиуса r и, следовательно, на площади $4\pi r^2$ (рис. 14.7). На расстоянии $2r$ от источника то же самое общее число частиц распределяется по площади $4\pi (2r)^2$ или $16\pi r^2$. Таким образом, число частиц на единицу площади на расстоянии $2r$ и, следовательно, освещенность на этом расстоянии, составляет только четвертую часть числа частиц на единицу площади (т. е. освещенности) на расстоянии r .

Только что приведенный теоретический вывод закона обратных квадратов совпадает с выводом, приведенным в гл. 4, но вместо неопределенного понятия количества света, пересекающего возрастающие площади, мы теперь говорим об определенном числе отдельных частиц света.

Когда источник и приемник световых частиц разделены расстоянием, малым по сравнению с их размерами, частицы света могут падать на поверхность приемника под разными углами вместо почти

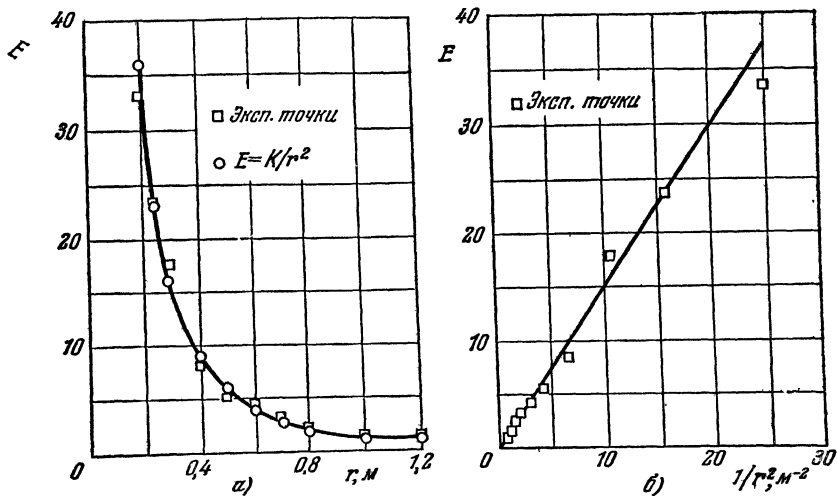


Рис. 14.6. Зависимость освещенности поверхности от расстояния до источника. а) Экспериментальные значения хорошо согласуются с точками, вычисленными по закону обратных квадратов. б) Освещенность в зависимости от $1/r^2$. Наблюдается близкое совпадение с линейной зависимостью.

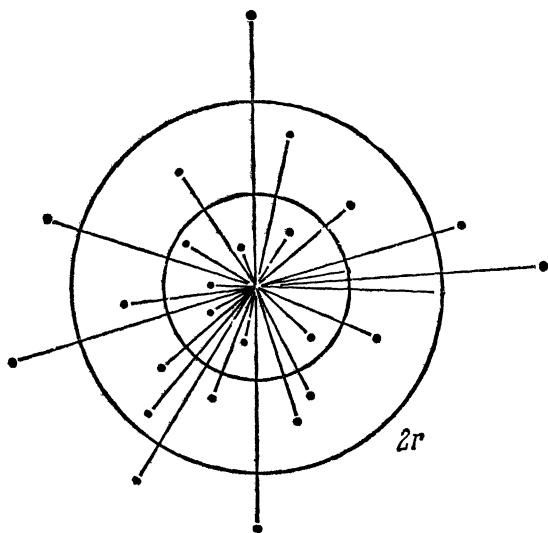


Рис. 14.7. Частицы, приходящиеся на площадь $4\pi r^2$ на расстоянии r от источника, приходятся на площадь $16\pi r^2$ на расстоянии $2r$. Поэтому освещенность на расстоянии $2r$ вчетверо меньше освещенности на расстоянии r от точечного источника.

параллельных линий, перпендикулярных к светочувствительной поверхности фотометра. Поэтому неудивительно, что при малых расстояниях между источником и измерителем освещенности наблюдаются большие отклонения от закона обратных квадратов.

Подобно общепринятым единицам длины и времени, наш эталонный источник может быть принят за произвольную единицу силы света источника. Силы света измерялись уже давно — настолько давно, что за единицу силы света была принята свеча. Прежнее определение свечи в англосаксонских странах заключалось в следующем: «это должна быть свеча толщиной 7/8 дюйма; она должна быть изготовлена из спермацета, сгорающего в количестве 120 гран в час». Если она удовлетворяет этим требованиям, то она должна светить одинаково ярко во Франции и на Аляске.

Разумеется, как это случилось и с другими стандартами, это определение впоследствии изменилось, но основной принцип остался прежним. Стандартная свеча в настоящее время определяется как сила света, проходящего через отверстие площадью в 5 мм², за которым расположено платиновое тело, нагретое до температуры плавления. Новая свеча может быть воспроизведена гораздо точнее старой, но остается открытым вопрос о том, не проще ли установить какой-либо другой стандарт для единицы силы света.

Единица освещенности в свою очередь зависит от стандартной свечи. В США за единицу принята футо-свеча, т. е. освещенность на расстоянии 1 фута от источника силой в 1 свечу *).

14.4. Давление света

Когда в нас попадает бейсбольный мяч или камень, мы испытываем толчок. Толчки, производимые ничтожно малыми молекулами, насакивающими на стенки сосуда или нашу кожу, обуславливают давление газа. К этому заключению мы пришли в гл. 9. Производят ли давление на зеркало падающие на него частицы света? Корпускулярная теория света подсказывает утвердительный ответ. К сожалению, рассмотренная до сих пор корпускулярная теория недостаточно уточнена, чтобы предсказать величину давления от данного потока частиц света. Мы, например, не знаем, какой поток энергии приносится одним моле световых частиц на 1 м².

Даже без таких углубленных сведений мы отлично знаем, что если давление света существует, то оно должно быть ничтожно мало в случае обычных световых лучей. Яркий свет, направленный на пушинку, даже не колышет ее. Опыты с самыми чувствительными приборами не смогли обнаружить светового давления до начала текущего столетия, когда П. Н. Лебедеву в России и затем Никольсу и Гуллиу в Америке удалось его измерить. Из их экспериментальных данных

*) В СССР утверждена единица освещенности, носящая название люкс (ГОСТ 7932-56). Ее можно определить как освещенность поверхности, на которую по нормали к ней падает свет от источника силой в 1 свечу, расположенного на расстоянии 1 м от освещаемой поверхности. (Прим. ред.)

известно, что давление ярких полуденных солнечных лучей примерно равно давлению мономолекулярного слоя олеиновой кислоты на горизонтальной поверхности воды. Это очень слабое давление, но не всякое световое давление так же мало. Опыты подтверждают предсказание корпускулярной теории о том, что световое давление должно возрастать с повышением освещенности. Например, на поверхности Солнца давление света на несколько десятичных порядков выше, чем на поверхности Земли, а на поверхностях некоторых звезд световое давление огромно.

14.5. Поглощение света и нагревание

Хороший отражатель света мало нагревается солнечными лучами, тогда как темная, интенсивно поглощающая поверхность сильно разогревается на Солнце. Грязь, сметаемая с тротуара вместе со снегом после снегопада, проваливается в снег в солнечный день. Темная грязь, являющаяся хорошим поглотителем, нагревается и вызывает таяние снега быстрее, чем на его чистой поверхности.

Можно ли объяснить это поведение с точки зрения корпускулярной модели? Когда частицы света не отражаются поверхностью и не проникают через нее внутрь, они должны останавливаться. Не нагревается ли всякое тело, бомбардируемое частицами, которые не проникают в него и не отскакивают назад? Легко прийти к выводу, что частицы в таких случаях нагревают тело, если мысленно заменить частицы молотком, а поглощающее тело — куском свинца. Подвергнув кусок свинца ряду быстро чередующихся ударов (заменяющих удары частиц о тело), мы обнаружим, что молоток не отскакивает (частицы не отражаются) и кусок свинца становится теплым. Чтобы проверить, что этот нагрев произойдет не при всякой бомбардировке частицами, повторим тот же опыт со стальным телом. Теперь при каждом ударе молоток будет отскакивать (происходит отражение), и сталь не нагревается. Если частицы света ведут себя как частицы всякого обычного вещества, то следует ожидать нагревания предметов, на поверхности которых они останавливаются. Таким образом, корпускулярная модель согласуется с наблюдаемым нагреванием веществ, поглощающих свет, и с тем обстоятельством, что вещества, отражающие или пропускающие весь падающий свет, не нагреваются им.

Поглощающие тела не всегда черны. Они отражают часть падающего света и могут частично его пропускать. Чтобы построить модель вещества, зеркально отражающего часть падающих на него частиц и поглощающего остальные частицы того же луча, можно представить себе, что данное вещество содержит мельчайшие области, останавливающие световые частицы, развивая при этом теплоту, и эти области перемешаны со включениями, отражающими свет и потому не порождающими теплоты. Даже наилучшие отражатели, подобные зеркалам, несколько нагреваются солнечным светом, откуда приходится заключить, что и поверхность зеркала должна содержать некоторое количество рассеянных на ней поглощающих

областей. Прозрачное вещество, например лист оконного стекла, должно также содержать некоторое количество поглощающих включений, поскольку наблюдается незначительное ослабление интенсивности света при установке такого листа на пути световых лучей. Кроме того, стекло при этом немного нагревается.

14.6. Некоторые трудности корпускулярной теории

Нам удалось построить корпускулярную модель, объясняющую зеркальное и диффузное отражения и приводящую к закону преломления Снеллиуса, а также к закону изменения освещенности обратно пропорционально квадрату расстояния. Эта модель, кроме того, наталкивает на мысль, что свет должен производить давление на препятствия и что поглощение света должно вызывать нагревание. Оба последних эффекта, которые мы ранее не обсуждали, подтверждаются экспериментами и могут служить примером того, насколько вообще могут быть полезны модели в смысле наталкивания нас на новые исследования. Модели систематизируют наши сведения по рассматриваемому вопросу, создавая общую картину, согласующуюся с экспериментальными данными. Они указывают на новые стороны вопроса, о которых мы не догадывались. Они дают ключ к пониманию того, что является неожиданным, так как, подобно световому давлению, во всяком явлении могут существовать неожиданные детали. Модель всегда может быть проверена путем сопоставления явлений природы с тем, о чем говорит модель.

До сих пор мы не встречали никаких затруднений с нашей моделью света. Но не существует ли каких-либо сторон в поведении света, которые бы плохо укладывались в нашу модель или даже противоречили ей?

Рассмотрим тщательнее, что происходит при преломлении света. Мы уже знаем, как объяснить с точки зрения корпускулярной модели отражение и преломление в отдельности. Но можем ли мы объяснить их одновременное возникновение при падении луча света на поверхность преломляющего материала? Чтобы вызвать зеркальное отражение, поверхность должна толкать частицы света в одном направлении; чтобы вызвать преломление, согласно нашей модели, поверхность должна толкать их в противоположном направлении. Каким образом поверхность решает, куда толкать? Над этим вопросом задумывался и Ньютон. Он пытался объяснить частичное отражение и частичное преломление света, приписывая частицам света свойства, периодически изменяющиеся с течением времени. Что именно происходит с той или иной частицей, зависит от момента времени, в который частица ударяется о поверхность.

Другая попытка объяснить разделение падающего светового луча на отраженный и преломленный могла бы быть основана на предположении, что поверхность состоит из мельчайших отражающих и преломляющих участков. Каждый из этих вариантов уточнения нашей модели годился бы для объяснения поставленного вопроса, если бы распределение света между отраженным и преломленным

потоками было при данной поверхности постоянным. Но беда в том, что отношение количества преломленного света к количеству отраженного уменьшается с ростом угла падения. Может быть, это противоречие и могло бы быть объяснено, но это сильно усложнило бы нашу модель. А когда приходится придумывать слишком много оговорок, мы начинаем относиться к модели с подозрением.

Гораздо более серьезная трудность возникает, когда мы пытаемся объяснить дифракцию. Трудно, например, найти корпускулярное объяснение сложной дифракционной картины, наблюдаемой при прохождении света через малое отверстие (см. рис. 11.10). Кроме того, как будет показано в следующем разделе, возникает трудность, связанная со скоростью света.

14.7. Скорость света и теория преломления

Согласно нашей корпускулярной теории, скорость v света в преломляющей среде должна превышать его скорость c в пустоте. В разделе 14.2 мы пришли к заключению, что $v = cn$, где n — абсолютный показатель преломления среды. Таков количественный вывод из описанной корпускулярной модели, который мы можем проверить, если сможем измерить скорость света на коротком пути, например в сосуде с водой.

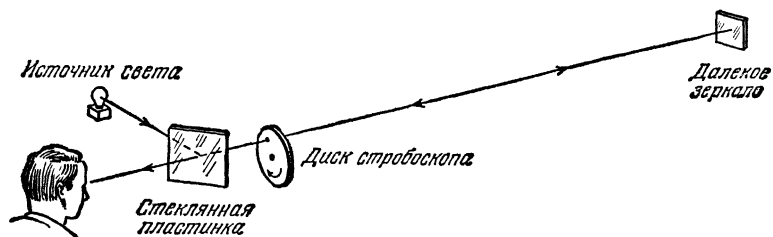


рис. 14.8. Определение скорости света посредством стробоскопа. Свет от источника отражается от стеклянной пластинки и направляется через отверстие стробоскопического диска на дальнее зеркало. Обратный импульс проходит через диск стробоскопа в глаз наблюдателя.

Во времена Ньютона такие измерения были невозможны. Первые успешные измерения скорости света на измеренном расстоянии в пределах земной поверхности были осуществлены Физо в 1849 г. Его метод измерения основан на том же принципе, что и стробоскоп. Представьте себе узкий пучок лучей, направленный на одно из отверстий диска стробоскопа. При вращении диска стробоскоп пропускает короткие импульсы света каждый раз, как одно из отверстий пересекает луч. Пусть эти импульсы падают на зеркало, отражающее их обратно на стробоскоп (рис. 14.8). На своем обратном пути импульс может пройти через отверстие диска только в том случае, если одно из отверстий окажется на пути луча.

Если диск стробоскопа имеет одно отверстие, то он должен совершить по меньшей мере один полный оборот за время прохождения света от диска до зеркала и обратно. Измерив скорость вращения диска, можно определить время прохождения светом удвоенного

расстояния между диском и зеркалом. Зная это расстояние и время его прохождения светом, легко определить скорость света.

Обычный стробоскоп, разумеется, не может вращаться с достаточной скоростью. Однако, спроектировав специальный скоростной стробоскоп с многочисленными отверстиями, Физо смог измерить скорость света в воздухе. Метод Физо постепенно совершенствовался другими физиками, в частности французским физиком Корню. Его стробоскоп имел 200 отверстий и скорость вращения до 54 000 об/мин.

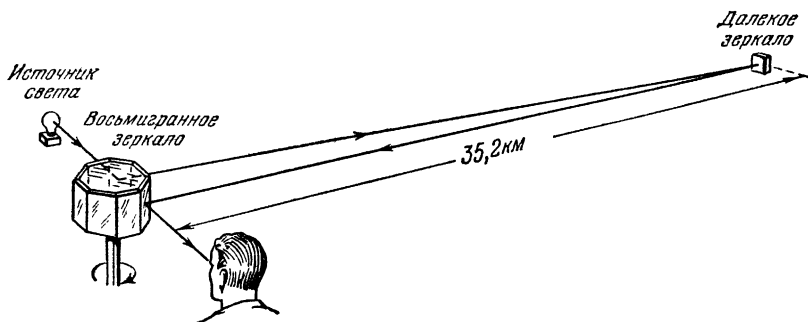


Рис. 14.9. Майкельсон отражал свет от вращающегося восьмигранного зеркала. С таким оборудованием он осуществил весьма точное измерение скорости света

При постоянном увеличении скорости стробоскопа от нуля до наибольшей Корню зарегистрировал 28 последовательных затмений и максимумов яркости света, возвращавшегося от зеркала, удаленного на 23 км. Пользуясь вращающимся многогранным зеркалом вместо вращающегося диска стробоскопа, Фуко во Франции и позже Майкельсон в Америке еще больше повысили точность этого метода (рис. 14.9). Майкельсону удалось определить скорость света с точностью приблизительно до 3 км/с (т. е. до 0,001%).

Для своих точных измерений Майкельсон использовал большое расстояние. Однако этот метод может применяться для измерения скорости света в жидкостях и при малых расстояниях, но с соответственно меньшей точностью. В 1862 г. Фуко измерил скорость света в воде и получил около $2,23 \cdot 10^8$ м/с. Это почти в точности три четверти скорости света в воздухе. Позже Майкельсон определил скорость света в сероуглероде (жидкости с показателем преломления 1,63), которая оказалась равной $1,71 \cdot 10^8$ м/с.

При сопоставлении с этими результатами наша корпускулярная модель буквально пасует. Для объяснения закона Снеллиуса нам приходилось принять, что скорость света в преломляющих средах выше, чем в вакууме. Исходя из модели Ньютона, мы получили соотношение $v_{\text{вод}} = n_{\text{вод}} c$. Следовательно, согласно этой модели, скорость света в воде должна была бы составлять $\frac{4}{3}$ скорости света в воздухе, а в сероуглероде — около $\frac{5}{3}$ скорости в воздухе. Измеренные же значения соответственно равны с большой точностью $\frac{3}{4}$ и $\frac{3}{5}$ скорости света в воздухе. Опыты не только не под-

твердили ожидаемых отношений скоростей, но даже дали обратные отношения. Таким образом, наша корпускулярная модель света как будто опровергается.

14.8. Роль корпускулярной модели

В этой главе мы попытались построить модель света, основанную на поведении частиц. Эта попытка была успешной, пока мы ограничивались рассмотрением лишь некоторых из известных нам световых явлений и пока мы не требовали точного количественного согласия между предсказаниями теории и экспериментальными результатами. Но как только мы коснулись всех световых явлений и занялись их количественным анализом, модель не выдержала во многих отношениях. Поскольку наша модель света оказалась несостоятельной, она должна быть или отброшена, или видоизменена.

Мы теперь оказались в положении, в которое физики часто попадают. Время от времени та или иная теория, успешно систематизирующая целую группу экспериментальных данных, оказывается неспособной объяснить новые наблюдения. Тогда приходится видоизменять теорию или отказываться от нее и начинать все сначала, пытаясь построить новую теорию. Однако почти во всех случаях можно утверждать, что усилия, затраченные в связи со старой моделью, не пропадают даром. Почти про всякую устаревшую теорию можно сказать, что она привела к двум достижениям: указала на существование закономерной связи между некоторыми наблюдениями и натолкнула на новые эксперименты. Корпускулярная картина света, которая на данной стадии представляется неудовлетворительной, сыграла очень важную роль в истории физики и до настоящего времени помогает понять световые явления. Нам придется еще раз вернуться к ней в части IV. Но до этого мы приступим к ознакомлению с другой моделью света.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

1*. Почему поверхность стола для игры в пинг-понг должна быть более гладкой, чем баскетбольная площадка? (Раздел 14.1.)

2. Рассмотрим ящик с идеально отражающими внутренними стенками, изобращенный на рис. 14.10. Чего следует ожидать при направлении светового пучка внутрь ящика? (Дайте ответ на основании корпускулярной модели света.)

3*. Если на установке, показанной на рис. 14.4, обеспечить постоянство скорости движения шарика по верхней плоскости, запуская его всегда одинаковым образом, то при каком угле падения на край этой плоскости получится наибольшая скорость движения шарика по нижней плоскости? (Раздел 14.2.)

4*. Что нового в отношении скорости света в среде предсказывает опыт, моделирующий преломление частиц, из того, что не выявилось в наших опытах по преломлению света? (Раздел 14.2.)

5. Показатель преломления сероуглерода близок к 1,63. Какова должна быть скорость света в этой жидкости согласно корпускулярной модели преломления, изложенной в разделе 14.2?

6. Скорость света, измеренная в некоторой среде, составляет $2 \cdot 10^8$ м/с.

а) Чему должен быть равен показатель преломления этой среды согласно корпускулярной теории света?

б) Используя значение показателя преломления, полученное в п. а), определите направление светового луча в этой среде, если он падает из воздуха под углом в 30° к нормали, проведенной к границе данной среды.

7. Время от времени во Вселенной происходит взрыв звезды, приводящий к образованию так называемых сверхновых звезд. Звезда внезапно становится во много раз ярче, чем раньше. Как вы уже знаете, звезды настолько далеки, что свет от

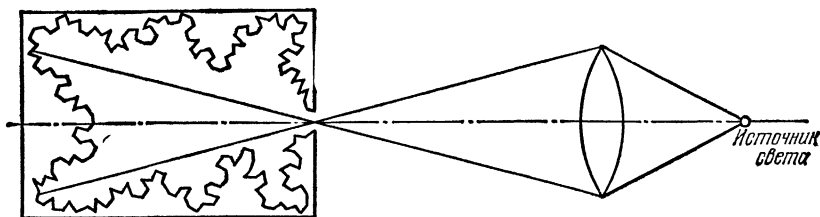


Рис. 14.10. К задаче 2.

них доходит до нас за много лет. Наблюдаемый взрыв должен происходить задолго до момента его регистрации. Свет от взрыва доходит как белое сияние, а не в виде лучей различных цветов, доходящих в разное время.

а) Какое вытекает заключение о скорости света разных цветов в вакууме?

б) Попробуйте сформулировать корпускулярное объяснение дисперсии в призме, согласующееся с постоянством скорости света в вакууме для всех цветов.

8*. Каким образом можно проверить одинаковость сил света нескольких источников? (Раздел 14.3.)

9*. Пусть фотометр дает показание, равное единице, когда он расположен на расстоянии l от лампочки. На каком расстоянии от того же источника фотометр будет давать отсчет в две единицы? (Раздел 14.3.)

10. Нельзя ли объяснить различие в силе света источников разностью размеров световых частиц? Как это согласовать с ослаблением освещенности поверхности при установке на пути лучей листа из частично поглощающего свет вещества? Нельзя ли объяснить с этой точки зрения уменьшение освещенности с ростом расстояния от источника?

11. Какие предположения лежат в основе применения закона обратных квадратов для определения расстояния до звезд? (См. раздел 4.3.)

12. Что предсказывает корпускулярная теория относительно освещенности, создаваемой предельно слабым источником света, излучающим лишь несколько световых частиц в секунду? Как вы могли бы проверить это предсказание?

13. Оказалось, что источник с силой света в 40 св, отстоящий от фотометра на 90 см, вызывает такое же показание указателя, как источник неизвестной силы, помещенный на расстоянии 36 см от фотометра.

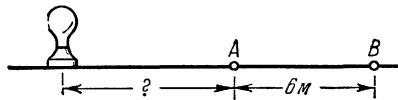


Рис. 14.11. К задаче 14*.

а) Определить силу света неизвестного источника.

б) Определить освещенность в люксах, отмечаемую фотометром.

14*. Если в точке A (рис. 14.11) освещенность равна 8 лк, а в точке B $1/2$ лк, на каком расстоянии (слева) от A должен быть расположен источник света? (Раздел 14.3.)

15. Фотометр, градуированный в люксах, находится на расстоянии 60 см от зеркала. Очень малый по размерам источник с силой света в 25 св расположен на полпути между ними. Каково показание фотометра, если зеркало является:

а) плоским;

б) вогнутым с диаметром 15 см и фокусным расстоянием 30 см?

16. В радиолокационной установке источник испускает пучок лучей. Часть этого излучения падает на удаленный объект (например самолет), отражается от

него и воспринимается по возвращении в точку отправления. Используемое излучение ведет себя как свет. Принимая, что источник излучения аналогичен точечному источнику света и что объект отражает излучение диффузно, нельзя ли прийти к заключению, что возвращающееся излучение по создаваемой им «освещенности» обратно пропорционально четвертой степени расстояния между источником и отражающим объектом?

17. На какую из поверхностей свет должен оказывать большее давление: на кусок прозрачного стекла или на зеркало?

18. Чувствительный термометр, помещенный в разных участках призматического спектра, показывает повышение температуры. Это доказывает, что энергия света всех цветов при поглощении преобразуется в теплоту. Но термометр показывает повышение температуры также и в неосвещенных областях за пределами спектра. Как это можно объяснить корпускулярной теорией?

19. Термометр помещен на пути луча света, исходящего от лампы; показание термометра сначала возрастает и затем устанавливается на 26°C . На пути луча помещен лист обычного оконного стекла; после этого показание термометра снизилось до 23°C .

а) Какие вытекают заключения о природе света, излучаемого лампой?

б) Упомянутое оконное стекло заменено стеклом корекс (см. раздел 11.5).

Больше или меньше 23°C будет показывать термометр? Больше или меньше 26°C ?

в) Можете ли вы ручаться за ответы в п. б) с одинаковой уверенностью?

20. Градуированный фотометр показывает, что одна стеклянная пластинка, загораживающая свет, пропускает 80% света от неподвижного источника.

а) Какая доля света будет пропущена двумя, тремя и т. д. (до десяти) такими же пластинками, сложенными вместе?

б) Постройте график: доля пропущенного света (в процентах) в зависимости от числа одинаковых пластинок, загораживающих источник.

в) Постройте график: логарифм доли пропущенного света F (в процентах) в зависимости от числа пластинок.

г) Сколько таких пластинок требуется для поглощения 90% света?

д) Подготовьтесь к обсуждению влияния отражения на точность результатов, полученных в пп. а) — г).

21*. Почему при очень медленном вращении диска стробоскопа, показанного на рис. 14.8, можно видеть свет через отверстие диска? (Раздел 14.7.)

22. Используя метод Физо в варианте, разработанном Корню (см. раздел 14.7), рассчитайте кратчайшее расстояние между вращающимся диском и зеркалом, при котором обратный луч будет проходить через отверстие, соседнее с тем, через которое он проходил к зеркалу.

23. В варианте метода Физо, предложенном Фуко и Майкельсоном, вращающийся диск заменен вращающимся многогранным зеркалом (рис. 14.9). Предполагая, что зеркало вращается с частотой 500 об/с и что расстояние от него до неподвижного зеркала равно 10 км, докажите, что каждая зеркальная грань поворачивается на 12° за время между двумя последовательными отражениями посланного луча и что, следовательно, угол между начальным направлением и направлением того же луча после повторного отражения равен 24° .

24. Можно было бы ожидать, что при каждом отражении скорость света немного уменьшается. Располагая подходящей установкой для измерения скорости света (см. раздел 14.7), опишите опыт, способный выяснить этот вопрос.

25. Нельзя ли видоизменить опыт (см. задачу 24) для проверки предположения о возможном уменьшении скорости света после преломления?

26. Допустим, что кто-нибудь рассматривает звук как воздействие на ухо посредством ударов ряда мельчайших шариков, последовательно испускаемых источником. Укажите факты, подтверждающие или опровергающие этот взгляд.

27. Мы упоминали, что частицы света должны быть крайне малыми. Придумайте опыт, с помощью которого можно установить, что их масса должна быть так же чрезвычайно малой.

28. Возможно ли, что замедление света при переходе из вакуума в прозрачную среду обусловлено чем-то вроде трения?

29*. Почему результаты измерения скорости света в воде порождают сомнение в правильности корпускулярной модели света? (Раздел 14.7.)

15.1. Волна как новая форма движения

В предыдущей главе мы уделили довольно много места корпускулярной модели света, основанной на предположении, что свет состоит из потока частиц. Было выяснено, что эта модель не может удовлетворительно объяснить некоторые из наблюдаемых световых явлений. Поэтому перед нами выбор: либо видоизменить корпускулярную модель так, чтобы она годилась в тех случаях, в которых она оказалась несостоятельной, либо пытаться искать новую модель, основанную на совершенно других представлениях. Испробуем второй подход.

Основное, что должно быть учтено во всякой модели света,— это то, что свет распространяется в пространстве. В поисках новой теории мы в первую очередь задаем себе вопрос, может ли что-либо, кроме частиц (или потока частиц), распространяться от точки к точке. На этот вопрос приходится ответить: да, может. Рассмотрим, например, что происходит, когда мы бросаем небольшой камень в пруд со спокойной поверхностью. От точки соприкосновения камня с поверхностью расходятся круги. Подобное возмущение называется *волной*. Если внимательно понаблюдать за поверхностью воды там, где волна по ней расходится, вы убедитесь, что хотя вода и колеблется, она не перемещается вместе с волной. Это ясно видно, если проследить движение кусочка дерева или небольшого масляного пятна по поверхности воды. При прохождении волны то и другое движется лишь вверх и вниз, но не перемещается с волной. Иными словами, волна может переместиться на большое расстояние, но как только возмущение прошло за пределы данного участка поверхности, каждая капля воды остается там, где она покоилась до возмущения.

Осмотревшись вокруг себя, мы найдем всевозможные примеры волн. Понаблюдаем, например, за флагом, реющим на ветру на своем флагштоке. Вдоль материи бегут волны, но отдельные ее участки лишь колеблются на своих местах при прохождении волн. Подобно тому, как вода не перемещается с водяными волнами, материя флага остается на месте после прохождения по ней волны.

Некоторые волны являются вполне или почти периодическими; движение частиц вещества повторяется много раз. Не всякие волны, однако, обладают этим свойством. Если, например, хлопнуть

дверью, ведущей в комнату, то воздух около двери внезапно сожмется, и это однократное короткое сжатие пошлет возмущение воздуха через всю комнату и в конце ее вызовет внезапное колебание занавески. Подобная кратковременная волна называется *волновым импульсом*.

А вот другой пример волнового импульса. Расположим полдюжины бильярдных шаров (годятся и пластмассовые крокетные шары) по одной линии так, что соседние шары касаются друг друга. Затем ударим крайний шар другим разогнанным шаром, направленным вдоль линии уложенной цепочки шаров. Тогда все шары цепочки остаются на месте, а противоположный крайний шар откатывается с такой же скоростью, с какой подкатывался ударяющий шар. По цепочке шаров от одного конца до другого проходит волновой импульс, подобный тому, который распространялся по поверхности воды или по флагу. Каждый шар претерпел возмущение; это возмущение прокатилось через всю их цепочку, но ни один из шаров не покинул своего места, кроме последнего.

Можно наблюдать другой тип волны. Назовем ее «пусковой волной». Понаблюдаем вереницу автомобилей, остановившихся при смене цвета светофора. Как можно скорее после смены красного цвета на зеленый водитель первой машины стартует. Через мгновение следующий водитель, видя, что первая машина тронулась, тоже стартует и т. д. Можно наблюдать, как пусковой импульс движется назад относительно уже движущейся колонны машин. Интересно, что пусковой импульс движется назад, хотя машины движутся вперед. Скорость движения этого импульса зависит от скорости реакции водителей и от скорости реакции машин на действия водителей. Если бы можно было отобрать водителей с тождественной скоростью их реакции и снабдить их автомашинами с совершенно одинаковым ускорением при старте, пусковой импульс двигался бы назад вдоль колонны машин с постоянной скоростью.

Что можно усмотреть общего между всеми приведенными примерами? В каждом случае возмущение распространяется по некоторой среде — по воде, полотну флага, цепочке бильярдных шаров или колонне автомашин. Но среда не движется вместе с ее возмущением. Распространение возмущений в среде и есть то, что мы называем волнами. Теперь мы в состоянии ответить на вопрос, поставленный в начале этого раздела: существует ли что-либо, кроме частиц, что может передвигаться от точки к точке? Из одного места в другое может перемещаться волна, т. е. то, что само по себе не является частицей.

15.2. Волны на спиральных пружинах

Ведут ли себя волны подобно свету? Прежде чем ответить на это, необходимо ознакомиться с ними подробнее. Когда мы изучим поведение волн, мы сможем сравнить его с известным нам поведением света и с другими сведениями о свете, с которыми мы позже позна-

комимся. Многообразие приведенных примеров волн говорит о том, что они сами по себе стоят того, чтобы их изучать.

Удобно начать исследование волн со спиральных пружин *). Рис. 15.1 изображает распространение волнового импульса вдоль пружины. Приведенные снимки (кинокадры) были получены киносъемочным аппаратом с интервалом в $\frac{1}{24}$ с между кадрами. Мы видим, что форма волнового импульса не изменяется при его перемещении. Не считая того, что импульс перемещается, форма импульса на всех кадрах совершенно одинакова. Кроме того, мы видим, что между двумя последовательными кадрами импульс перемещается всегда на одинаковую величину, т. е. он перемещается вдоль пружины с постоянной скоростью.

Пружина в целом не претерпевает остаточных изменений после прохождения волнового импульса. Посмотрим, однако, что происходит с произвольно выбранной точкой пружины при прохождении импульса. Чтобы было легче сосредоточить внимание на определенном витке, можно отметить его узелком из белой бечевки или ленточки, как показано на рис. 15.2. Если затем встряхнуть конец пружины, чтобы пустить по ней волновой импульс, то легко наблюдать смещения узелка. При этом мы убеждаемся, что при прохождении импульса узелок движется под прямым углом к оси пружины.

Другие точки пружины тоже движутся, как и узелок. Можно проследить, какие точки движутся и в каком направлении они смещаются, если сравнить два последовательных кинокадра. Используем для этого какие-нибудь два последовательных кадра из рис. 15.2. Они перепечатаны вместе на рис. 15.3, где мы видим два последовательных положения волнового импульса совершенно так же, как они отпечатались бы при двойной экспозиции в обыкновенном фотоаппарате. Под фотоотпечатками на рис. 15.3 начерчен профиль того же волнового импульса; сплошная линия изображает предшествующее, а пунктирная — последующее положение. Как показывают стрелки, при перемещении волнового импульса справа налево каждый виток правой половины показанной части пружины движется вниз, а левый — вверх.

Если бы импульс двигался слева направо, результат был бы обратным, как показано на рис. 15.4. Здесь импульс показан схематически, так как при этом можно изобразить изменение за любой малый промежуток времени. Таким способом можно показать мгновенное перемещение пружины. Если известно направление перемещения импульса, из такого графика можно определить, как движется каждая точка пружины в любой стадии прохождения через нее импульса. Наоборот, если известно, как движутся отдельные части пружины, можно определить направление перемещения импульса.

*) Если вам трудно достать спиральную пружину, то подойдет резиновая трубка или длинная суконная полоса. Привяжите один конец к дверной ручке и встряхните другой в поперечном направлении. Если полоса или трубка достаточно тяжелы, то получатся импульсы, распространяющиеся достаточно медленно для того, чтобы успевать их наблюдать.

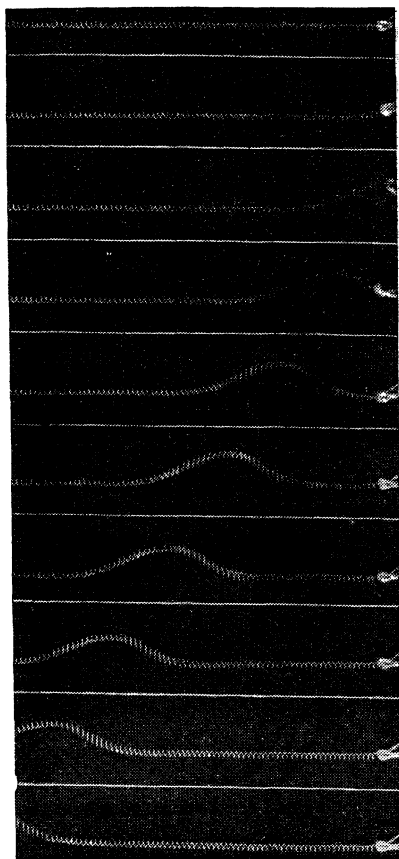


Рис. 15.1. Образование и перемещение волнового импульса вдоль пружины. Ряд последовательных кинокадров.

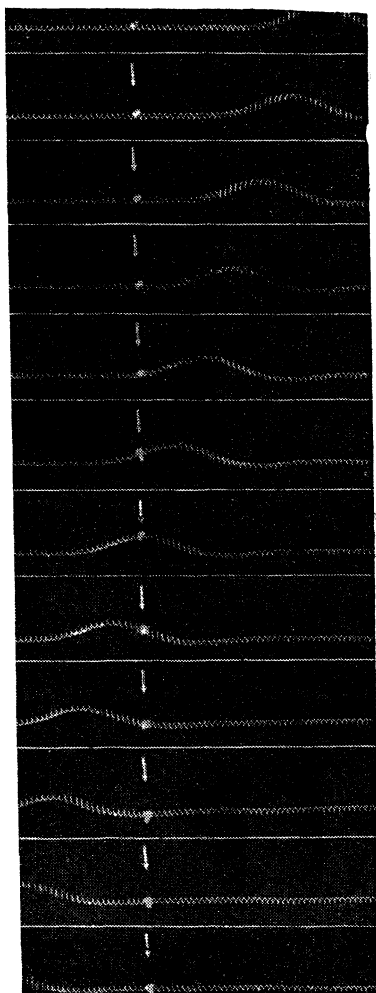


Рис. 15.2. Перемещение волнового импульса справа налево вдоль пружины, на которой отдельный виток отмечен белым узелком. При прохождении импульса узелок движется вверх и вниз, но не смещается в направлении движения импульса.

Теперь мы располагаем довольно полными сведениями о характере движения частей пружины, хотя на каждом кинокадре этого движения не видно. Мы выяснили, что: 1) каждый волновой импульс перемещается с постоянной скоростью вдоль пружины, не изменяя своей формы; 2) сама пружина движется только под прямым углом к направлению перемещения волнового импульса.

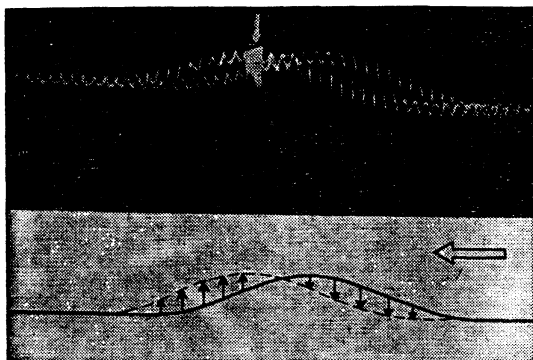


Рис. 15.3. Связь между движением волнового импульса справа налево и движением самой пружины. Показаны снимки пружины в двух последовательных положениях. Стрелки на фото показывают направления движения витков при прохождении импульса. Большая стрелка над нижней схемой указывает направление перемещения импульса.

Можно объединить эти два наблюдения, чтобы определить перемещение произвольной частицы пружины с течением времени. Мы, разумеется, рассмотрели лишь простейшие волны, так что последнее наше утверждение может оказаться применимым не ко всем видам

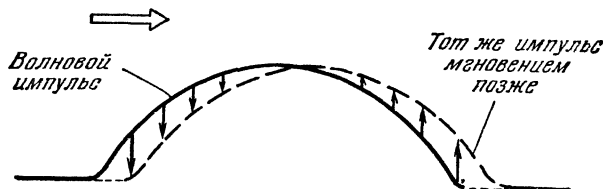


Рис. 15.4. Соотношение между перемещением волнового импульса слева направо и движением частей пружины.

волн. Даже в рассмотренных случаях тщательное наблюдение может обнаружить отклонения от приведенного выше описания движения. Мы, однако, провели полезное исследование волнового процесса в первом приближении. С небольшими изменениями приведенное описание применимо ко многим другим типам волн.

15.3. Наложение волн. Пересечение импульсов

До сих пор мы рассматривали поведение единичного волнового импульса, перемещающегося в одном направлении. Но что происходит, когда один импульс движется справа налево, а другой в то же

время перемещается слева направо? В частности, что происходит при встрече двух волновых импульсов? Проходят ли они друг сквозь друга или каким-либо образом уничтожают друг друга?

Лучший путь выяснения этого вопроса — эксперимент. Кинокадры на рис. 15.5 показывают, что происходит при одновременном возбуждении на пружине двух волновых импульсов, из которых один перемещается слева направо, а другой — справа налево.

На верхнем кадре эти импульсы приближаются друг к другу так, как будто каждый имеет всю пружину в своем распоряжении. Во время наложения импульсов друг на друга они образуют общую изменяющуюся сложную фигуру. Но после разъединения они вновь принимают свою первоначальную форму, и каждый продолжает свой путь, как будто ничего не изменилось. Это хорошо видно на трех нижних кадрах. Волновой импульс, двигавшийся влево, продолжает двигаться влево, имея свою форму. То же самое происходит с импульсом, двигавшимся вправо. Весь этот опыт может многократно повторяться с волновыми импульсами самой разнообразной формы. Общий результат во всех случаях тот же самый.

То обстоятельство, что два волновых импульса проходят друг через друга, не изменяя своей формы, является основным свойством волн. Наоборот, если соударяются два брошенных мяча, их движение резко изменяется. Таким образом, пересечения волн, с одной стороны, и потоков твердых тел, с другой, являются совершенно различными процессами.

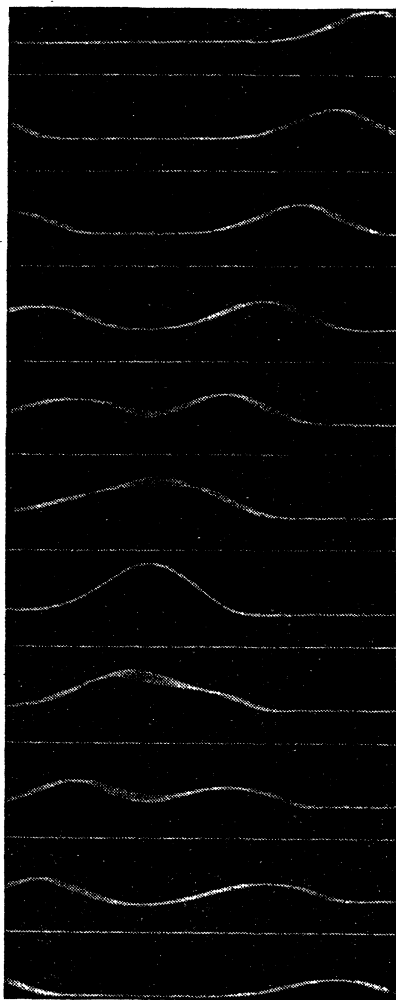


Рис. 15.5. Два волновых импульса, пересекающих друг друга. Обратите внимание на различие формы этих импульсов. Благодаря этому различию можно видеть, что тот импульс, который до пересечения находился слева, после пересечения оказывается справа, и наоборот.

Рассмотрим подробнее процесс пересечения двух волновых импульсов (см. рис. 15.5). Нередко форма сложного волнового импульса, образующегося в процессе их пересечения, не похожа на форму каждого из начальных импульсов. Можно, однако, установить происхождение формы сложного импульса, если представить себе каждый из них в отдельности в том месте, где бы он находился в данный момент. Затем нужно сложить смещения точек, обусловленные

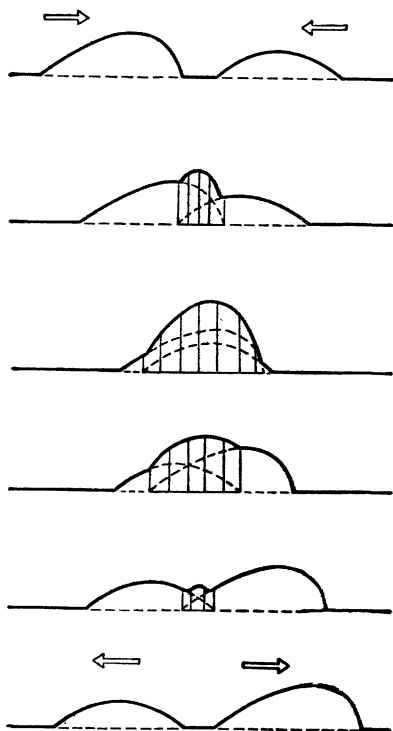


Рис. 15.6. Наложение двух волновых импульсов. Смещение в сложном импульсе равно сумме отдельных смещений.

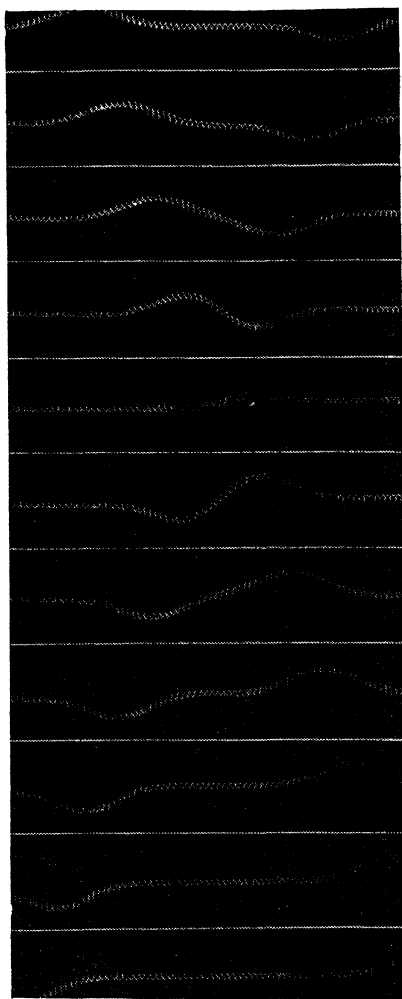


Рис. 15.7. Наложение двух равных и противоположно направленных волновых импульсов, распространяющихся по спиральной пружине. На пятом сверху кадре эти импульсы почти уничтожают друг друга.

каждым импульсом в отдельности, и тогда мы получаем смещения, образующие общий волновой импульс. Оказывается, что полное смещение каждой точки среды в любой момент в точности равно сумме смещений, которые были бы вызваны каждым из двух

волновых импульсов независимо друг от друга. Соответствующий метод определения полного смещения иллюстрируется рис. 15.6. Этот метод применим к любой паре волновых импульсов. Оказывается, он применим и к любому числу взаимно налагающихся импульсов: складываются смещения при любом числе импульсов.

Все сказанное резюмируется следующим образом. Чтобы определить форму полного волнового возмущения в любой момент времени, нужно в каждой точке среды сложить смещения, обусловленные каждым из волновых импульсов, проходящих через эти точки среды. Простое сложение дает истинное смещение среды — в этом заключается *принцип суперпозиции*.

Применим принцип суперпозиции к двум частным случаям. Сначала рассмотрим опыт, представленный серией последова-

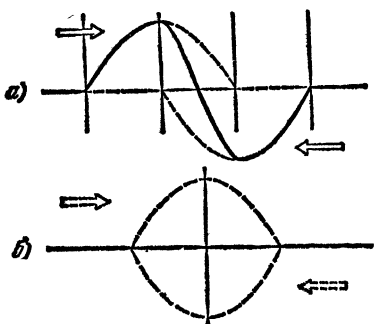


Рис. 15.8. Взаимное наложение двух равных и противоположно направленных импульсов перед полным взаимным уничтожением смещений (а) и в момент полного взаимного уничтожения смещений (б).

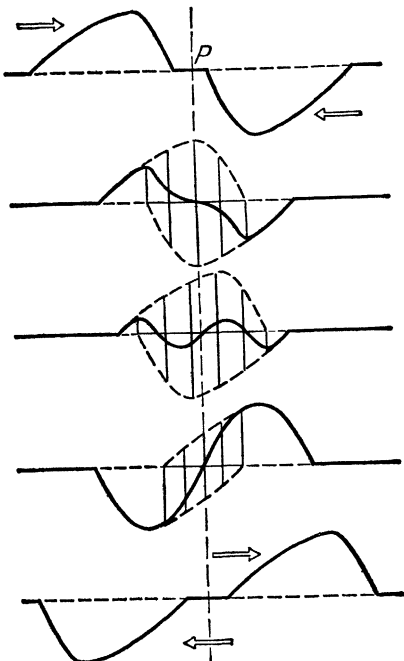


Рис. 15.9. Взаимное наложение двух несимметричных, но одинаковых волновых импульсов. Примечательно, что точка, расположенная посередине между ними, все время остается в покое.

тельных кадров на рис. 15.7. Здесь показано взаимодействие волнового импульса, смещающего пружину вниз и распространяющегося вдоль пружины от ее правого конца, с импульсом, смещающим пружину вверх и распространяющимся слева. Пусть оба импульса совершенно одинаковы по форме, причем каждый из них симметричен. Бросается в глаза то обстоятельство, что на одном из кадров сложение смещений, направленных вверх (положительных), со смещениями, направленными вниз (отрицательными), приводит к результирующему смещению, равному нулю. Здесь явно имел место момент наложения противоположных импульсов, когда вся пружина занимала несмещенное положение (см. также схему на рис. 15.8).

Почему же все-таки на пятом сверху кадре на рис. 15.7 вид пружины несколько отличается от фотоснимка покоящейся пружины? Рассмотрим различие между несмещенной пружиной, несущей два равных и противоположных волновых импульса, и покоящейся пружиной, по которой никакие импульсы не распространяются. Во втором случае все отрезки пружины находятся в покое все время. В первом же случае имеет место только один момент, в который пружина проходит через свое положение равновесия, но при этом находится в движении. Это движение проявляется в размытости изображения, подобной размытости изображения быстро летящего самолета даже на моментальном фотоснимке.

Второй частный случай показан на рис. 15.9. Здесь встречаются два одинаковых волновых импульса, один из которых распространяется справа, а другой — слева. На одном смещения происходят ввѣрх, на другом — вниз. Эти импульсы отличаются от показанных на рис. 15.7 тем, что ни один из них не симметричен, хотя они одинаковы по форме и размерам.

Так как ни один из них не является симметричным, они никогда не могут полностью погасить друг друга. Но во всяком случае одна из точек пружины (P) остается все время в покое. Эта точка расположена точно на полпути между двумя импульсами. При встрече и взаимном наложении импульсов они проходят через эту точку P так, что высшая точка одного импульса как раз компенсирует низшую точку другого. То же самое относится к любой другой паре противолежащих точек. Оба эти импульса достигают точки P одновременно, почему она и остается в покое.

15.4. Отражение волн и их прохождение через среды

Как только волновой импульс, перемещающийся вдоль пружины, доходит до закрепленного конца, он отскакивает назад. Это изменение направления движения импульса на обратно называется *отражением*, а импульс, распространяющийся обратно, называется *отраженным импульсом*. На рис. 15.10 закрепленный конец находится слева. В изображенном случае в *падающем* (начальном) импульсе, движущемся влево, все смещения происходят ввѣрх, а в отраженном — вниз. Отраженный импульс обращен в противоположную сторону по отношению к падающему, но сохраняет свою прежнюю форму.

Естественно задать вопрос: почему отраженный импульс перевернут? Причиной является тот факт, что одна из точек пружины, в данном случае — ее закрепленный конец, не движется. Мы уже встречались с положением, когда некоторая точка пружины (P) на рис. 15.9) неподвижна. Закроем правую половину рис. 15.9; мы увидим, что импульс, направленный ввѣрх и движущийся вправо, постепенно «сплющивается» по мере приближения к P и, наконец, отражается. В данном случае в головной части падающего импульса пружина движется ввѣрх (как и на рис. 15.3). Когда начало импульса на рис. 15.9 подходит к P , точка P должна была бы

смещаться вверх. Поскольку же точка P остается в покое, смещение пружины, направленное вверх, должно компенсироваться движением, направленным вниз. Единственная разница между случаями,

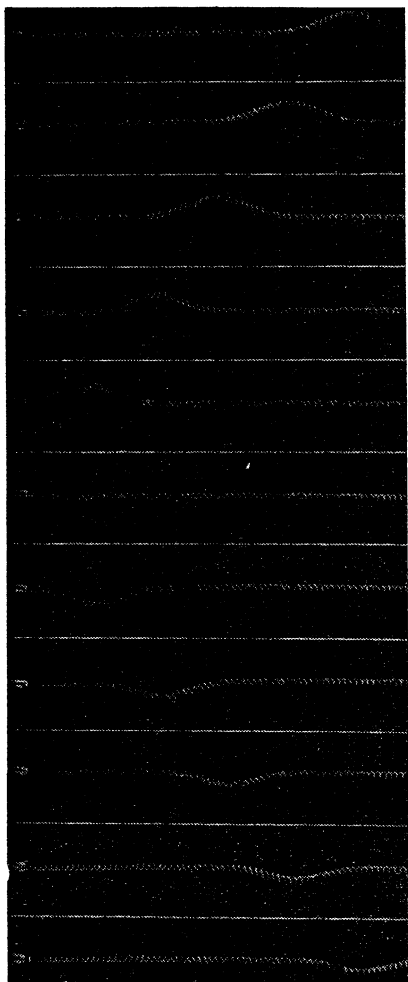


Рис. 15.10. Отражение волнового импульса от закрепленного конца. Отраженный импульс перевернут по отношению к падающему.

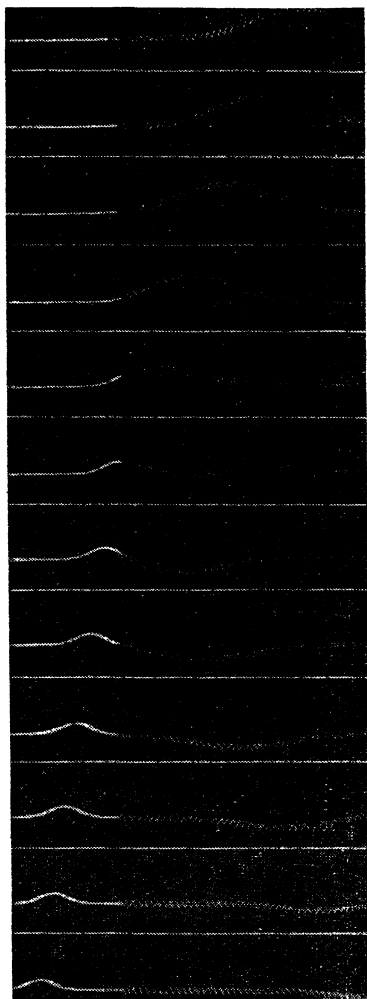


Рис. 15.11. Прохождение волнового импульса от легкой пружины (справа) к более тяжелой. На стыке двух пружин импульс частично проходит дальше, частично отражается. Отраженный импульс перевернут.

показанными на рис. 15.9 и 15.10, заключается в том, что в первом случае направленное вниз движение появилось под действием импульса, перемещающегося справа налево, а в случае, иллюстрированном на рис. 15.10, движение вниз конца пружины начинается

благодаря тому, что конечная точка зажата неподвижно. Зажимание конечной точки можно рассматривать лишь как другой способ сообщения концу пружины смещения вниз, которое распространяется вправо в виде импульса смещений, направленного вниз.

Представим себе теперь, что вместо закрепления конца спиральной пружины мы присоединим ее к другой пружине, которая намного тяжелее и потому менее податлива к смещению. Эта новая комбинация является чем-то средним между двумя случаями: 1) первоначальной пружины с закрепленным концом и 2) первоначальной, но удлиненной пружины. В случае 1) весь волновой импульс отражается в перевернутом виде; в случае 2) весь импульс продолжает перемещаться вперед. Следует поэтому ожидать, что в нашей новой системе часть волнового импульса отразится в перевернутом виде, а часть будет распространяться дальше, проходить в новой среде. Этот эффект показан на рис. 15.11, где начальный импульс приходит справа, а более тяжелая пружина расположена слева. Можно видеть, как на границе двух пружин (представляющих две среды, в которых распространяются импульсы) волновой импульс распадается на две части: *отраженную* и *проходящую*. Подобно суперпозиции, распадение падающего волнового импульса на границе сред на отраженную и проходящую части является типичным свойством волн.

Что происходит, когда волновой импульс движется в обратном направлении, т. е. от более тяжелой к более легкой пружине? Это не так просто предсказать. Здесь уже нельзя считать поведение рассматриваемой системы промежуточным между поведением двух других известных нам систем. Но опыт отвечает на поставленный вопрос. На рис. 15.12 виден волновой импульс, перемещающийся слева от более тяжелой к более легкой пружине. В этом, как и в обратном случае, соответствующем рис. 15.11, часть импульса проходит дальше и часть отражается, но отраженный импульс не перевернут.

В общем, при посылке волнового импульса по пружине к ее соединению с другой пружиной происходит полное отражение импульса в перевернутом виде, если вторая пружина неизмеримо тяжелее первой. При замене тяжелой пружины все более легкими отраженный импульс становится все слабее, но зато появляется все более сильный импульс, проходящий дальше по второй пружине. Когда вторая пружина становится такой же легкой, как первая, отражения импульса не происходит вовсе, так что весь импульс проходит дальше. Если же вторая пружина становится еще легче первой, то опять появляется отражение, но теперь уже неперевернутого импульса. Чем легче вторая, более легкая пружина, тем сильнее отраженный импульс. Если вторая пружина несоизмеримо легче первой, то отраженный импульс по силе почти равен падающему. Это можно продемонстрировать, пользуясь тяжелой пружинкой, привязанной к тонкой нейлоновой нити (рис. 15.13).

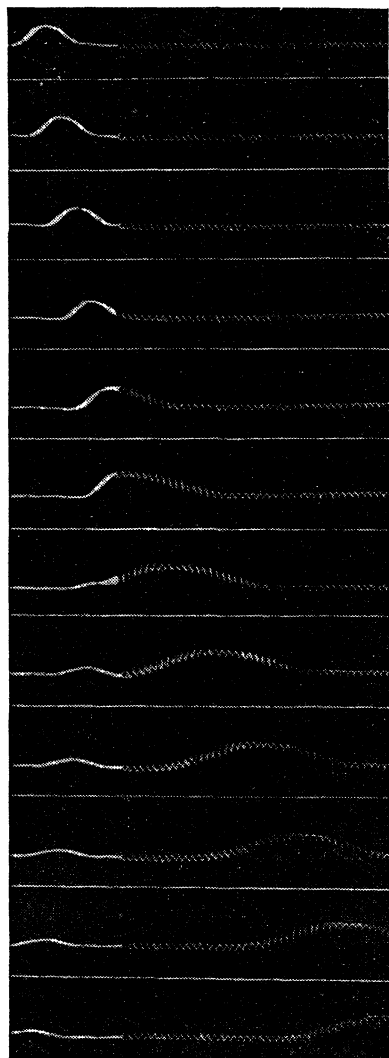


Рис. 15.12. Прохождение волнового импульса от тяжелой пружины (слева) к более легкой. На стыке пружин импульс частично проходит дальше, частично отражается. Отраженный импульс не перевернут.

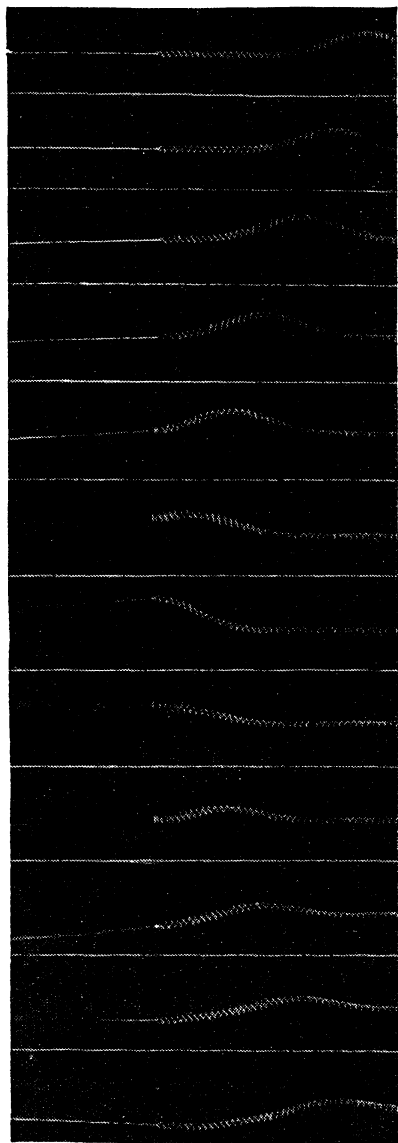


Рис. 15.13. Волновой импульс на пружине, отраженный от точки соединения пружины с очень тонкой нитью. Весь импульс отражается обратно в неперевернутом виде. Размытость изображения нити на средних кадрах свидетельствует о большой скорости движения каждой точки нити при прохождении импульса. Нельзя ли определить направление движения этого импульса?

15.5. Идеализации и приближения

При рассмотрении волн, распространяющихся по пружине, до сих пор утверждалось, что их форма и размеры не изменяются в процессе перемещения. И действительно, вернувшись к рис. 15.1, мы вряд ли заметим какие-либо изменения в размерах волнового импульса при его перемещении. Однако, как вы несомненно заметили при производстве опытов, импульс постепенно ослабляется и после нескольких отражений совершенно исчезает. Разумно ли игнорировать это ослабление импульса? Не было ли наше описание поведения волн принципиально неверным?

Чтобы ответить на эти вопросы, начнем с того, что время, необходимое для затухания волнового импульса, зависит от обстоятельств. Например, если пружина погружена в воду, затухание происходит быстрее, чем в воздухе. Вода оказывает большее сопротивление движению пружины, чем воздух. Можно ожидать, что в вакууме время затухания волнового возмущения будет еще больше, чем в воздухе; поставить соответствующие опыты не так легко, но, будучи выполнены, они подтверждают высказанное предположение. Даже в вакууме волновое возмущение в конце концов затухает вследствие внутреннего сопротивления пружины. Величина сопротивления зависит от материала пружины. В некоторых материалах оно чрезвычайно мало, и возмущение продолжает долго распространяться.

Можно представить себе пружину, совершенно лишенную внутреннего сопротивления, находящуюся в вакууме. По такой пружине волновой импульс будет перемещаться бесконечно долго. Пренебрегая затуханием волновых возмущений, мы идеализируем пружины, считаем их свободными от внутренних и внешних сопротивлений. Мы имеем право это делать только до тех пор, пока поведение пружины рассматривается за столь короткий промежуток времени, что заметного уменьшения величины возмущения не происходит. Для таких коротких промежутков времени идеальная, свободная от сопротивлений пружина служит хорошим *приближением* к реальной пружине и потому заслуживает рассмотрения. В этом есть явная выгода, так как поведение идеальной пружины гораздо проще, чем реальной.

Такого же рода идеализация использовалась в нашем рассмотрении суперпозиции двух волновых возмущений. Мы установили, что смещение, создаваемое сложным возмущением, равно сумме смещений, которые получались бы в данной точке среды в тот же момент от каждого волнового импульса в отдельности. Но если отдельные импульсы достаточно велики, то оказывается, что результирующее смещение меньше суммы независимых смещений от этих импульсов. Если же мы опять-таки будем игнорировать это отклонение от простого сложения смещений, то тем самым мы будем рассматривать идеальную пружину вместо реальной, пользуясь лишь приближением к полному описанию действительного положения вещей. Но пока смещения достаточно малы, указанные отклонения будут пре-

небрежимо малы и идеальная пружина будет служить хорошим приближением к реальной; преимущество этого приближения заключается в его сравнительной простоте.

Рассмотренные приближения не являются первыми в нашем курсе. Например, в гл. 9 была построена модель идеального газа, приводящая к закону Бойля — Мариотта. Этот закон является хорошим приближенным описанием поведения газа, в котором молекулы достаточно удалены друг от друга; но если они слишком близки друг к другу, реальный газ уже не ведет себя подобно идеальному.

Идеализации и приближения нередко используются бессознательно. Вдумаемся, например, в смысл утверждения, что площадь некоторого участка земли равна 1000 м^2 . Обычно площадь участка определяется измерением его длины и ширины и их перемножением, как будто участок совершенно плоский. Таким образом мы пренебрегаем наличием небольших возвышенностей и углублений, благодаря которым истинная площадь несколько больше вычисленной. Мы заменяем площадь поверхности сложной формы площадью простого плоского прямоугольника. Такой способ определения площади полезен только при условии, что на участке нет значительных возвышенностей и долин, а размеры участка малы по сравнению с радиусом Земли. При этих условиях идеализированный плоский участок является хорошим приближением.

В большинстве случаев проблемы, решаемые наукой, достаточно сложны, и для облегчения понимания явления целесообразно отделять существенное от второстепенного. Иными словами, нужно прибегать к идеализации. В этой главе исследовались волны. На реальных пружинах волновой процесс чрезвычайно сложен, но мысленно заменяя их идеальными пружинами, мы отделяем существенное от несущественного и упрощаем вопрос для облегчения его понимания. Умение правильно идеализировать является одним из условий успешной научной работы.

15.6. Можем ли мы принять волновую модель света?

В этой главе мы познакомились с двумя важными свойствами волн, ясно показывающими преимущества волновой модели света по сравнению с корпускулярной. Во-первых, мы узнали, что волны могут без изменений проходить друг через друга. Если направить лучи от двух карманных фонарей один сквозь другой, каждый из лучей продолжается за пересечением так, как будто другого луча и не было (см. рис. 12.4). Аналогично этому вы видите эту страницу, несмотря на то, что лучи света проходят во всех направлениях между ею и вашими глазами. Это означает, что пересечение световых лучей гораздо больше похоже на пересечение волн, чем на пересечение потоков частиц.

Вторым важным свойством волн является одновременное частичное отражение и дальнейшее прохождение на границе двух сред. В связи с этим вспомните, что происходит со светом при его переходе

из одной среды в другую, например из воздуха в стекло. Часть света отражается, а часть преломляется, как это видно, например, из рис. 13.2. Именно так ведут себя и волны, но не потоки частиц.

Упомянутые два свойства волн, присущие и свету, побуждают нас продолжать изучение волновой модели света; но этих двух свойств далеко не достаточно для доказательства, что волновая модель годится для света. Например, когда луч света падает на поверхность стекла, угол отражения равен углу падения, а угол преломления подчиняется закону Снеллиуса. На основе того, что мы до сих пор узнали, нельзя утверждать, что волновая модель объясняет эти изменения направления лучей. Волны на наших пружинах могли перемещаться только по одной линии, т. е. в одном измерении. Поэтому направление распространения могло меняться только на обратное. Чтобы выяснить, могут ли волны в самом деле объяснить поведение света, необходимо экспериментировать с волнами, способными распространяться в пространстве или по меньшей мере по плоскости, чтобы можно было проводить прямое сопоставление. Это мы и сделаем в следующей главе, где будут исследоваться волны на поверхности воды.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

1*. Что общего можно указать для всех примеров волн, рассмотренных в разделе 15.1? (Раздел 15.1.)

2. Допустим, что вы смотрите через свое окно на соседа, сидящего на крыльце на противоположной стороне улицы. Какими способами вы могли бы привлечь к себе его внимание, привести его в движение или как-либо иначе повлиять на его действия? Какие из этих способов связаны с переносом массы и какие — с волновым движением?

3*. В каком месте на рис. 15.4 пружина в данный момент находится в покое? (Раздел 15.2.)

4*. На рис. 15.2 при прохождении волны справа налево узелок движется сначала вверх и затем вниз. При прохождении того же волнового импульса в обратном направлении как стал бы перемещаться узелок: сначала вверх или сначала вниз? (Раздел 15.2.)

5. На рис. 15.2 показано смещение определенной точки пружины в разные моменты прохождения волнового импульса. Постройте график зависимости смещения этой точки от времени. Откладывайте смещения по вертикали, а время — по горизонтали с интервалом в $\frac{1}{24}$ с (интервал между моментами съемки кадров на рис. 15.2).

6. Опишите движение одной из точек пружины под действием волнового импульса, перемещающегося вправо, как изображено на рис. 15.14.

7*. Могут ли взаимно погаситься два встречных волновых импульса, распространяющихся вдоль спиральной пружины, если их смещения имеют одинаковое направление? (Раздел 15.3.)

8*. Два волновых импульса имеют одинаково направленные максимальные смещения, равные 3 и 4 см. Каково будет максимальное смещение в момент их взаимного пересечения? (Раздел 15.3.)

9. Используя суперпозицию двух одинаковых волновых импульсов, движущихся в противоположных направлениях (рис. 15.15), определите высоту и форму сложного импульса, образующегося в момент, изображенный на рисунке. Продолжайте то же самое для нескольких других положений тех же двух импульсов.

10. На седьмом кадре сверху на рис. 15.5 показаны два импульса в момент их совпадения при встречном движении. Укажите, какие отрезки пружины находятся в данный момент в движении и в каком направлении они движутся.

11. Какие точки и в каком направлении движутся на пятом сверху снимке на рис. 15.7?

12*. Волновой импульс, изображенный на рис. 15.16, послан по спиральной пружине слева направо. Нарисуйте волновой импульс, распространяющийся в обратном направлении, который мог бы на мгновение погасить ранее изображенный импульс. (Раздел 15.3.)

13. На шестом кадре рис. 15.17 можно видеть наложение двух одинаковых симметричных волновых импульсов, каждый из которых симметричен относительно вертикальной линии, проходящей через его центр.

а) Отсутствие размытости показывает, что в данный момент все отрезки пружины неподвижны. Приведите обоснование этого обстоятельства, исходя из принципа суперпозиции.

б) Предположим, что вы деформируете спиральную пружину таким же образом, как показано на шестом кадре рис. 15.17. Что произойдет после того, как вы отпустите пружину?

14. Шестой кадр рис. 15.10 показывает пружину в момент, когда



Рис. 15.14. К задаче 6.

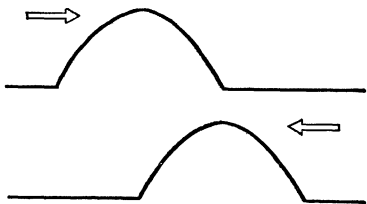


Рис. 15.15. К задаче 9.



Рис. 15.16. К задаче 12*.

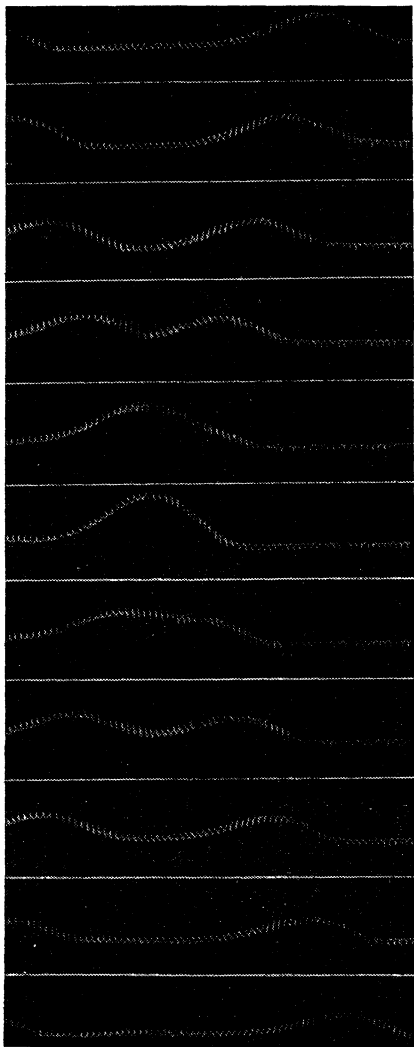


Рис. 15.17. К задаче 13.

она почти выпрямилась. Объясните, почему существует момент, когда это имеет место.

15. Рассмотрите несимметричный волновой импульс, распространяющийся слева на рис. 15.6. Нарисуйте его форму после отражения от закрепленного конца.

16*. Какой из волновых импульсов, изображенных на рис. 15.11, дает большее смещения: падающий или отраженный? (Раздел 15.4.)

17*. Каково отношение скорости волнового импульса, распространяющегося вдоль легкой пружины (рис. 15.11), к скорости распространения импульса вдоль тяжелой пружины? (Раздел 15.4.)

18. Пусть волновой импульс, посланный с одного конца спиральной пружины, возвращается в перевернутом и ослабленном виде. Что можно сказать о скорости распространения импульса вдоль второй пружины, скрепленной последовательно с первой?

19. Линия *a*) на рис. 15.18 изображает волновой импульс, распространяющийся вдоль веревки, составленной из отрезков различной плотности. Линии *б*) и *в*) изображают ту же веревку в последующие равноотстоящие моменты времени. Где находится точка соединения отрезков веревки и каковы их относительные плотности?

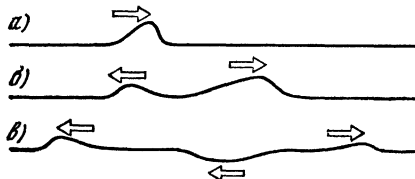


Рис. 15.18. К задаче 19.

20. Когда свет распространяется из воздуха в воду или в обратном направлении, часть его отражается. Если здесь имеется аналогия с волновым импульсом, переходящим с одной спиральной пружины на другую, то при

каком из указанных двух направлений распространения света отраженный световой импульс будет перевернут?

21. Возьмите конец длинной веревки, другой конец привяжите к неподвижному жесткому держателю. Встаньте лицом к веревке и вызовите на ней волны, сделав три быстрых последовательных непрерывных круговых движения по часовой стрелке рукой, держащей конец веревки.

а) Опишите образованную при этом волну.

б) Опишите отраженную волну.

в) Опишите движение частиц веревки при прохождении волны вперед и назад.

22*. На каком основании можно утверждать, что смена последовательных кадров на рис. 15.10 происходила сверху вниз, а не снизу вверх? (Раздел 15.5.)

23. При распространении волнового импульса вдоль спиральной пружины он во всех случаях постепенно ослабевает.

а) При каких условиях этим ослаблением можно пренебрегать?

б) Какие преимущества вытекают из возможности пренебрегать этим ослаблением?

24. Как в этой главе следует понимать термин «идеальная пружина»?

25. Можно говорить, что поверхность моря приблизительно плоская. Приведите примеры случаев, когда это является хорошим или, наоборот, грубым приближением.

16.1. Волны на воде

Одним из первых примеров волн, упомянутых в гл. 15, была рябь на поверхности пруда. Распространение волн на воде в виде расширяющихся кругов знакомо каждому. Например, рыба во время поклевки червяка, насаженного на крючок удочки, дает о себе знать рыболову отчасти благодаря круговым волнам, расходящимся от поплавка, совершающего вертикальные движения.

Так как волны на воде перемещаются по поверхности и не распространяются на сколько-нибудь значительную глубину, они известны под названием *поверхностных* волн. Если вам приходилось следить за поведением рыб в аквариуме, вы, возможно, наблюдали, что волны не влияют на их покой или движения. В противоположность капитану корабля, командир

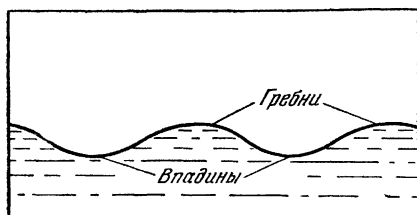


Рис. 16.1. Вид водяных волн.

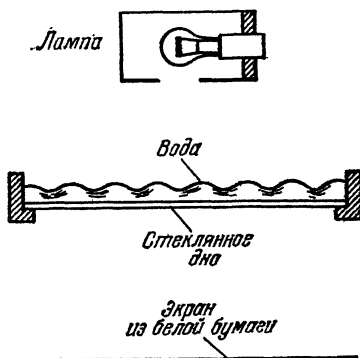


Рис. 16.2. Волновая кювета.

подводной лодки не опасается шторма. Лодка погружается и плавает спокойно, не испытывая никакого влияния свирепствующего шторма.

Глядя на водяные волны через стеклянную стенку аквариума, можно наблюдать их форму. При этом обнаруживается, что, не считая незначительных отклонений, они в общем сходны с волнами, изображенными на рис. 16.1. Их вершины называются *гребнями*, а углубления — *впадинами*. Общеизвестным примером являются волны, порождаемые движущейся лодкой. Можно наблюдать водяные волны в обычной ванне, но в лаборатории применяется более удобный прибор — волновая кювета. У кюветы (рис. 16.2) стеклянное

дно, что позволяет проектировать изображение волн на экран. Изображение возникает благодаря тому, что гребни волн действуют как собирающие цилиндрические линзы и стремятся фокусировать свет от лампы, тогда как впадины, действующие подобно рассеивающим линзам, стремятся рассеивать свет. Поэтому гребни отображаются на экране в виде ярких полос, а впадины кажутся темными.

16.2. Прямолинейные и круговые волновые импульсы

Прямолинейные волновые импульсы, подобные волнам, расходящимся от носовой части лодки, можно вызывать погружением линейки в воду, налитую в волновую кювету. В таком случае волновой

Тот же импульс через некоторое время



Рис. 16.3. Прямолинейный импульс распространяется под прямым углом к гребню. Это направление показано стрелкой.

импульс перемещается так, что его гребень все время остается параллельным своему начальному положению. Расстояние между параллельными линиями всегда измеряется по перпендикуляру; таким образом, направление распространения волнового импульса перпендикулярно к

его гребню. Это направление называется также *нормалью* к гребню. На рис. 16.3 гребень прямолинейного импульса обозначен сплошной линией. Направление распространения указано стрелкой. В дальнейшем мы во всех случаях будем обозначать направление распространения волновых импульсов стрелкой.

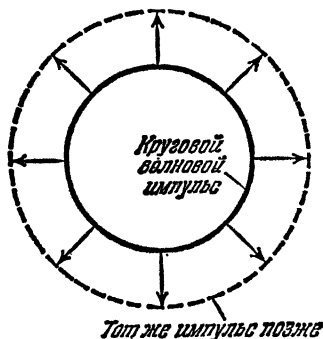


Рис. 16.4. Расходящийся круговой волновой импульс.

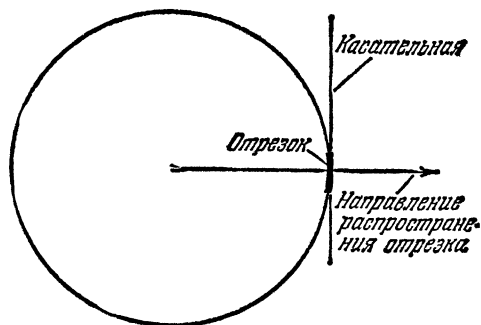


Рис. 16.5. Короткий отрезок кругового гребня. Подобный отрезок ведет себя, как будто он является прямолинейным, и перемещается в направлении радиуса от центра.

В кювете можно вызвать также круговые импульсы простым погружением пальца в воду. На рис. 16.4 показан подобный волновой импульс в два последовательных момента. За промежуток времени между этими моментами волновой импульс распространяется до окружности большего радиуса. Круговому импульсу в целом нельзя приписать определенного направления, так как он расходится во

всех направлениях. Рассмотрим отрезок кругового гребня, настолько малый, чтобы его можно было считать прямолинейным (рис. 16.5). Перемещение такого отрезка гребня происходит вдоль радиуса от центра круга. Это направление нормально к гребню совершенно так же, как и в случае прямолинейного волнового импульса.

16.3. Отражение

Вспомнив, что волновой импульс, распространяющийся по пружине, способен отражаться, мы вправе ожидать, что и водяные волны могут отражаться. Рассмотрим прямолинейный волновой импульс, перемещающийся от линейки к противоположной стенке кюветы. Отражение этого импульса можно осуществить, в частности, от барьера, погруженного в середине кюветы параллельно линейке. Волновой импульс падает на барьер и отражается обратно, как и в случае импульса на пружине.

Затем повернем отражающий барьер, чтобы падающий импульс не был параллелен ему. На рис. 16.6 видны два прямолинейных волновых импульса: один — приближающийся к барьеру, а другой — отраженный от него. Угол между падающим гребнем и барьером обозначен через i' , а между отраженным гребнем и барьером — через r' . Измерив эти два угла на фотоснимке, находим, что они равны. При повторениях опыта при разных углах падения всегда соблюдается равенство

$$r' = i'.$$

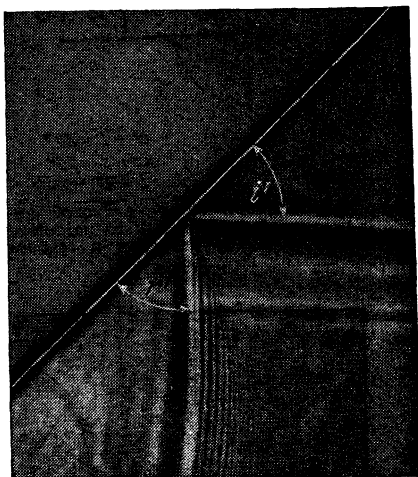


Рис. 16.6. Прямолинейный волновой импульс, движущийся вверх и отражаемый от диагонального барьера. Отраженная часть импульса движется вправо.

Этот результат сходен с законом отражения света от зеркал, рассмотренным в разделе 12.4. Там было установлено, что угол отражения равен углу падения. Но в оптике углы падения и отражения измеряются между направлениями распространения света и нормалью к отражающей поверхности. Для волн можно дать углам падения и отражения такое же определение как в оптике, учитывая, что направление распространения перпендикулярно гребням.

Геометрическое построение на рис. 16.7 показывает, что угол падения i равен углу i' ; из аналогичного построения следует, что угол отражения r равен углу r' . Следовательно, наблюдаемое

нами равенство $r' = i'$ может быть переписано в виде $r = i$, т. е. угол отражения равен углу падения. Таким образом, мы установили, что волны и свет подчиняются одному и тому же закону отражения (рис. 16.8).

Расходящийся круговой волновой импульс может тоже отражаться от прямолинейного барьера. На рис. 16.9 показано приближение такого импульса к барьеру и его отражение. Можно видеть,

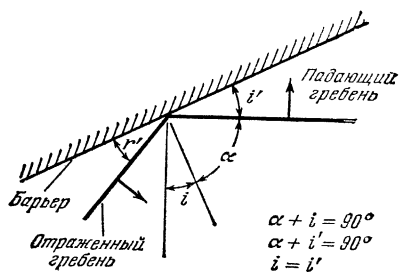


Рис. 16.7. Прямолинейный волновой импульс, падающий на барьер. Угол падения i равен углу i' между барьером и гребнем импульса.

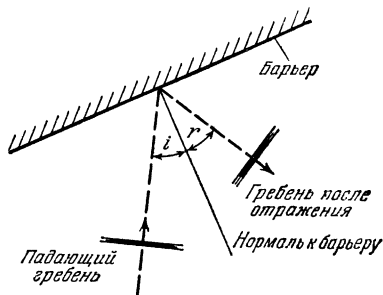


Рис. 16.8. Отражение прямолинейного волнового импульса от прямолинейного барьера. Как и для света, угол отражения r равен углу падения i .

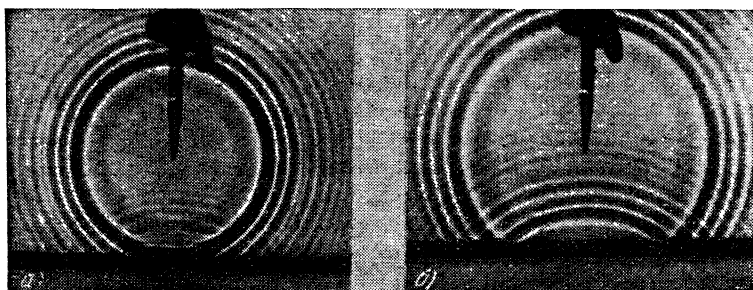


Рис. 16.9. Отражение кругового волнового импульса от прямолинейного барьера: а) импульс только что подошел к барьеру; б) часть его уже отразилась.

что отраженный импульс также образует дугу окружности. Центр этой окружности расположен в некоторой точке, находящейся на таком же расстоянии за барьером, как и источник перед барьером. Это соответствует положению в оптике, когда точечный предмет помещен перед плоским зеркалом, а отраженный свет кажется выходящим из точки, расположенной за зеркалом (см. рис. 12.9 и 12.10). Используя искривленные барьеры или комбинации из двух и большего числа прямых барьеров, в волновой кювете можно продемонстрировать все явления отражения, изученные нами по отношению к свету. Образование «изображений» «зеркалами» в кювете вытекает из закона отражения волн совершенно так же, как образование оптических изображений настоящими зеркалами вытекало из законов отражения света.

16.4. Скорость распространения волн и периодические волны

Волны в разных средах распространяются с разной скоростью. Например, при растягивании спиральной пружины можно наблюдать возрастание скорости распространения по ней волн. При наполнении резинового шланга водой скорость волн, идущих по шлангу, наоборот, уменьшается.

В этом разделе мы познакомимся с методикой измерений скорости распространения водяных волн в кювете. Существует несколько методов таких измерений.

Один из них заключается в возбуждении прямолинейного импульса и измерении секундомером времени t , за которое импульс проходит определенное расстояние l . Тогда скорость v равна пройденному пути, деленному на время его прохождения:

$$v=l/t.$$

Другой метод состоит в возбуждении двух последовательных импульсов. К моменту возбуждения второго первый за время t проходит путь l .

С этого времени оба импульса распространяются, сохраняя постоянное расстояние l между собой. Это расстояние можно измерить линейкой, и мы опять имеем $v=l/t$. Оба эти метода просты по своему принципу, но на практике довольно трудно успевать следить за импульсами и измерять интересующие нас расстояния и промежутки времени.

Третий метод заключается в возбуждении волновых импульсов через равные промежутки времени T . При этом возбудитель волн повторяет свое движение через те же равные интервалы времени T . Такое движение называется *периодическим*, а промежуток времени T носит название *периода*.

Другой величиной, характеризующей периодическое движение, является *частота* f , т. е. число повторений движения в единицу времени. Например, если движение повторяется через каждую десятую долю секунды, то частота равна десяти повторениям в секунду. Вообще частота связана с периодом соотношением

$$f=1/T.$$

Сосредоточим теперь свое внимание на какой-либо определенной точке кюветы. Волновые импульсы, вызванные возбудителем волн, движутся к этой точке и проходят через нее с той же частотой, с какой они выходят из источника. Если в секунду посылаются десять импульсов, то десять же импульсов проходит в секунду и через выбранную точку. Таким образом, частота волн также равна $f=1/T$, где T есть время между прохождением двух последовательных волн. Кроме того, в процессе прохождения волн расстояние между двумя последовательными импульсами (между двумя гребнями или впадинами) остается постоянным и называется *длиной волны* λ (лямбда).

Рассматривавшаяся в данной главе картина расположения последовательных волновых импульсов на плоскости называется периодическими прямолинейными волнами (рис. 16.10).

Скорость распространения периодических волн может быть измерена методом, которым мы воспользовались для измерения одной пары волновых импульсов. Мы уже знаем, что последовательные импульсы имеют интервал λ и что каждый импульс проходит

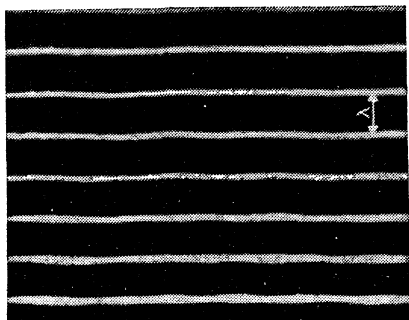


Рис. 16.10. Периодические прямолинейные волны, распространяющиеся в кювете.

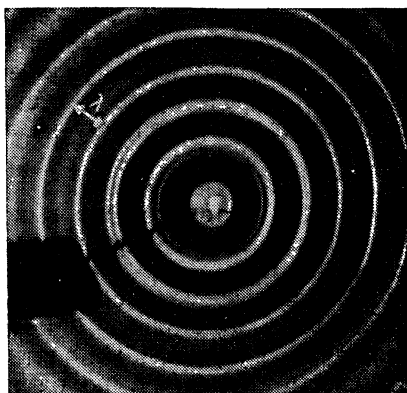


Рис. 16.11. Периодические круговые волны.

этот интервал за время T . Отсюда скорость распространения волн равна

$$v = \lambda/T.$$

Используя соотношение $f=1/T$, находим

$$v = f\lambda,$$

т. е. скорость распространения периодических волн равна произведению частоты на длину волны.

Полученное соотношение отнюдь не ограничивается случаем волн в кювете. Оно в равной степени применимо ко всем видам периодических волн. Такие факторы, как форма волновых импульсов, форма волновой кюветы и природа или свойства жидкости, не фигурировали в наших рассуждениях, которые привели к конечному результату. В частности, можно было бы провести те же самые рассуждения для круговых периодических волн и получить тот же результат: $v=f\lambda$. В последнем случае длина волны измеряется по радиусу (рис. 16.11), причем она оказывается равной длине волны, измеренной для прямолинейных волн той же частоты. Отсюда следует, что скорость круговых волн равна скорости прямолинейных волн в той же среде. Более того, можно было бы применить те же аргументы и к другим видам периодических волн, например к пе-

приодическим волнам на спиральных пружинах, и опять получить прежнее соотношение $v = f\lambda$.

Теперь рассмотрим преимущество приведенного соотношения для измерения v . Представим себе, что вместо непрерывного наблюдения волн мы смотрим на них через отверстие, закрытое почти все время и периодически открывающееся на короткие промежутки времени.

Таким условиям отвечает стробоскоп, описанный в гл. 2. При первом открытии отверстия мы видим волновую картину в определенном положении. За последующее время, пока отверстие закрыто, все гребни и впадины продвигнутся на расстояние, равное произведению скорости их распространения на длительность пребывания отверстия в закрытом состоянии (рис. 16.12, а).

Если смотреть через отверстие, когда оно периодически открывается и закрывается, то обычно бывает видно, что волны находятся в движении. Допустим, однако, что период открытия и закрытия отверстия равен периоду волн. Тогда за время, пока отверстие закрыто, каждый гребень переместится как раз в положение, которое занимал предшествующий гребень в момент предыдущего открытия отверстия (рис. 16.12, б).

В таком случае при каждом открытии отверстия мы видим одну и ту же картину. Иными словами, мы все время видим как бы неподвижную волновую картину, на которой нетрудно измерить длину волны. Кроме того, период закрытия и открытия отверстия в данном случае равен периоду волн, и его можно измерить, сосчитав число открытий отверстия за известный промежуток времени, т. е. определив частоту открытий отверстия. Теперь, зная λ и f , легко определить скорость распространения волн по формуле $v = f\lambda$.

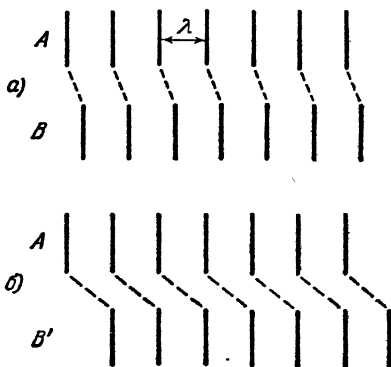


Рис. 16.12. Вид гребней периодических волн при двух последовательных открываниях (А и В) отверстия стробоскопа: а) частота стробоскопа превышает частоту волн; б) частоты совпадают. Прерывистые линии, разумеется, невидимы в условиях опыта.

16.5. Преломление

Выше было упомянуто, что скорость распространения волн зависит от свойств переносящей их среды. В случае поверхностных волн на воде их скорость зависит от глубины водоема. Таким образом, водные пространства двух разных глубин могут рассматриваться как две разные среды. Это чрезвычайно полезное свойство водных пространств, так как простым изменением глубины воды в некоторой части волновой кюветы можно исследовать поведение волн при переходе из одной среды в другую. Чтобы убедиться в том, что

скорость действительно зависит от глубины, уменьшив глубину одной половины кюветы, положив туда на дно толстую стеклянную пластину. Таким способом кювета разделяется на две части различной глубины, с границей, параллельной гребням или впадинам волн. Рассмотрим волны через стробоскоп. Придав ему нужную частоту, можно «остановить» движение волновой картины одновременно в обеих частях кюветы. Это означает, что частота в них одинакова — она не зависит от глубины. Но, как видно из рис. 16.13, длина волны λ_2 в мелкой части меньше длины волны λ_1 в более глубокой части *). Поскольку скорость распространения является

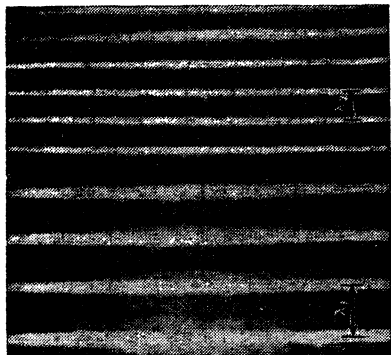


Рис. 16.13. Прохождение волн от глубокой к мелкой части кюветы с водой. Верхняя часть рисунка соответствует мелкой, а нижняя — глубокой части кюветы. В мелкой части длина волны меньше.

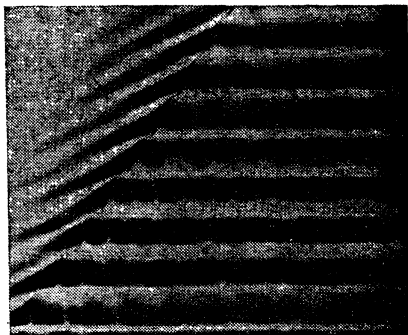


Рис. 16.14. Прямолинейные волны на границе между глубокой и мелкой частями кюветы. Обратите внимание на слабые отраженные волны.

произведением одинаковой для обеих частей частоты на длину волны, скорость в мелкой части, где длина волны меньше, меньше скорости в глубокой части, т. е. $v_2 < v_1$. Кроме того, в каждой части кюветы скорость распространения одинакова во всех направлениях, как мы уже видели в предыдущем разделе.

Далее, повторим опыт с другой пластиной, вложенной в кювету: пластина разрезана так, что ее край образует косой угол с гребнями волн. Нам уже известно, что длина волны меньше в мелкой части. Но теперь влияние пластины не ограничивается разностью длин волн. Рис. 16.14 показывает, что при падении прямолинейных волн на границу глубокой и мелкой частей волны остаются прямолинейными, но изменяют направление своего распространения. Новое направление образует с нормалью к границе меньший угол, чем

*) Заметим, что волны затухают к концу мелкой части. Это происходит только потому, что мы не в состоянии добиться идеального положения, при котором исследуемое явление изучается изолированно от других. Здесь, как и в опытах со спиральной пружиной, существует некоторое сопротивление, ослабляющее волновые возмущения и в конце концов вызывающее их полное затухание.

прежнее. Согласно нашим сведениям по оптике, именно это происходит со светом при прохождении из одной среды в другую, в которой скорость света меньше (см. разделы 13.2 и 14.7). Для света подобное преломление количественно описывается законом Снеллиуса. Напрашивается следующий вопрос: применим ли закон Снеллиуса также и к волнам, например к волнам в кювете, проходящим из одной среды в другую?

Есть два подхода к решению этого вопроса. Можно измерить много различных углов падения и соответствующих углов преломления в кювете и выяснить экспериментально, связаны ли они законом Снеллиуса; или же можно попытаться выяснить, нельзя ли теоретически предсказать закон Снеллиуса из уже известных нам свойств волн. Мы воспользуемся здесь вторым подходом.

В разделе 16.3 было доказано, что угол падения равен углу между барьером и гребнем волны. Подобным же образом угол преломления равен углу между барьером и гребнем преломленной волны. Проведем два последовательных фронта волн *) при их преломлении на границе двух сред (рис. 16.15). Нет надобности проводить нормали, так как углы, равные углу падения i и углу преломления r , уже имеются в сделанном построении. Тогда по определению имеем

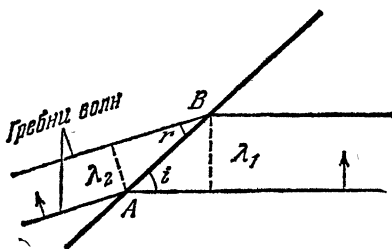


Рис. 16.15. Схема преломления двух последовательных волн.

$$\sin i = \lambda_1 / AB, \quad \sin r = \lambda_2 / AB.$$

Значения синусов ($\sin i$ и $\sin r$) могут изменяться от случая к случаю, но их отношение постоянно и не зависит от угла падения, в чем легко убедиться, разделив $\sin i$ на $\sin r$:

$$\sin i / \sin r = (\lambda_1 / AB) / (\lambda_2 / AB) = \lambda_1 / \lambda_2 = \text{const.}$$

Соотношение $\sin i / \sin r = \text{const}$ есть не что иное, как закон Снеллиуса, но на этот раз выведенный для волн. Назовем это постоянное отношение по-прежнему относительным показателем преломления (второй среды относительно первой) n_{12} . Таким образом,

$$\sin i / \sin r = n_{12},$$

причем $n_{12} = \lambda_1 / \lambda_2$.

Можно также выразить относительный показатель преломления через скорости распространения волн в двух средах. Вообще, скорость распространения волны связана с длиной волны соотношением $v = f\lambda$.

*) Фронтом волны в случае поверхностных волн называется непрерывная линия на поверхности жидкости, до которой волновое возмущение доходит одновременно. Очевидно, что фронт волны параллелен гребню волны или ее впадине. (Прим. ред.)

В частности же, $\lambda_1 = v_1/f$ и $\lambda_2 = v_2/f$. Отсюда получаем

$$n_{12} = \lambda_1/\lambda_2 = (v_1/f)/(v_2/f) = v_1/v_2.$$

Таким образом, относительный показатель преломления равен отношению скорости распространения волн в первой среде к скорости их распространения во второй среде.

Мы пришли к закону Снеллиуса и соотношению между n_{12} и скоростями распространения волн путем теоретического анализа наших прежних результатов. К тому же результату можно прийти и путем прямых измерений. Во-первых, можно измерить многие пары углов i и r и таким образом установить, что $\sin i / \sin r = \text{const} = n_{12}$. Затем можно измерить скорости распространения волн и установить, что $n_{12} = v_1/v_2$. Измерения обоих типов производились очень часто и всегда согласовывались с нашими заключениями.

Вспомним, что корпускулярная модель света, развитая Ньютоном (1669 г.), также оказалась в состоянии объяснить существование постоянного показателя преломления для данной пары веществ, но предсказывала соотношение $n_{12} = v_2/v_1$ (см. разделы 14.2 и 14.7). Волновая же модель, развитая Гюйгенсом (1677 г.) предсказывает, что $n_{12} = v_1/v_2$, т. е. дает отношение, обратное тому, которое выведено из корпускулярной модели. Волновая модель была подтверждена различными опытами, проведенными в начале XIX столетия. Но вопрос о связи показателя преломления со скоростями оставался открытым в течение почти двухсот лет. Только в 1862 г. Фуко измерил скорость света в воздухе и воде и обнаружил, что в воде скорость меньше. Отношение этих скоростей было более точно измерено Майкельсоном в 1883 г. и оказалось равным $v_1/v_2 = 1,33$. Это согласуется с волновой моделью, поскольку показатель преломления воды тоже равен 1,33 (см. гл. 13).

Остается еще один вопрос, заслуживающий внимания. Не весь свет, падающий на границу двух сред, преломляется. Часть отражается, даже если обе среды прозрачны. То же самое происходит с волнами. На рис. 16.14 интенсивность отраженных волн довольно мала, но при пристальном рассматривании рисунка они заметны. Отсюда следует, что во всем, что связано с поведением на границе двух сред, волны обнаруживают все свойства, необходимые для объяснения поведения света.

16.6. Дисперсия

В предыдущем разделе рассматривалось преломление периодических волн при их переходе из одной среды в другую. Оказалось, что показатель преломления равен отношению скоростей распространения волн в двух средах: $n_{12} = v_1/v_2$. О частоте волн при этом не упоминалось, так как еще раньше было указано, что скорости распространения волн зависят только от свойств сред, в которых происходит распространение. В соответствии с этим естественно было бы ожидать, что мы будем получать один и тот же показатель

преломления при повторных опытах с волнами разных частот, но с одной и той же парой сред, например с водой в кювете при двух постоянных глубинах.

То, что наблюдается в действительности, показано на рис. 16.16 и 16.17. На рис. 16.16 мы видим преломление волн низкой частоты (большой длины волны). Чтобы показать направление гребней преломленных волн, на экран кюветы был положен стержень. Для волн данной длины он в точности параллелен гребням. Затем частота была повышена (т. е. длина волны уменьшена) без перемещения стержня. Как видно из рис. 16.17, гребни преломленных волн оказались уже не параллельными стержню. Волны большей частоты претерпевают преломление под углом, несколько отличным от угла

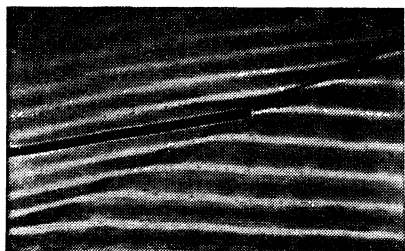


Рис. 16.16. Преломление волн низкой частоты. Черный стержень расположен параллельно гребням преломленных волн.

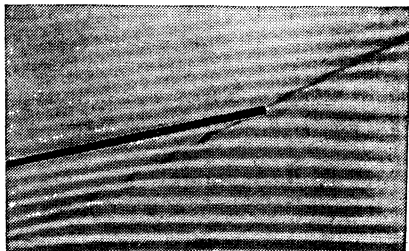


Рис. 16.17. Преломление высокочастотных волн. Гребни и впадины преломленных волн не параллельны черному стержню.

преломления волн меньшей частоты, хотя угол падения в обоих случаях одинаков. Таким образом, показатель преломления двух сред в какой-то степени зависит от частоты волн. По аналогии с зависимостью показателя преломления от цвета падающих световых лучей, рассмотренной в разделе 13.8, это явление названо *дисперсией*. Поскольку показатель преломления равен отношению скоростей распространения волн в двух средах, приходится признать, что скорость должна зависеть от частоты по меньшей мере в одной из двух сред; иначе отношение скоростей не зависело бы от частоты. Среда, в которой скорость распространения волн зависит от частоты, называется средой, обладающей дисперсией.

В волновой кювете можно изменять скорость периодических волн различных частот (см. раздел 16.4) и непосредственно устанавливать влияние частоты на скорость при условии достаточной точности измерений. Поэтому нередко высказываемое утверждение, что скорость волн зависит только от среды, является идеализацией. Когда нас не интересуют небольшие изменения скорости, эта идеализация может рассматриваться как хорошее приближение к истинному положению дел (см. раздел 15.5).

Подобная идеализация была допущена в нашем исследовании преломления света в гл. 13. Напомним, что показатель преломления

света сначала рассматривался как зависящий только от свойств двух сред, через которые проходит свет, например воздуха и стекла. Затем более углубленное рассмотрение преломления, а именно преломления в призмах, показало, что показатель преломления слегка изменяется при изменении цвета: для фиолетового света он несколько больше, чем для красного.

Показатель преломления волн слегка изменяется при изменении частоты. Не существует ли связи между зависимостью показателя преломления волн от частоты и зависимостью показателя преломления света от цвета? Соблазнительно сделать предположение, что свет представляет собой периодические волны и что различные цвета соответствуют волнам различных частот. На данном этапе нашего исследования мы еще не в состоянии доказать правильность этого предположения, но в следующей главе мы познакомимся с методом измерения длин волн света различных цветов. Тогда мы сможем определить соответствующие частоты и установить, что световые волны различных частот воспринимаются глазом как свет различных цветов *).

16.7. Дифракция

Наше исследование преломления и дисперсии ясно показывает, что там, где корпускулярная теория света оказывается несостоятельной, волновая теория успешно объясняет свойства света. Од-

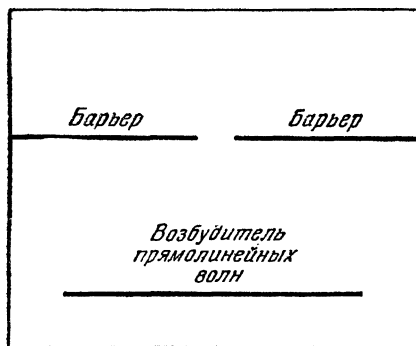


Рис. 16.18. Схема волновой кюветы для опыта, показанного на рис. 16.19.

нако корпускулярная модель света правильно предсказывает, что свет от точечных источников должен распространяться прямолинейно и отбрасывать резкие тени. Могут ли эти свойства света быть объяснены также и с помощью волновой модели? Соответствующие опыты с волновой кюветой дают возможность выяснить и эти вопросы. Воспользуемся возбудителем прямолинейных волн и параллельными ему двумя барьерами с зазором между ними (рис. 16.18). Эти барьеры должны были бы давать резкие тени, если бы со стороны

возбудителя волн на них падал свет. То, что в действительности происходит, когда возбудитель посылает прямолинейные периодиче-

*) Сравнивая преломление волн на рис. 16.16 и 16.17 с дисперсией света в стекле (см. рис. 13.15), мы могли бы прийти к заключению, что длина волны фиолетового света больше, чем красного. Однако голубой свет преломляется сильнее красного не во всех средах. В некоторых средах происходит обратное. Поэтому исследование дисперсии водяных волн не позволяет установить однозначную связь между цветом и длиной световых волн.

ские волны с длиной волны λ , показано на рис. 16.19. В средней части волновой картины, за линией зазора между барьерами, гребни волн имеют вид почти прямых линий. Но по бокам они загибаются, создавая впечатление круговых волн, исходящих от краев зазора. Это означает, что после прохождения через зазор или отверстие волны не только распространяются в первоначальном направлении. Они также и загибаются. Это явление называется *дифракцией*.

Дифракция волн крайне затрудняет объяснение прямолинейности распространения света при помощи волновой модели. Если свет представляет собой волны, то при прохождении через небольшое отверстие часть света должна загибаться, вместо того чтобы проходить прямо вперед. Волновая модель света должна предусматривать по меньшей мере одно большое различие между световыми и водяными волнами.

В чем могло бы состоять это различие? Нам известны длины волн λ водяных волн, но не известны длины световых волн; те и

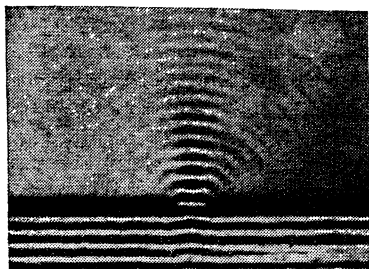


Рис. 16.19. Прямолинейные волны, прошедшие через зазор. Обратите внимание на загибание волн за краями барьеров.

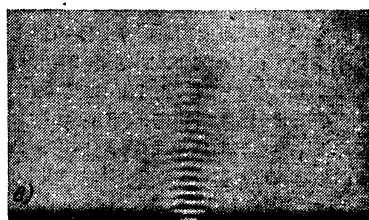
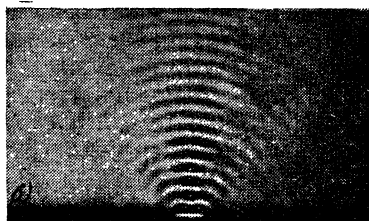
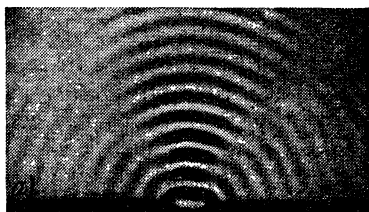


Рис. 16.20. Три случая прохождения первоначально прямолинейных волн через одно и то же отверстие. Загибание волн заметно ослабевает с уменьшением длины волны.

другие могут существенно отличаться. Поэтому целесообразно исследовать дифракцию водяных волн различной длины. На рис. 16.20 показаны три картины прохождения периодических волн различной длины через одно и то же отверстие. Можно заметить определенную тенденцию. На рис. 16.20, а длина волны составляет 0,6 от ширины отверстия w . В этом случае прямолинейные волны, проходящие через отверстие, практически полностью превращаются в круговые волны. Иными словами, отверстие действует как источник круго-

вых волн, хотя на него падают прямолинейные волны. На рис. 16.20, б $\lambda=0,3\omega$. В данном случае прошедшие волны меньше искривлены, чем на рис. 16.20, а. У них имеются прямолинейные отрезки гребней, но боковые части все же загибаются. На рис. 16.20, в $\lambda=0,1\omega$. Здесь загибание сходит на нет около крайних прямолинейных «лучей», т. е. перпендикуляров к гребням, проведенных через края отверстия; таким образом, здесь образуются почти резкие края теней, отбрасываемых экраном. Если сохранить ширину отверстия ω , то дальнейшее уменьшение λ делает тени еще более резкими.

Можно также поддерживать длину волны постоянной и изменять ширину зазора ω , тогда оказывается, что степень загибания прошедших волн зависит не от ω или λ в отдельности, а от отношения λ/ω . Короче говоря, волны сильно дифрагируют, проходя через отверстия, размеры которых соизмеримы с длиной волны; в случаях же, когда длина волны весьма мала по сравнению с размерами отверстия, дифракция выражена очень слабо.

Все мы знаем, что при прохождении сквозь замочную скважину свет не испытывает заметного загибания и проходит дальше по первоначальному направлению. Если свет представляет собой волны, то это означает, что длина световых волн должна быть гораздо меньше ширины замочной скважины. Однако чтобы окончательно удостовериться в том, что свет — это периодические волны, необходимо произвести такой опыт, который обнаружил бы дифракцию света. Два таких опыта были описаны в разделе 11.7. Повторим опыт по наблюдению за прохождением света через узкую щель между двумя пальцами. Когда ширина щели составляет около 0,5 см, удлиненный тонкий источник света, наблюдаемый через щель, имеет нормальный вид. Но когда щель сужена примерно до 0,1 мм, источник света как бы растягивается поперек щели. Кроме того, если поворачивать руку со сложенными пальцами вокруг лучей света как вокруг оси, то кажущееся растяжение источника будет во всех положениях пальцев сохранять направление, перпендикулярное к щели. Это — явный признак дифракции света на щели.

Можно извлечь из наших опытов со светом некоторые дополнительные сведения, если еще раз вернуться к рис. 16.20. Изучение этого рисунка подсказывает объяснение факта, отмеченного в гл. 11, что края всех теней даже крупных препятствий слегка размыты дифракцией. Даже на рис. 16.20, в, где $\lambda/\omega \approx 0,1$, гребни волн несколько загибаются за края теней. Если наблюдать эти волны на некотором расстоянии от щели, то результатом загибания будет расширение области, в которую попадают волны. Поскольку при ширине щели порядка 0,1 мм мы только едва начинаем замечать дифракцию света, можно сделать заключение, что длина световых волн еще значительно меньше этой величины.

Короче говоря, на основании содержания этой главы свет может рассматриваться как волны очень малой длины.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

1*. Если в кювете, изображенной на рис. 16.2, горизонтально расположить стержень длиной 10 см, то какова приблизительно была бы длина его тени? (Раздел 16.1.)

2*. Если на рис. 16.7 $i=25^\circ$, то чему равно r' ? (Раздел 16.3.)

3*. На рис. 16.21 жирные линии изображают гребни, а стрелки указывают направления распространения волновых импульсов.

а) Какой из волновых импульсов падающий и какой отраженный?

б) Чему равен угол падения? (Раздел 16.3.)

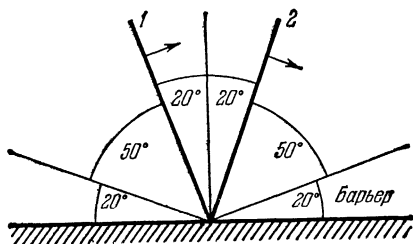


Рис. 16.21. К задаче 3*.

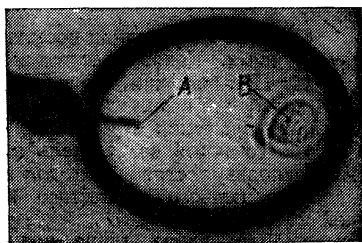


Рис. 16.22. К задаче 7.

4. Прямолинейный волновой импульс подходит к барьеру под углом 30° . Каково будет направление движения импульса после отражения? Покажите его на схеме.

5. Где расположен на рис. 16.9 «источник» падающих волн и где находится «мнимый источник» отраженных волн?

6. Опишите волновое движение, вызванное погружением пальца в воду в центре круглого таза. Каково будет движение в идеальных условиях?

7. Воспользуемся барьером в виде эллипса в волновой кювете (рис. 16.22). При возбуждении кругового импульса, расходящегося из точки A , он отражается от барьера и сходится к точке B .

а) Что можно сказать на этом основании о геометрических свойствах эллипса? (Рассмотрите очень короткие отрезки гребней, расходящихся из A , и выясните, как должен быть построен эллипс, чтобы все упомянутые отрезки одного гребня, расходящегося из A , сходились к точке B одновременно.)

б) Что произойдет, если волновой импульс будет возбуждаться в точке B ?

в) Произойдет ли такое же сходжение при погружении пальца в какой-либо точке, отличной от A и B ?

8. Сферический волновой импульс, возбужденный в фокусе параболического рефлектора, отражается в виде плоского импульса. О чем это говорит с точки зрения геометрических свойств параболы.

(Рассмотрите короткие отрезки кругового импульса, образующегося в фокусе и выясните, какова должна быть форма параболы, чтобы получался прямолинейный импульс.)

9. Прямолинейный волновой импульс подходит к прямоугольному барьеру, перемещаясь по направлению биссектрисы барьера, как указано на рис. 16.23.

а) Как он отразится?

б) Что произойдет, если та же волна будет подходить к барьеру под другим углом?

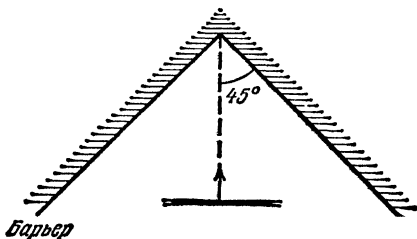


Рис. 16.23. К задаче 9.

10*. Пулемет делает 10 выстрелов в секунду. Скорость пули составляет 850 м/с.

а) На каком расстоянии друг от друга летят пули?

б) Что произойдет с этим расстоянием, если выстрелы учащаются? (Раздел 16.4.)

11*. Источник волн порождает 12 волновых импульсов за 3 секунды. Чему равны его период и частота? (Раздел 16.4.)

12*. Следует ли увеличить или уменьшить частоту источника волн в волновой кювете, чтобы увеличить длину волны? (Раздел 16.4.)

13. а) В волновой кювете при посылке по одному импульсу через каждые 0,1 с длина волны оказывается равной 3 см. Какова скорость распространения волн?

б) В тех же условиях посылаются два волновых импульса с интервалом 0,5 с между ними. Каково расстояние между ними?

14. Предположим, что вы наблюдаете периодические волны, имеющие частоту $f=4$ колебания в секунду, сквозь двухщелевой стробоскоп. Что вы ожидаете увидеть при вращении стробоскопа с частотами 1, 2 и 4 об/с?

15. Точечный возбудитель вызывает в кювете круговые периодические волны. Используя стробоскоп для кажущейся остановки волн, измеряем разность радиусов первого и шестого круговых гребней, которая оказывается равной 10 см.

а) Чему равна длина волны?

б) Почему мы не вычисляем длину волны, используя радиус только одного кругового гребня, например шестого?

в) Почему мы прибегали к методу измерения длины волны, описанному в условии задачи, вместо измерения расстояния между соседними гребнями?

16. В волновой кювете круговые волны возбуждаются каплями воды, падающими с постоянной частотой. Наблюдаемая длина волны составляет 1,2 см. Опыт повторяется при равномерном перемещении источника капель по средней линии кюветы от одного ее конца к другому. Наблюдатель, находящийся у конца кюветы, к которому движется источник, измеряет длину волны и находит ее равной 0,8 см.

а) Каково отношение скорости распространения волн к скорости перемещения их источника?

б) Чему равна длина волны, измеряемая у начала кюветы после того, как источник успел отойти на некоторое расстояние?

17*. Где находится на рис. 16.13 граница между глубокой и мелкой областями? (Раздел 16.5.)

18*. Определите показатель преломления при переходе от глубокой к мелкой части кюветы на рис. 16.13. (Раздел 16.5.)

19. Найдите показатель преломления на рис. 16.14:

а) методом, использованным в предыдущей задаче;

б) определением отношения синусов соответствующих углов. Сравните результаты обоих методов.

20*. Если бы при переходе периодических волн из глубокой в мелкую часть кюветы частота изменялась, то мог бы стробоскоп одновременно делать неподвижным изображения всех волн? (Раздел 16.5.)

21. Волны проходят от мелкой к глубокой части кюветы с углом падения 45° и углом преломления 60° .

а) Найти отношение скоростей распространения волн в этих частях кюветы.

б) Если в глубокой части кюветы скорость волн составляет 25 см/с, чему она равна в мелкой части?

22. а) Длина окружности автопокрышки по ее поверхности трения составляет 2,1 м. Во время движения автомобиля эта покрышка делает 200 об/мин. Чему равна при этом скорость автомобиля в м/мин?

б) Световые волны с частотой $6 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ проходят через жидкость, в которой их длина равна $3 \cdot 10^{-5} \text{ см}$. Найти скорость света в этой жидкости.

в) Какова длина волны в вакууме, по которой вычислялась частота, указанная в вопросе п. б)?

г) Определить показатель преломления жидкости, указанной в вопросе п. б).

23. Волновая кювета устроена так, что глубина воды в ней плавно уменьшается от одного бокового края к другому. Вследствие этого скорость распространения волн также изменяется от края к краю, и возбужденные прямолинейные волны

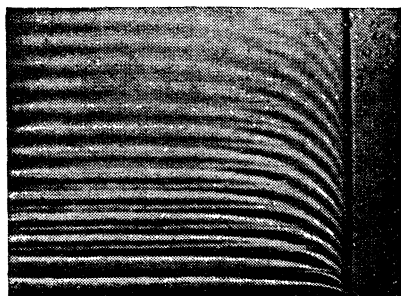


Рис. 16.24. К задаче 23.

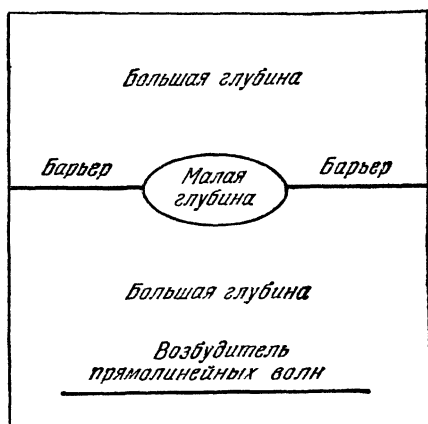


Рис. 16.25. К задаче 25

приобретают кривизну (рис. 16.24). Показанные на фотоснимке волны движутся от нижнего края снимка к верхнему.

а) С какой стороны кювета мельче?

б) Возможно ли аналогичное явление со светом? Подготовьтесь к ответу в классе.

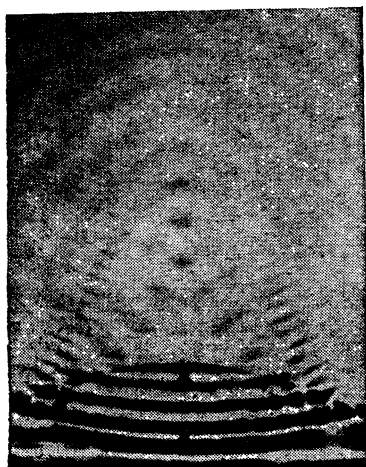


Рис. 16.26. К задаче 25.

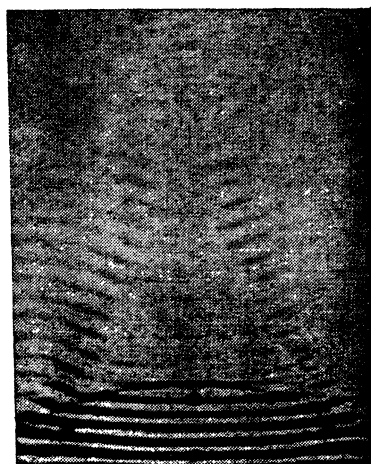


Рис. 16.27. К задаче 26.

24. Гребни волн, распространяющихся в глубокой части кювета со скоростью 34 см/с, подходят к границе мелкой части, образуя с ней угол 60° . В мелкой части волны имеют скорость 24 см/с. При небольшом увеличении частоты волны в глубокой части приобретают скорость 32 см/с.

а) Вычислить угол преломления для каждого случая.

б) Что проще в условиях опытов в волновой кювете: непосредственно измерить скорости в двух случаях, чтобы найти их разность, или использовать для нахождения этой разности данные, полученные по п. а)?

в) Как можно обнаружить малые разности в скоростях света?

25. Подготавливается волновая кювета с деталями, изображенными на рис. 16.25, после чего возбуждаются волны с прямыми гребнями. Получающаяся волновая картина сфотографирована (рис. 16.26). В овальной области между барьерами глубина мала. Остальная часть кюветы глубже.

а) Объясните, что происходит в кювете.

б) Моделью какого оптического прибора может служить это устройство?

26. На рис. 16.27 приведен фотоснимок, полученный в тех же условиях, что и в задаче 25 (рис. 16.26), если не считать укорочения длины волны.

а) В чем основное различие, наблюдаемое на рис. 16.26 и 16.27?

б) К какому заключению приводит это различие?

27. Допустим, что овальная область на рис. 16.25 глубже остальных частей кюветы.

а) Что произойдет с прямыми волнами?

б) Какому оптическому устройству это соответствует?

28. Откуда мы знаем, что длины волн света должны быть во много раз меньше сантиметра?

29. Представьте себе, что получилось бы, если бы наши глаза были чувствительны только к длинам волн в $0,1$ мм. Как это отразилось бы на нашей зоркости? Могли бы вы тогда продеть нитку в иголку?

30. Если считать, что звук — волновой процесс, то как объяснить общеизвестный факт, что звук можно слышать из-за угла?

31. Звуковые волны распространяются в воздухе обычно со скоростью около 330 м/с. Слышимые звуки заключаются в пределах от 30 до $15\,000$ колебаний в секунду. Определить пределы длин волн слышимых звуков.

17.1. Интерференция волн на пружине

В гл. 16 мы изучали свойства волн, чтобы выяснить, не могут ли они объяснить простейшие свойства света. Еще раньше было выяснено, как происходит отражение света от зеркал, и оказалось, что волны подчиняются тому же закону отражения. Было также выяснено, как происходит преломление при переходе света из одной среды в другую. Оказалось, что преломление волн следует тому же закону Снеллиуса, что и преломление света.

В последнем разделе предыдущей главы мы вспомнили, что свет распространяется прямолинейно и дает резкие тени стоящих на его пути препятствий. Затем мы занялись опытами с волнами в кювете и установили, что при прохождении через отверстия водяные волны дифрагируют. При этом оказалось, что дифракция ослабевает при уменьшении длины волны, хотя и не исчезает полностью. Поэтому мы изменили наш подход к дифракции: мы вернулись к свету и обнаружили, что свет тоже дифрагирует при прохождении через достаточно узкие щели. Это — довольно убедительная демонстрация волновой природы света. В данной и следующей главах мы будем развивать этот последний подход, т. е. продолжим подробное экспериментальное исследование свойств волн, а затем будем повторять аналогичные опыты для света.

Одним из самых замечательных результатов опытов с волнами на пружинах, описанных в гл. 15, было то, что два волновых импульса, перемещающихся в противоположных направлениях, проходят друг через друга. Сложная форма той части пружины, через которую проходят импульсы при своей встрече, могла быть объяснена сложением смещений от отдельных импульсов (принцип суперпозиции). Например, рис. 15.9 изображает последовательные формы изгиба пружины в процессе встречи, взаимного проникновения и расхождения двух противоположных волновых импульсов. Точка P , средняя по отношению к двум импульсам, остается в покое, так как в этой точке сложение смещений от обоих импульсов приводит к их взаимной компенсации в любой момент во время их взаимодействия. Это поведение двух противоположных импульсов довольно трудно наблюдать ввиду малой длительности их взаимного пересечения. Взаимное уничтожение смещений легче наблюдать при использовании периодических волн.

При распространении периодических волн по спиральной пружине, закрепленной на одном конце, каждый отдельный волновой импульс отражается в перевернутом виде. Кроме того, мы можем утверждать, что каждый отраженный импульс взаимодействует с каждым встречным импульсом.

Рассмотрим сначала только два импульса a и b , расстояние между гребнями которых во время их движения в одну сторону составляет длину волны λ (рис. 17.1). Через некоторое время после отражения первого импульса он

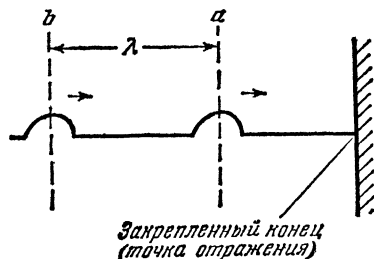


Рис. 17.1. Два волновых импульса движутся по направлению к отражающему концу пружины.

будет приближаться ко второму, причем в их общей средней точке P будет иметь место взаимное гашение смещений (рис. 17.2). На рис. 17.3 импульсы показаны уже во время их взаимного пересечения. Поскольку интервал между ними до отражения был λ , легко понять, что после отражения первого импульса точка P будет все время находиться на расстоянии

$\frac{1}{2} \lambda$ от отражающего конца. Третий импульс, c , достигающий неподвижной точки P позже, будет взаимодействовать с отраженным импульсом b , причем в P опять будет происходить полное взаимное уничтожение смещений от импульсов b и c . Поскольку волны являются периодическими, это будет происходить всякий раз при прохождении очередного импульса через точку P , причем, хотя

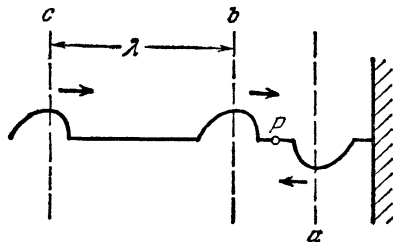


Рис. 17.2. Вид пружины после того, как один из волновых импульсов претерпел отражение. Отраженный импульс a перевернут (на 180°) и движется навстречу падающему импульсу b . Третий импульс c приближается, находясь на расстоянии λ от b .

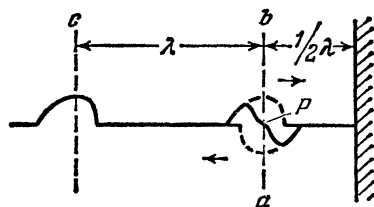


Рис. 17.3. Встреча волновых импульсов a и b (показанных на рис. 17.1 и 17.2) в точке P .

деформации пружины и сложны, точка P все время будет оставаться в покое. Такая точка называется *узлом*. На пружине будут и другие узлы, расположенные через интервалы в $\frac{1}{2} \lambda$, в чем можно убедиться, рассчитав расположение нескольких следующих узлов (например узла, в котором взаимно уничтожаются смещения от a и c).

Ясно, что мы с таким же успехом могли бы получить узлы, посылая соответствующие периодические волны с обоих концов пружины.

жины навстречу друг другу. Закрепление одного конца пружины, как средство возбуждения встречных волн, используется лишь для упрощения эксперимента.

Описанное явление взаимного наложения (суперпозиции) периодических волн с образованием системы узлов называется *интерференцией* волн. Вместо того чтобы пытаться сразу подыскать соответствующий световой эффект, мы сначала продолжим систематическое исследование интерференции водяных волн в волновой кювете. После этого мы займемся поисками интерференционных эффектов в световых явлениях.

17.2. Интерференция волн, посылаемых двумя точечными источниками

Исследуя интерференцию волн в волновой кювете, используем два точечных источника, возбуждающих круговые волны. Пусть они располагаются на расстоянии d друг от друга и возбуждают волновые импульсы с одинаковой частотой. Кроме того, пусть они погружаются в воду одновременно и, следовательно, порождают гребни волн тоже одновременно. В таких случаях говорят, что источники находятся в одной фазе (синфазны). Волны, порождаемые такими источниками, могут изображаться двумя семействами концентрических окружностей с центрами на расстоянии d друг от друга (рис. 17.4). Каждая окружность изображает гребень волны, расходящейся от своего источника. Поскольку источники посылают периодические волны, гребни везде расположены на одинаковом расстоянии, равном длине волны λ . Интервалы между гребнями одинаковы в обоих семействах, так как оба источника возбуждают волны одинаковой длины. Радиусы соответственных гребней обоих семейств равны, так как возбудители колеблются с одинаковой фазой.

Что происходит, когда волны от двух источников перекрываются? Попытаемся предсказать вид результирующей волновой картины, используя принцип суперпозиции. Там, где пересекаются два гребня, должен образоваться «удвоенный гребень». На экране волновой кюветы подобные «удвоенные гребни» должны образовывать яркие участки. На рис. 17.5, *а* эти яркие участки для ясности *зачернены*. Там, где гребень от одного источника пересекает впадину от другого, вода остается практически невозмущенной и на экране получается серое изображение. В каждом из соответствующих мест на рис. 17.5, *а* поставлено несколько точек для изображения *серого цвета*. Наконец, там, где пересекаются две впадины, на экране образуются самые темные места. На рис. 17.5, *а* эти места оставлены *незаштрихованными*. На рис. 17.5, *б* отсутствуют линии геометрических построений; оставлена только картина, которую мы ожидаем увидеть на основании описанных построений. Таким образом, взаимное наложение волн, показанных на рис. 17.4, должно привести к картине, показанной на рис. 17.5, *б*. Подлинный фотоснимок волн, полученных от двух точечных источников, доказывает правильность наших предсказаний (рис. 17.6).

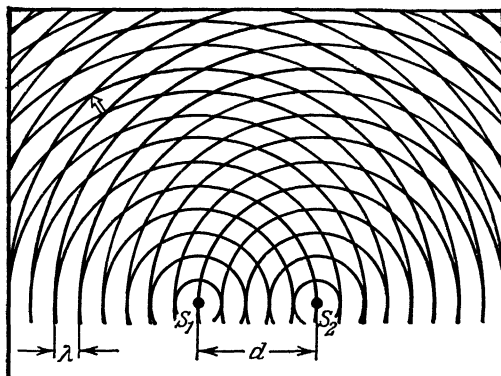


Рис. 17.4. Окружности изображают гребни волн, порождаемых двумя источниками S_1 и S_2 , разделенными расстоянием d . Источники являются периодическими и колеблются с одинаковой фазой. Контурная стрелка отмечает область, которая будет рассмотрена позже (на рис. 17.7).

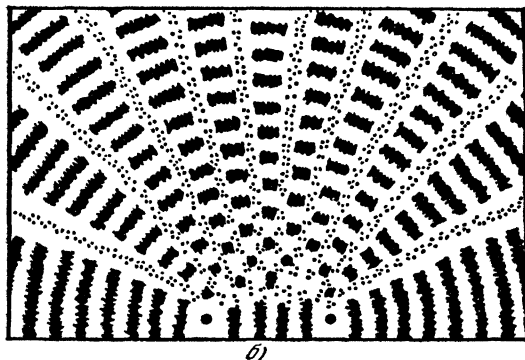
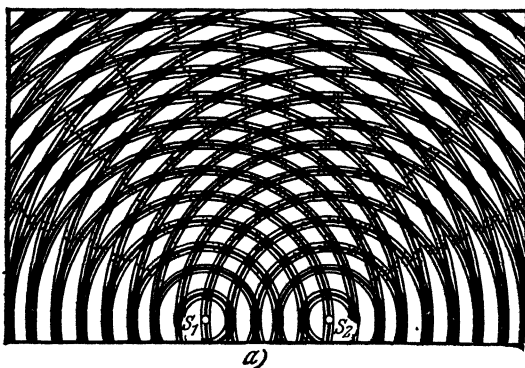


Рис. 17.5. Интерференционная картина, предсказываемая на основании принципа суперпозиции волн, возбужденных двумя точечными источниками, которые показаны на рис. 17.4. Самые светлые места соответствуют точкам, в которых встречаются два гребня; в менее светлых местах поверхность воды находится в покое там, где гребень встречает впадину; самые темные места соответствуют встрече двух впадин.

Только что была построена интерференционная картина по принципу суперпозиции волн, исходящих от двух источников. Мы установили, что в некоторый момент предсказанная картина согласуется с тем, что мы видим на подлинном фотоснимке. Теперь выясним, как перемещаются линии на интерференционной картине. Начнем с выяснения того, как движется «удвоенный гребень» волн. На рис. 17.7 показаны два гребня волн, точка пересечения которых образует «удвоенный гребень», совпадающий с задним концом контурной стрелки на рис. 17.4. Пунктирные дуги на рис. 17.7 обозначают те же два гребня немного позже. Каждый гребень отодвинулся от своего источника; в результате этого «удвоенный

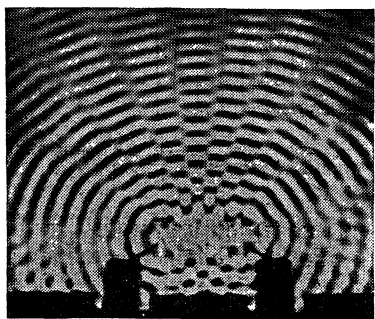


Рис. 17.6. Фотоснимок интерференционной картины, создаваемой двумя синфазными точечными источниками волн. Обращают на себя внимание узловые линии, расположенные вдоль радиусов (ср. с рис. 17.5, б).

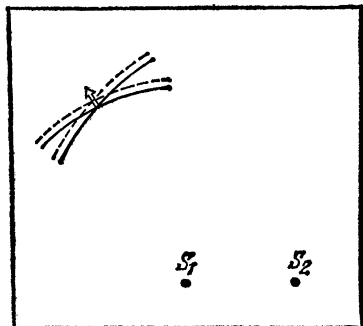


Рис. 17.7. Сплошные линии изображают гребни, пересечение которых дает «удвоенный гребень», соответствующий заднему концу стрелки на рис. 17.4. Пунктирные дуги изображают те же гребни через некоторое время.

гребень» также сдвинулся в направлении стрелки. За период T гребень каждой волны каждого источника отодвинется от источника на длину волны λ , а «удвоенный гребень» продвинется от заднего до переднего конца стрелки (рис. 17.4). По всей кювете движение «удвоенных гребней» и «удвоенных впадин» имеет одинаковый центробежный характер. Следовательно, каждая цепочка чередующихся «удвоенных гребней» и «удвоенных впадин» движется от области расположения источников, около которых в то же время возникают новые «удвоенные гребни» и «удвоенные впадины». Каждая такая цепочка имеет волнообразный профиль.

Что же, однако, происходит на «серых» участках, расположенных между упомянутыми волнообразными цепочками (рис. 17.5, а)? Здесь гребни все время располагаются над впадинами и поверхность воды не волниста. Чтобы понять, почему это так, рассмотрим какую-нибудь линию, расположенную между волнистыми цепочками. Выберем на рис. 17.5, а одно из серых пятен, обозначенных точками. Начнем с какого-нибудь гребня от источника S_1 . Поскольку

он расположен на впадине от источника S_2 , поверхность воды не испытывает результирующего смещения. Вода практически не возмущена. Затем удалимся от источников вдоль «серой» линии. При этом мы спускаемся с гребня волны от S_1 , но поднимаемся из

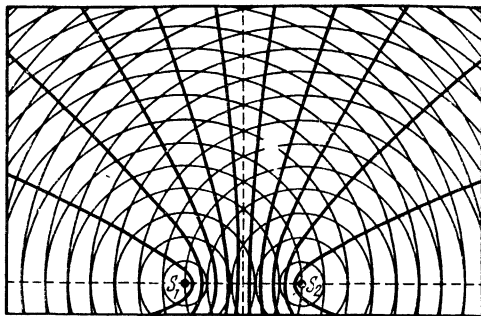


Рис. 17.8. Узловые линии в случае двух точечных источников. Между узловыми линиями движутся чередующиеся «удвоенные гребни» и «удвоенные впадины».

впадины волны от S_2 . Поскольку волны почти симметричны, так что впадина выглядит как перевернутый гребень, сложение перемещений от двух волн все время дает результирующее смещение, равное нулю. Продолжая наше исследование по той же системе, мы спу-



Рис. 17.9. Интерференционная картина волн от двух точечных источников, отличающаяся от рис 17.6 только большей длиной волны.

скаемся во впадину от S_1 , но выходим на гребень от S_2 . Смещения вверх и вниз по-прежнему взаимно уничтожаются. Таким образом, продолжая начатое исследование вдоль той же «серой» линии, мы все время будем иметь дело с практически невозмущенной поверхностью. Глядя на рис. 17.6 (или еще лучше, на поверхность волновой кюветы), можно видеть эти линии невозмущенной воды, расходящиеся наружу от зоны источников и разделяющие движущиеся волнообразные цепочки чередующихся взаимно усиленных гребней и впадин. По аналогии с узлами на спиральной пружине, эти линии

невозмущенных участков называются *узловыми линиями*. На рис. 17.8 они изображены в виде жирных сплошных линий.

При изменении длины волны или расстояния между источниками детали интерференционной картины изменяются, но общая структура системы линий остается прежней. Фотоснимок интерференционной картины при большей длине волны показан на рис. 17.9.

Здесь опять можно видеть узловые линии и движущиеся между ними волны. Волны слегка размыты, так как время выдержки составляло $\frac{1}{60}$ с, а за это время волны успели продвинуться на значительную долю длины волны.

Хотя выше мы рассматривали именно волны, образующиеся на поверхности воды, мы не использовали для нашего вывода никаких специфических свойств воды. Мы основывались лишь на принципе суперпозиции, который применим к любым волнам. Поэтому выводы всей этой главы с одинаковым успехом применимы ко всем видам волн.

17.3. Форма узловых линий

Изучая интерференционные картины на рис. 17.6 и 17.9, мы замечаем, что, хотя вблизи источника узловые линии слегка искривлены, с удалением от источников они вскоре совершенно выпрямляются. Другой бросающийся в глаза факт заключается в том, что число узловых линий уменьшается с увеличением длины волны. Для облегчения дальнейшего обсуждения интерференционных картин пронумеруем узловые линии таким образом, чтобы затем было удобно на них ссылаться. Для этого вернемся еще раз к рис. 17.8 и удостоверимся, что картина симметрична, т. е. выглядит совершенно одинаково справа и слева от центральной прерывистой линии. Поэтому достаточно пронумеровать половину узловых линий, например те, которые расположены в правой половине картины. В соответствии с этим первую узловую линию справа от центральной (прерывистой) назовем первой узловой линией. Следующую назовем второй узловой линией и т. д. Когда же мы хотим говорить об одной из узловых линий, но нас не интересует ее порядковый номер, будем называть ее n -й узловой линией, где n есть целое число (1, 2, 3 и т. д.).

Обозначим буквой P произвольно выбранную точку на первой узловой линии и соединим ее прямыми PS_1 и PS_2 с источниками (рис. 17.10). Каждая из этих прямых является длиной пути от источника до данной точки. Сосчитав число гребней на длине каждого из двух рассматриваемых путей на рис. 17.10, мы убедимся, что $PS_1 = 3\lambda$ и $PS_2 = \frac{5}{2}\lambda$, так что *разность хода* (т. е. разность длин путей) равна $PS_1 - PS_2 = \frac{1}{2}\lambda$. Выбрав любую другую точку на первой узловой линии, мы получили бы такую же разность хода, т. е. $\frac{1}{2}\lambda$. Таким образом, можно сказать, что первая узловая линия проходит через все точки P , для которых разность хода от двух источников равна $\frac{1}{2}\lambda$, так что некоторый определенный гребень и некоторая определенная впадина попадают в любую из точек этой узловой линии одновременно.

Вторая узловая линия может характеризоваться аналогичным образом. Если P является произвольной точкой второй узловой линии, то разность хода равна

$$PS_1 - PS_2 = \frac{3}{2}\lambda,$$

в чем также можно убедиться на рис. 17.10. Продолжая эти рассуждения, мы приходим к уравнению, описывающему n -ю узловую линию:

$$PS_1 - PS_2 = (n - \frac{1}{2})\lambda.$$

Пользуясь этим уравнением, можно строить любую n -ю узловую линию, находя точки пересечения дуг окружностей радиуса r , имеющих центр в S_2 , с дугами окружностей радиуса $r + (n - \frac{1}{2})\lambda$, имеющих центр в S_1 (рис. 17.11)

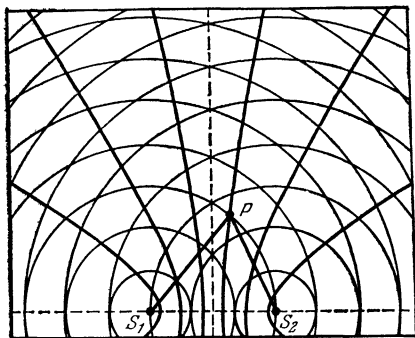


Рис. 17.10. Первая узловая линия. Для любой точки P на этой линии разность хода от S_1 до P и от S_2 до P равна полуволне.

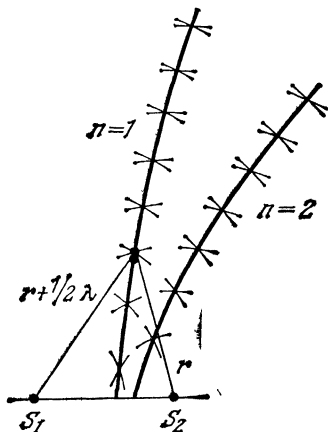


Рис. 17.11. Построение узловой линии. Дуги окружностей с радиусами r и $r + (n - \frac{1}{2})\lambda$ проведены вокруг двух соответствующих точечных источников. Узловая линия проходит через точки пересечения этих дуг. Проведены первая и вторая узловые линии: $n=1$ и $n=2$.

17.4. Длины волн, расстояния между источниками и углы

В волновой кювете можно измерить путь до любой точки на узловой линии. Используя при этом уравнение

$$PS_1 - PS_2 = (n - \frac{1}{2})\lambda,$$

можно определить и длину волны λ . Для таких измерений нет надобности останавливать волны. Во время измерений отрезков PS_1 и PS_2 узловые линии остаются в покое.

Иногда бывает удобно и даже необходимо произвести измерения для точки P , далекой от S_1 и S_2 . Но если непосредственно измерить два больших расстояния PS_1 и PS_2 и вычесть одно из другого для определения их малой разности, то точность окажется слишком малой. Можно даже совсем не определить эту разность, получив вместо разности лишь величину ошибки измерений (см. раздел 3.7). Необходимо поэтому искать более точный метод определения разности хода.

Для любой точки P , достаточно удаленной от источников, разность хода $PS_1 - PS_2$ зависит от угла между PS_1 и d . Рассмотрим на

рис. 17.12, а схему расположения двух источников S_1 и S_2 и точки P , удаленной на большое расстояние по сравнению с расстоянием между источниками d . На прямой PS_1 отложен отрезок PA , равный расстоянию PS_2 , так что углы 1 и 2 равны, причем $PS_1 - PS_2 = AS_1$. Чем дальше расположена точка P , тем с большим правом можно рассматривать прямые PS_1 и PS_2 как параллельные. Ограничимся рассмотрением точек P , настолько удаленных от S_1 и S_2 , что прямые PS_1 и PS_2 можно считать практически параллельными. Этому условию соответствует рис. 17.12, б. Поскольку углы 1 и 2 стали прямыми, треугольник AS_1S_2 является прямоугольным. Отсюда, по определению синуса угла,

$$AS_1/d = \sin\theta,$$

(угол θ показан на рис. 17.12, б). Учитывая, что AS_1 есть разность хода, получаем

$$PS_1 - PS_2 = d \sin\theta.$$

Это уравнение выражает разность хода через расстояние между источниками и угол. Угол θ определяет направление, в котором находится точка P по отношению к источникам. Например, при $\theta = 90^\circ$ точка P находится справа от источников на продолжении прямой, проходящей через оба источника. При $\theta = 0^\circ$ точка P находится против источников, на перпендикуляре, восстановленном из середины отрезка S_1S_2 (см. рис. 17.12, б).

Если P находится на n -й узловой линии, то

$$PS_1 - PS_2 = (n - \frac{1}{2})\lambda.$$

Следовательно,

$$(n - \frac{1}{2})\lambda = d \sin\theta_n, \text{ или } \sin\theta_n = (n - \frac{1}{2})\lambda/d$$

при условии, что P достаточно удалено от S_1 и S_2 .

Между прочим, этот результат означает, что на достаточно большом расстоянии от источников узловая линия не изменяет своего направления. Оно определяется углом θ_n . Таким образом, вдали от источников узловая линия должна быть прямой, как и было отмечено в предыдущем разделе. Если продолжить эти прямолинейные части узловых линий в сторону источников, то их продолжения сойдутся в средней точке между источниками.

В предыдущем разделе было также отмечено, что число узловых линий возрастает при уменьшении длины волны. Это легко увязать

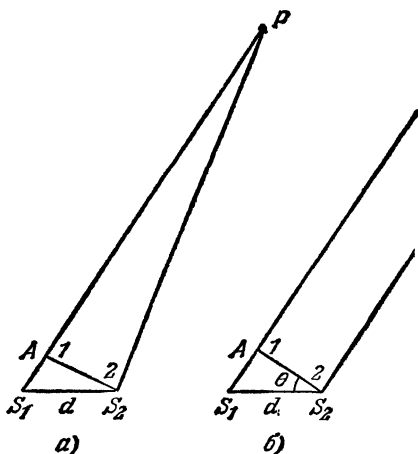


Рис. 17.12. Разность хода AS_1 может быть выражена через расстояние между источниками d и углы. При большом удалении P от источника $AS_1 = d \cdot \sin\theta$.

с последней формулой. $\sin \theta_n$ не может превышать единицу, значит, $(n - \frac{1}{2})\lambda/d$ не может быть больше единицы. Наибольшее значение n , удовлетворяющее этому условию, есть число узловых линий по каждую сторону от средней линии. Это число зависит только от λ/d и увеличивается с уменьшением λ . Поэтому можно приближенно вычислить длину волны, просто сосчитав половину общего числа узловых линий.

Для точного вычисления λ следует определить направление n -й узловой линии, т. е. угол θ_n , и вычислить λ из уравнения $\sin \theta_n = (n - \frac{1}{2})\lambda/d$. В волновой кювете θ_n определяется легко, но это относится не ко всем видам волн. Поэтому целесообразно поискать метод непосредственного измерения $\sin \theta_n$ без измерения самого угла θ_n . Допустим, что точка P на рис. 17.13 находится на n -й узловой линии вдали от источников S_1 и S_2 , так что прямые CP и S_1P практически параллельны друг другу и обе перпендикулярны к AS_2 . Поскольку средняя линия перпендикулярна к d , легко доказать, что $\theta'_n = \theta_n$. Но $\theta'_n = x_n/L$, где $L = PC$, а x_n является расстоянием от P до средней линии. Таким образом, имеем

$$(n - \frac{1}{2})\lambda/d = \sin \theta = \sin \theta' = x/L,$$

или

$$\lambda = d(x/L)/(n - \frac{1}{2}),$$

где индекс n при θ и x опущен, но следует помнить, что θ и x относятся к n -й узловой линии.

Покажем на примере, насколько проста процедура определения λ . Пусть расстояние между источниками составляет 10 см. Выберем точку P на третьей узловой линии и измерим ее расстояние L от средней точки C , а также ее расстояние x от средней линии. Допустим, что мы получим $L = 80$ см и $x = 48$ см. Отсюда $x/L = 0,6$. Точность этого результата может быть проверена путем измерения значений L и соответствующих значений x для других точек на третьей узловой линии. Если точки достаточно удалены, отношение x/L остается равным 0,6.

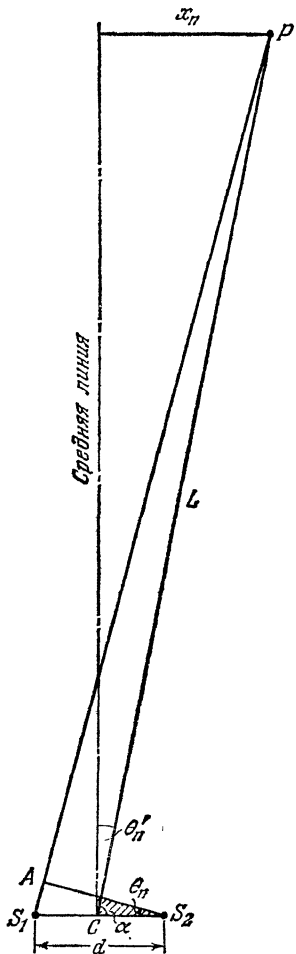


Рис. 17.13. Если точка P достаточно удалена от источников, $\theta_n + \alpha = 90^\circ$. Поскольку $\theta'_n + \alpha = 90^\circ$, $\theta_n = \theta'_n$. Кроме того, $\sin \theta'_n = x_n/L$, откуда $\sin \theta_n = x_n/L$.

Поскольку мы имеем дело с третьей узловой линией, то $n - \frac{1}{2} = \frac{5}{2}$, и при $d = 10$ см получаем

$$\lambda = d(x/L)/(n - \frac{1}{2}) = (10 \cdot 0,6)/(\frac{5}{2}) = 2,4 \text{ см.}$$

Используя несколько узловых линий, можно произвести ряд определений λ . Сходство результатов этих определений может служить проверкой правильности наших рассуждений и измерений.

17.5. Фаза

Два возбудителя водяных волн находятся в одинаковой фазе, если они каждый раз погружаются в воду одновременно, создавая гребни волн также одновременно. Но источники с одинаковым периодом не всегда находятся в одинаковой фазе. Один из источников может погружаться в воду несколько позже другого, например с постоянным временем запаздывания t . Поскольку естественной

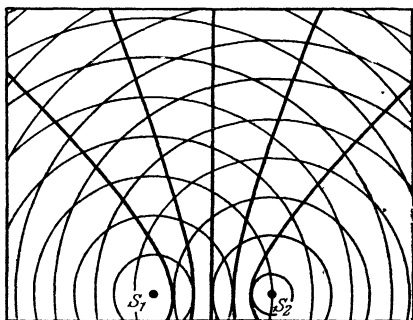
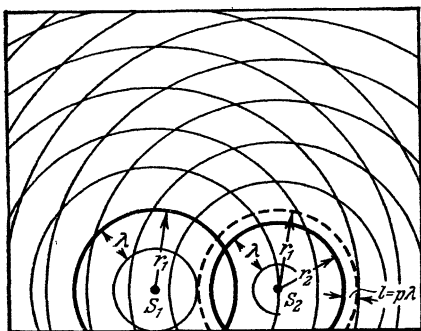


Рис. 17.14. Волны от двух точечных источников, не совпадающих по фазе: S_2 отстает по фазе на p от S_1 . Разность радиусов соответствующих гребней двух систем волн равна $l = r_1 - r_2 = p\lambda$.

Рис. 17.15. Расположение узловых линий при разности фаз $p = \frac{1}{2}$.

единицей времени для каждого определенного периодического движения служит его период T , целесообразно измерять время запаздывания между погружениями источников S_1 и S_2 в долях p периода T . Итак, используем для характеристики запаздывания величину $p = t/T$. Например, если каждый источник S_1 погружается через интервалы в $\frac{1}{6}$ с и S_2 каждый раз погружается на $\frac{1}{18}$ с позже, то $p = \frac{1}{3}$.

Когда источники одинаковой частоты не погружаются одновременно, мы говорим, что они не совпадают по фазе, или имеют *разность фаз*.

Дробь p характеризует отставание по фазе одного источника по отношению к другому. Отставаний, превышающих период, не бывает, так как отставание второго источника всегда измеряется с момента последнего погружения первого источника, а последовательные погружения происходят через интервалы времени T .

Поэтому отставание по фазе, выраженное в долях периода, не может превышать единицы; p всегда заключено между 0 и 1.

Воспользуемся теперь двумя точечными возбудителями волн, работающими таким образом, что S_2 отстает по фазе на p по сравнению с S_1 . Как будет тогда выглядеть интерференционная картина? Можно опять попытаться выяснить это графически, построив два семейства концентрических гребней круговых волн, исходящих от двух источников. Как и на рис. 17.4, в каждом семействе гребни отстоят друг от друга на длину волны λ . Но на этот раз источники различаются по фазе, и радиусы r_1 и r_2 соответственных гребней, исходящих от двух источников, не равны (рис. 17.14). Радиусы запаздывающих гребней от S_2 меньше соответствующих радиусов гребней от S_1 на отрезок l , который относится к λ , как $p : 1$, т. е. $l = p\lambda$. Например, если S_2

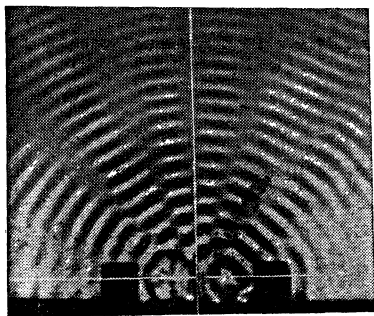


Рис. 17.16. Фотоснимок волновой картины во время действия двух источников с разностью фаз $p = 1/2$.



Рис. 17.17. Интерференция волн от двух точечных источников при возрастающем (от а к г) отставании по фазе p правого источника. На фотоснимке а) источники синфазны ($p=0$). На следующих снимках p возрастает, проходя через значение $p=1/2$ на снимке в).

запаздывает на одну треть периода по отношению к S_1 , то гребни, центр которых находится в S_2 , меньше соответствующих кругов с центром в S_1 на одну треть длины волны.

В виде примера рассмотрим случай, когда один из источников отстает от другого на полпериода. Тогда отрезок l равен полу-волне, а отставание по фазе составляет $p = \frac{1}{2}$. Гребни волн для этого случая построены на рис. 17.15; там же проведены узловые линии, проходящие через точки пересечения гребней со впадинами. На рисунке видно, что расположение узловых линий отличается от картины, наблюдаемой при двух синфазных источниках. При том же отношении λ/d узловые линии находятся там, где при синфазных источниках находились наиболее усиленные гребни, а наиболее усиленные гребни занимают места прежних узловых линий. Сравните рис. 17.15 с рис. 17.10. Для каждого из них $\lambda = \frac{1}{3}d$, но на рис. 17.10 источники совпадают по фазе, а на рис. 17.15 имеется отставание по фазе $p = \frac{1}{2}$.

Фотоснимок волновой картины при разности фаз источников $p = \frac{1}{2}$ приведен на рис. 17.16. Можно видеть, например, что со средней вертикальной прямой здесь совпадает узловая линия, тогда как на рис. 17.6 (и рис. 17.9) с ней совпадала линия наиболее усиленных гребней.

Мы привели примеры интерференционных картин для двух частных случаев разности фаз: $p=0$ и $p=\frac{1}{2}$. Можно было бы выбрать любую разность фаз от 0 до 1, и в каждом случае интерференционная картина была бы разная. Серия фотоснимков на рис. 17.17 воспроизводит интерференционные картины на экране волновой кюветы для различных отставаний по фазе источника S_2 . Изменение разности фаз сдвигает всю систему узловых линий в определенном направлении. По мере того как отставание по фазе источника S_2 увеличивается (от a к g), радиусы гребней системы волн S_2 отстают от радиусов гребней системы S_1 на все возрастающий отрезок $l = p\lambda$. Поэтому узловые линии все круче загибаются вокруг S_2 , удаляясь от средней линии. Это и наблюдается на фотоснимках.

Включив отрезок $l = p\lambda$ в разность хода для любой точки узловой линии, получаем общую формулу разности хода для n -й узловой линии при произвольной разности фаз источников:

$$PS_1 - PS_2 = (p + n - \frac{1}{2})\lambda.$$

Отсюда (по причинам, рассмотренным в разделе 17.4) углы, определяющие направления прямолинейных концов узловых линий, выражаются формулой

$$\sin \theta_n = (p + n - \frac{1}{2})\lambda/d.$$

Эти уравнения легко понять, если учесть, что узловые линии определяются пересечениями дуг радиуса $r + (n - \frac{1}{2})\lambda$ с центром в S_1 с дугами радиуса $r - p\lambda$ с центром в S_2 . В такие точки пересечения гребень от одного источника всегда доходит одновременно со впадиной от другого (см. конец раздела 17.3).

При изменении запаздывания по фазе источника S_2 цепочки волн, состоящие из усиленных гребней и впадин, поворачиваются подобно узловым линиям. При увеличении этого запаздывания каждая це-

почка волн отклоняется от S_1 и постепенно загибается вокруг S_2 . В качестве примера на рис. 17.18 построены гребни волн от двух источников, разделенных интервалом в 3λ .

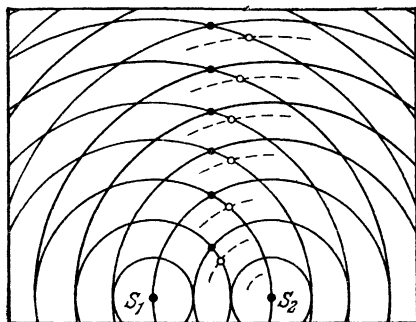


Рис. 17.18. Ряд черных кружков изображает линию удвоенных гребней при одинаковых фазах источников S_1 и S_2 . Белые кружки изображают удвоенные гребни при отставании S_2 по фазе. Запоздавающие гребни от S_2 изображены пунктирными дугами.

остальные цепочки волн при этом образуют.

17.6. Заключение

Интерференционная картина от двух точечных источников в волновой кювете характеризуется системой узловых линий, т. е. линий, на которых вода остается невозмущенной. Когда источники находятся в одинаковых фазах, узловые линии располагаются симметрично относительно средней линии, т. е. перпендикулярно, восстановленного из середины прямой S_1S_2 , соединяющей источники.

В непосредственном соседстве с источниками узловые линии искривлены, но уже довольно близко от источников они становятся почти прямыми. Продолжения этих прямых, проведенные в сторону источников, пересекаются в середине прямой, соединяющей источники. Число узловых линий и угол, образуемый каждой из них с прямой S_1S_2 , определяются отношением λ/d . Это означает, что, зная одну из величин, d или λ , можно определить другую.

Даже при постоянной длине волны и постоянном расстоянии между источниками интерференционные картины различны в зависимости от разности фаз p источников. При синфазных источниках образуется четное число узловых линий, расположенных симметрично относительно средней линии. Если же источник S_2 посылает гребни на $t=pT$ позже, чем S_1 , то все гребни от S_2 имеют меньший радиус, чем соответствующие гребни от S_1 . Соответственные радиусы отличаются на отрезок $l=p\lambda$. Вследствие этого точки пересечения соответственных гребней от S_2 и впадин от S_1 расположены ближе к S_2 . Это означает, что узловые линии загибаются от S_1 в сторону S_2 и картина становится несимметричной. Только при

Система сплошных кругов с центром в S_2 изображает гребни от S_2 , которые получились бы при совпадении фаз источников. Пунктирные же дуги с центром в S_2 обозначают гребни от S_2 при отставании S_2 по фазе. Обратите внимание на загибание удвоенных гребней в сторону S_2 при отставании S_2 . В частности, при равенстве фаз по центральной вертикали проходит прямолинейная цепочка волн. При отставании источника S_2 эта цепочка смещается вправо, в сторону источника S_2 . Все это смещаются аналогичным

$p = \frac{1}{2}$ получается вновь симметричная картина, но в этом случае средняя линия совпадает с одной из узловых линий, а число узловых линий является нечетным. Если расстояние между источниками и длины возбуждаемых волн постоянны, расположение интерференционных линий зависит от разности фаз источников. Следовательно, для поддержания неизменной интерференционной картины разность фаз источников должна быть также постоянной. Для двух источников, действующих с одинаковой частотой, разность фаз будет обязательно постоянной. Но если хотя бы один из источников будет нерегулярно включаться и выключаться, то разность фаз, а с нею и интерференционная картина будут изменяться. Интерференционные картины имеют огромное значение в интерференции световых волн, которая рассматривается в следующей главе.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

1*. Если бы вдоль спиральной пружины распространялась периодическая волна, каждый волновой импульс которой имел бы форму, изображенную на рис. 17.19, и если бы мы пожелали образовать узлы посредством посылки в обратном направлении периодических волновых импульсов, то какую форму нужно было бы им придать? (Раздел 17.1.)



Рис. 17.19. К задаче 1*.

2*. На каком расстоянии от стенки (см. рис. 17.3) произойдет встреча волновых импульсов a и c с образованием следующего узла? (Раздел 17.1.)

3. В связи с рис. 17.1 — 17.3 было показано, что при падении периодических волновых импульсов на закрепленный конец спиральной пружины точка P , находящаяся на расстоянии $\frac{1}{2}\lambda$ от закрепленного конца, все время остается в покое и потому является узлом. Продолжите те же рассуждения, чтобы доказать, что точка P_2 , находящаяся на расстоянии $\frac{3}{2}\lambda$ от того же конца, тоже является узлом.

4*. На рис. 17.20 окружности изображают гребни волн, возбуждаемых источниками S_1 и S_2 . В которых из точек A , B и C расположатся «удвоенный гребень», «удвоенная впадина» и узловая точка? (Раздел 17.2.)

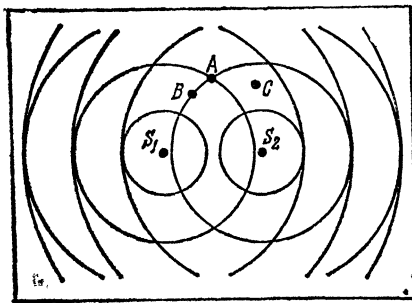


Рис. 17.20. К задаче 4*.

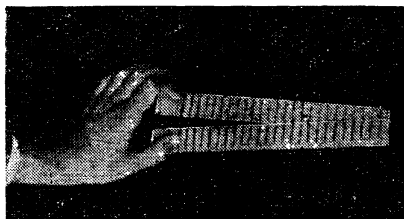


Рис. 17.21. К задаче 8.

5. Постройте семейства концентрических гребней и узловых линий от двух источников с расстоянием $d = 5\lambda$ для моментов:

- когда возбудители создают гребни;
- когда они создают впадины.

Как движутся усиленные гребни за время между этими двумя моментами?

7*. Если на рис. 17.4 восстановить перпендикуляр к прямой S_1S_2 в ее середине, то будет ли он узловой линией? (Раздел 17.2.)

8. Сложите две полоски линованной бумаги шириной 2 см, как показано на рис. 17.21. Представьте себе, что линии на бумаге являются гребнями волн, а ваши

пальцы изображают источники волн. Заметьте, где гребни от обоих источников накладываются друг на друга. Затем, вращая свободные концы полосок вокруг прижимающих пальцев, установите положения узловых линий и цепочек бегущих волн.

9. Рассмотрите интерференционную картину от двух точечных источников. Затем выясните, что произойдет с узловыми линиями после помещения третьего источника, тождественного с остальными, посредине между ними?

10*. Какая из узловых линий на рис. 17.10 образует геометрическое место точек P , удовлетворяющих условию $PS_2 - PS_1 = \frac{3}{2}\lambda$? (Раздел 17.3.)

11*. Известно расстояние некоторой точки узловой линии от двух точечных источников в волновой кювете. Чего не хватает для вычисления длины волны? (Раздел 17.3.)

12. Используя метод, показанный на рис. 17.11, постройте узловые линии интерференционной картины от двух точечных источников для $\lambda/d=1/3$. Отличается ли этот метод от метода, описанного в задаче 6?

13. Что произошло бы с узловыми линиями, если бы один из двух источников стал постепенно ослабевать и наконец перестал бы работать?

14*. В случае двух точечных источников, находящихся на расстоянии d друг от друга, существует ли диапазон длин волн λ , создающих интерференционную

картину без узловых линий? (Раздел 17.4.)

15. Два источника, расположенные на расстоянии 6 см друг от друга и колеблющиеся в одинаковой фазе, вызывают водяные волны с длиной волны 1,5 см. Постройте узловые линии вдали от источников, определяя их положение по точкам пересечения дуг окружностей с центрами в источниках. Измерьте угол между второй узловой линией и средней линией интерференционной картины. Сравните синус этого угла с величиной $(n-1/2)\lambda/d$.

16. Придумайте интерференционный опыт, способный доказать волновую природу звука и позволяющий измерять длины звуковых волн.

17. а) Используйте рис. 17.6 и 17.9 для нахождения отношения λ/d с помощью формулы $\sin \theta_n = (n-1/2)\lambda/d$.

б) На рис. 17.6 и 17.9 интерференционная картина уменьшена в 4 раза. Измерив d на этих снимках, определите значения λ .

18. Вспомните или разыщите определение гиперболы и объясните, почему узловые линии являются гиперболами.

19. а) На рис. 17.22 $L=50$ см, $d=10$ см, $\alpha=30^\circ$. Чему равны γ и β ?

б) Найдите γ и β для $L=500$ см.

в) Убеждают ли вас полученные результаты в том, что можно с достаточно хорошим приближением полагать $\gamma \approx \beta \approx \alpha$, когда L во много раз больше d ?

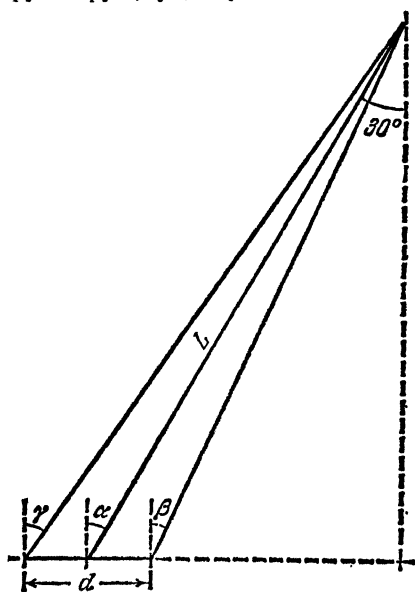


Рис. 17.22. К задаче 19.

20. Красный и синий гоночные автомобили мчатся по круговому гоночному треку, имеющему 5 км в окружности. Их скорости одинаковы и постоянны. Каждый автомобиль затрачивает 2,5 мин на полный оборот. Синий автомобиль все время отстает на 0,5 мин от красного.

а) Каково отставание по фазе p синего автомобиля относительно красного?

б) Чему равна скорость автомобилей?

в) Если длину трека уменьшить до 4 км, то повлияет ли это на ответы по пп. а) и б)?

21*. На рис. 17.14 $l=0,25$ см и $\lambda=0,70$ см. Каково отставание по фазе? (Раздел 17.5.)

22*. Есть ли разница между отставаниями по фазе, равными нулю и единице (в долях периода)? (Раздел 17.5.)

23. Докажите, что для двух источников с разностью фаз p первая узловая линия может быть построена по точкам, для которых разность хода лучей от источников равна $(p+1/2)\lambda$.

24. Наблюдатель находится на большом расстоянии L от пары источников, создающих интерференционную картину. Перемещаясь по перпендикуляру к средней линии, он должен пройти путь x , чтобы перейти со средней линии на первую узловую (см. рис. 17.13).

а) Чему равна разность фаз источников, если $x=0,008L$, а $\lambda=0,01$ д?

б) Чему она равна, если $\lambda=0,016$ д?

25. Два точечных источника, образующих волны одинаковой длины λ , располагаются в волновой кювете на расстоянии $d=5\lambda$ друг от друга.

а) Найти угол θ между прямолинейной частью первой узловой линии и средней линией интерференционной картины при одинаковых фазах источников.

б) Найти θ для разности фаз источников $p=1/2$.

в) Сколько получится узловых линий?

26. В радиоастрономии один из методов «просматривания» космического пространства можно сравнить с обратным использованием двухточечного генератора поверхностных волн в кювете, снабженного фазорегулятором (рис. 17.23). Наибольшая интенсивность сигнала достигается, когда сигналы, поступающие в C и D , находятся в одинаковой фазе.

Фазорегулятор изменяет разность фаз путем изменения длины провода между A и C . Если длины проводов AC и BD равны, то сигналы, принятые из точки, расположенной прямо «над головой», находятся в фазе. Чтобы «смотреть» по направлению, определяемому углом θ , провод AC должен быть удлинен. Если расстояние AB составляет 100 м, а частота, на которую настроен приемник, равна $2 \cdot 10^7$ с⁻¹, какая разность фаз должна быть введена, чтобы «смотреть» под углом 5° к вертикали?

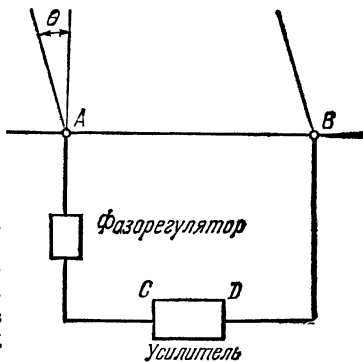


Рис. 17.23. К задаче 26.

27. Обычные широкоэвещательные радиостанции работают на длинах волн от 200 до 600 м. Антенны обычного типа представляют собой вертикальные мачты, которые в плоскости земной поверхности ведут себя как точечные источники волн.

а) Как надо расположить две антенны подобного типа в городе, растянувшимся узкой полосой вдоль берега моря, чтобы потери мощности на излучение в направлении как моря, так и ненаселенной местности были минимальными?

б) Если город растет по направлению в глубь материка, что нужно сделать, чтобы посылать наиболее интенсивные сигналы на новостройки?

28. Два источника волн колеблются в кювете с частотами 15 и 16 колебаний в секунду. Опишите получающуюся систему узловых линий.

29. Что будет происходить с интерференционной картиной от двух точечных источников волн, если разность фаз внезапно меняется?

18.1. Можно ли наблюдать интерференцию света?

В предыдущей главе изучались интерференционные картины, образуемые двумя источниками волн в волновой кювете. Нашей следующей задачей является ознакомление с аналогичными опытами, разработанными для света, с целью выяснить, обладает ли свет всеми свойствами периодических волн.

При разработке опытов по интерференции света необходимо помнить о некоторых важных различиях в способах наблюдения водяных и световых волн. Водяные волны можно наблюдать, находясь в любом месте, где в глаз попадает свет, отраженный от этих волн. Узловую линию в волновой кювете легко проследить по точкам, в которых вода остается в покое. Представим себе теперь, что два точечных источника водяных волн заменены двумя источниками света. Как установить, имеются ли места, где световые волны от двух источников уничтожают друг друга, т. е. имеются ли места, соответствующие узловым линиям волновой кюветы? В кювете волны можно видеть. Световые же волны нельзя видеть, глядя на световой луч сбоку (вспомните опыт, воспроизведенный на рис. 11.7). Поскольку мы видим только свет, попадающий в глаз, нам приходится либо смотреть навстречу световому лучу, либо помещать на пути лучей какой-либо отражающий предмет, например лист бумаги, и наблюдать отраженный свет.

Можно составить себе представление о возникающей задаче, если вообразить, что требуется исследовать интерференцию водяных волн в совершенно темной комнате, в которой волны нельзя видеть. В таком случае узловые линии могли бы быть прослежены с помощью пальца, погруженного в воду и медленно перемещаемого по кювете. В большинстве точек палец чувствовал бы вертикальные колебания поверхности воды; только попадая в одну из точек узловой линии, палец не ощущал бы этих колебаний. Подобно этому при наблюдении световых волн приходится или перемещать глаз, или перемещать отражающий экран на пути лучей. В тех точках экрана, где свет усиливается, мы видим яркое освещение. Там, где экран пересекает узловую линию, видна темная область.

Под какими углами должны образовываться эти яркие и темные области? В интерференционной картине, образуемой двумя точечными источниками, углы между узловыми линиями зависят от отно-

шения λ/d . При заданной длине волны λ все эти углы возрастают с уменьшением расстояния между источниками d . Мы уже знаем, что длины световых волн во много раз меньше 0,1 мм (см. раздел 16.7), поэтому для получения измеримых расстояний между узловыми линиями на подходящих расстояниях от источников необходимо сильное сближение источников. Это также означает, что источники должны иметь очень малые размеры.

Кроме того, для образования резких узловых линий необходимы источники, испускающие волны определенной длины или по крайней мере очень узкую область длин волн; в противном случае узловые линии, соответствующие одной длине волны, были бы погребены под гребнями, образуемыми волнами других длин. Представьте себе, например, что каждый из двух источников испускает волны тех двух длин, которые образуют интерференционные картины, показанные на рис. 17.6 и 17.9. Наблюдаемая суммарная интерференционная картина будет представлять собой взаимное наложение этих двух картин. В суммарной интерференционной картине не останется ни одной покоящейся точки.

В последующем изложении будет предполагаться, что мы имеем дело со светом, охватывающим достаточно узкий интервал длин волн, так что узловые линии могут лишь приобретать некоторую расплывчатость, но не исчезают.

Представим себе два источника света очень малых размеров, разделенных отрезком d , параллельно которому на большом расстоянии L расположен экран (рис. 18.1). Такая схема напоминает волновую кювету с двумя источниками круговых волн. Поэтому на основании результатов, изложенных в разделах 17.4 и 17.5, можно было бы ожидать, что в данном случае

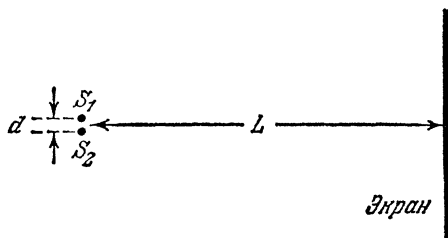


Рис. 18.1. Эта схема напоминает устройство, демонстрирующее интерференцию в волновой кювете. Однако при независимых друг от друга источниках света S_1 и S_2 никакой интерференции (и интерференционной картины на экране) не получится. С другой стороны, при использовании особых, синхронизованных по фазе источников света, называемых лазерами, эта схема может дать интерференционную картину (см. раздел 18.3).

на экране появится система чередующихся ярких и темных полос. Яркие полосы должны образовываться в местах взаимного усиления световых колебаний, пришедших от двух источников, а темные — в местах взаимного гашения этих колебаний. Как и в волновой кювете, при одинаковых фазах источников в центре экрана должна была бы появиться яркая полоса, соответствующая наибольшему размаху световых колебаний. По обе стороны от этой полосы должны были бы располагаться темные полосы в местах пересечения экраном первых узловых линий; при дальнейшем удалении от центра на экране должны были бы чередоваться яркие и темные полосы.

В такой системе чередующихся ярких и темных полос n -я темная полоса должна находиться на расстоянии

$$x_n = (n - \frac{1}{2})L\lambda/d$$

от центра системы полос. Следовательно, расстояние между соседними темными полосами должно составлять

$$\Delta x = L\lambda/d.$$

Кроме того, как и в волновой кювете, если один источник запаздывает по отношению к другому на p -ю часть периода, все линии интерференционной картины должны смещаться вбок на p -ю долю расстояния между темными полосами.

Можно ли наблюдать интерференционную картину в случае световых волн? Нам уже известно, что если свет представляет собой волны, его длины волн должны быть во много раз меньше 0,1 мм. Следовательно, для источников света реальных размеров отношение λ/d должно составлять очень малую дробь. Но можно отодвинуть экран на очень большое расстояние L ; тогда согласно формуле для Δx отпадает препятствие к разделному наблюдению ярких и темных полос, так как Δx может быть сделано достаточно большим. И все же, используя описанную установку (рис. 18.1), мы в действительности никогда не получим интерференционной картины. Как бы мы ни изменяли d или L , экран останется равномерно освещенным.

Не объясняется ли эта бесплодность попыток наблюдать интерференцию света от двух источников тем, что волновая теория света несостоятельна? Нет, не обязательно. На основе того, что нам уже известно, это объяснение можно считать правдоподобным, но не единственным. Как уже было отмечено выше, интерференционная картина от двух источников зависит от λ , d и разности фаз p . При быстром изменении разности фаз источников узловые линии и темные полосы на экране перескакивают с места на место с такой же быстротой. Глаз не успевает замечать этих перескоков и потому экран кажется равномерно освещенным. Иначе говоря, возникновение интерференционных картин возможно, но они невидимы вследствие слишком быстрых изменений их положения и формы.

18.2. Интерференция световых волн. Опыт Юнга

Можно показать, что неудачи при попытках наблюдать интерференцию в только что описанных опытах обусловлены быстрыми изменениями разности фаз. Для этой цели можно прибегнуть к приему, описанному Томасом Юнгом в 1801 г. Он открыл простой способ синхронизации изменений фаз двух источников света, благодаря которой образующаяся интерференционная картина может сохраняться. Сущность этого способа заключается в использовании лишь одного источника и разделении его света на две части, синхронизированные по фазе. Эти две части, которые ведут себя так, как будто они исходят от двух синхронно действующих источников, затем

опять сводятся вместе и интерферируют. Этим методом мы действительно можем наблюдать интерференцию света на удаленном экране.

Установка Юнга показана на рис. 18.2. В качестве первичного источника света Юнг использовал булавочный прокол S в экране, освещаемом Солнцем. Свет, выходящий из этого прокола, падал на второй непрозрачный экран с двумя очень близкими друг к другу булавочными проколами S_1 и S_2 , расположенными по возможности на одинаковом расстоянии от первичного прокола. Таким образом, свет, вышедший в любой момент времени из первичного прокола, проходит через оба вторичных прокола в одно и то же время и, следовательно, с одинаковой фазой *). Поэтому интерференционная

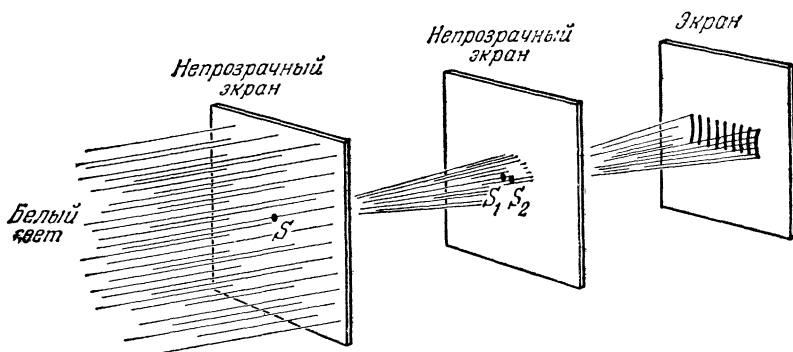


Рис. 18.2. Опыт Юнга. Солнечный свет проходит через булавочный прокол S и затем через отверстия S_1 и S_2 . Интерференционная картина наблюдается на экране.

картина от пучков, выходящих из вторичных отверстий, оставалась постоянной во времени и, следовательно, могла наблюдаться.

В наше время этот опыт можно осуществлять проще. Точечный источник солнечного света заменяется лампочкой накаливания с тонкой прямой нитью накала, а два булавочных прокола в экране заменяются двумя длинными узкими щелями. Щели должны быть очень близки друг к другу (около 0,1 мм) и параллельны нити лампочки. Идеализированная схема конфигурации интерферирующих волн от вертикальных щелей (вид сверху) изображена на рис. 18.3. Ясно видно сходство этой схемы с волновой картиной, получаемой в кювете. Расположив страницу с рис. 18.3 на уровне глаз и смотря

*) Приведено упрощенное объяснение. На самом деле разность расстояний вторичных отверстий от первичного существует и даже может быть значительной по сравнению с длиной волны. Поэтому источники S_1 и S_2 излучают свет в общем случае с некоторой разностью фаз. Для интерференции, однако, важно, что здесь эта разность фаз постоянна во времени. Важно также то, чтобы разность времени распространения света от S до S_1 и от S до S_2 была соизмерима с периодом световых колебаний, для того чтобы в первичном пучке света за это время не успевали произойти существенные изменения. (Прим. перев.)

от ее правого края на источник, можно ясно видеть узловые линии. Это — области, где нет волновых возмущений и, следовательно, света. На рисунке в местах их пересечения с экраном они обозначены как «темн.». На самом деле мы увидели бы интерференционную картину в виде чередующихся светлых и темных разноцветных

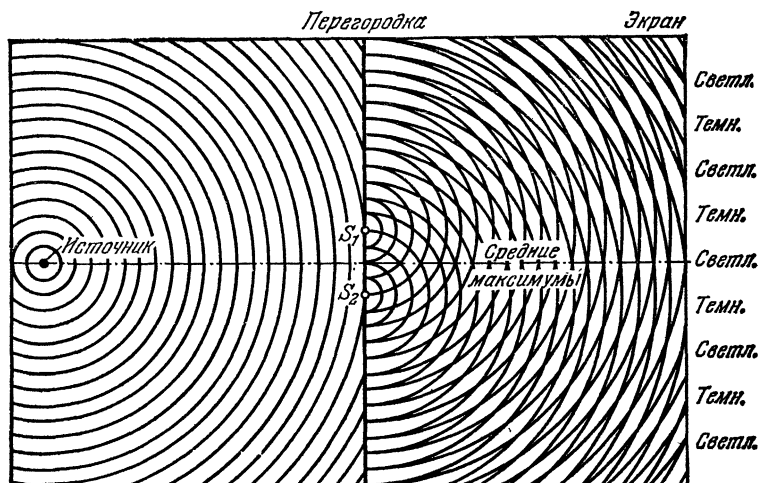


Рис. 18.3. Волны от линейного источника света проходят сквозь щели S_1 и S_2 , интерферируют и образуют светлые и темные полосы на экране. На этой идеализированной схеме ширина каждой щели меньше длины волны.

полос. Эти полосы параллельны щелям, причем самая яркая расположена в центре, как и предсказывает волновая теория.

Зафиксированное изображение интерференционной картины, создаваемой этой системой, может быть получено, если на месте белого экрана расположить фотоаппарат, дающий изображение на пленке. Подобная картина воспроизведена на рис. I (см. цветную вклейку).

18.3. Разность фаз источников света. Атомы

В волновой кювете источникам волн можно по желанию сообщить любую разность фаз и заставить их колебаться в течение любого заданного промежутка времени. Но мы лишены возможности осуществить такую же строгую регулировку работы источников света. Это и проявляется в нашей неспособности наблюдать интерференцию световых волн без применения метода Юнга (или других аналогичных методов) для обеспечения постоянства разности фаз источников. Нетрудно понять, почему разность фаз двух источников света обычно изменяется очень быстро. Рассмотрим два независимых источника света. В них свет испускается большим числом отдельных атомов, каждый из которых посылает лишь отдельные, весьма кратковременные серии световых волн. При включении

источников мы кладем начало лишь суммарному процессу излучения света, но не контролируем отдельных атомов; они начинают и прекращают свои индивидуальные процессы излучения совершенно хаотически.

Чтобы оценить значение этого положения для интерференционных опытов, рассмотрим пару атомов, принадлежащих разным источникам света. По всей вероятности, эти атомы, рассматриваемые как источники света, будут различаться по фазе на некоторую долю периода p_1 . Световые волны, излучаемые этими атомами, создадут систему интерференционных полос, положение которых зависит от величины p_1 . Через короткий промежуток времени рассмотренные два атома перестанут излучать, и нам придется переключить наше внимание на другую пару атомов, которые в этот момент будут излучать свет. Поскольку мы не имеем возможности влиять на их поведение, эти атомы будут тоже иметь некоторую разность фаз, но на этот раз, по всей вероятности, другую: p_2 . Поэтому и система интерференционных полос будет отличаться от первой. Еще позже придется рассматривать третью пару атомов, и т. д. Было установлено типичное значение длительности излучения одного атома; оно оказывается равным приблизительно 10^{-9} с. Если в каждый момент свет излучался бы только одной парой атомов, находящихся в разных источниках, то при непрерывном излучении света этими источниками смена пар атомов должна была бы происходить через каждые 10^{-9} с. Тогда интерференционная картина также претерпевала бы различные беспорядочные изменения в среднем через каждые 10^{-9} с. Поскольку глаз, разумеется, не в состоянии следить за столь быстрыми изменениями, мы не увидели бы никакой интерференционной картины.

В действительности же в каждом источнике свет одновременно излучается огромным числом атомов. В каждый момент интерференционная картина определяется результатом наложения световых волн от всех этих атомов. Сосредоточим теперь наше внимание на всей совокупности атомов одного источника, излучающих волны в данный момент. Все атомы этой совокупности перестанут излучать примерно через 10^{-9} с. К этому моменту будет существовать новая совокупность атомов, излучающих свет из данного источника. Следовательно, фаза источника изменится на некоторую случайную величину, совершенно так же, как это имело бы место при смене единичных излучающих атомов. Поэтому такое полное изменение фазы происходит в каждом источнике тоже приблизительно через каждые 10^{-9} с, сопровождаемая резким смещением интерференционных полос. Нет ничего удивительного в том, что в результате мы не видим никакой интерференционной картины.

Если же мы пользуемся методом Юнга, то световые волны, испускаемые каждым атомом из единственного источника, проходят через две щели. Эти щели настолько удалены от источника света, что волны от любого атома проходят практически одинаковые пути до обеих щелей (рис. 18.4). Поэтому световые волны выходят из

обеих щелей почти в одинаковой фазе *). Эти щели действуют как два источника волн, согласованных по фазе, и на экране за щелями наблюдается ожидаемая интерференционная картина.

За последние несколько лет была разработана серия новых замечательных источников света. В этих источниках мы заставляем атомы твердых тел или газов излучать свет не хаотически, а почти синхронно по фазе, причем каждый атом стремится управлять излучением других. Неизменные фазовые соотношения удается сохранять в тысячи раз дольше того интервала времени (10^{-9} с), в течение которого испускает свет отдельный атом нити накала. Эти

Источник

Щели



Рис. 18.4. Поскольку источник весьма удален от щелей, лучи, посылаемые любым атомом к обеим щелям, почти параллельны и их пути почти равны.

новые устройства называются лазерами (сокращенно от Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation — усиление света индуцированным излучением). Они основаны на принципе, который можно применять во многих вариантах.

В опыте, поставленном в 1963 г., удалось добиться настолько согласованной работы двух независимых лазеров в качестве синхронизированных по фазе источников света, что можно было наблюдать интерференционные полосы, совершенно аналогичные интерференционной картине, создаваемой двумя независимыми генераторами волн в волновой кювете. При хорошей фазовой синхронизации не удавалось, однако, добиться точного равенства длин волн, что приводило к быстрому перемещению средней полосы по экрану, совершенно аналогично смещению интерференционной картины в волновой кювете при небольшой разности частот генераторов. Лазерные интерференционные полосы были настолько подвижны, что для их «моментального» фотографирования в фиксированном положении приходилось прибегать к телевизионной технике.

Физики надеются, что когда-нибудь станет возможным получать лазерные источники, полностью синхронизированные по фазе и с тождественной длиной волны. Тогда световые интерференционные эффекты станут так же доступны наблюдению и интерпретации, как интерференция водяных волн в кювете.

18.4. Цвет и длина волны света

Фотоснимок на рис. 1 (см. цветную вклейку) был получен пропусканием белого света от малого источника через две близкие параллельные щели; распространяющийся от этих щелей свет был вновь

*) Это не точно. Дальность источника не устраняет абсолютной разности хода, которая может даже превышать длину волны. Поэтому фазы волн, выходящих из щелей, не равны. Но этого и не требуется. Важно, что их разность постоянна. (Прим. перев.)

сведен фотообъективом для образования интерференционной картины на фотопленке. Обратите внимание на то, что яркая центральная полоса (называемая средним максимумом) является белой, но края ярких боковых полос окрашены.

Нам уже известно, что белый свет представляет собой смесь всех цветов. В таком случае цветные края ярких полос наталкивают на мысль, что свет разных цветов отклоняется при интерференции под различными углами. Представление, что свет различных цветов интерферирует под разными углами, равносильно признанию связи между цветом и длиной волны. При изучении дисперсии света у нас уже были некоторые основания подозревать такую связь. Теперь этот вопрос можно решить окончательно с помощью дальнейших опытов по интерференции света.

Рассмотрим интерференционную картину, полученную для света определенного цвета. На рис. 18.5 приведена интерференционная картина, сфотографированная в красном свете. Она представляет собой ряд чередующихся светлых и темных полос. Интервал между центрами полос, или шаг полос, зависит от расстояния d между щелями, от расстояния L между щелями и фотопластинкой и от длины волны используемого света. Следовательно, если известны расстояния d и L , шаг полос на снимке позволяет вычислить длину волны. Как было показано в разделе 18.1, шаг темных полос Δx определяется выражением $\Delta x = L\lambda/d$, откуда

$$\lambda = \Delta x d / L.$$

Измерив интервал, занимаемый большим числом полос, и разделив его на это число, можно найти достаточно точное значение Δx и использовать его для вычисления длины волны λ . Для применявшегося красного света она оказалась равной

$$\lambda_{кр} = 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Все это можно проделать для света любого другого цвета. Если использовать, например, свет после прохождения через сине-фиолетовый фильтр определенного состава, то получим

$$\lambda_{с-ф} = 4,5 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Некоторые другие длины волн, измеренные тем же методом, приведены в табл. 18.1, из которой видно, что наше прежнее предположение о существовании определенной связи между цветом и длиной волны подтверждается опытом.

Всякий цвет, соответствующий определенной длине волны, называется спектральным. Спектральными являются все цвета

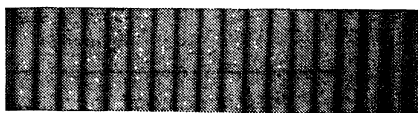


Рис. 18.5. Интерференционная картина, полученная в красном свете. Цветной фотоснимок той же картины приведен на рис. 11 (см. цветную вклейку).

А. Длины волн (в ангстремах) для основных цветов спектра

Видимый спектр заключается в пределах приблизительно от 4000 Å (для темно-фиолетового цвета) до 7500 Å (для темно-красного) ($1\text{Å} = 10^{-10}\text{ м}$)

Фиолетовый	< 4500
Синий	4500—5000
Зеленый	5000—5700
Желтый	5700—5900
Оранжевый	5900—6100
Красный	> 6100

Б. Длины волн (в ангстремах) для наиболее ярких линий в спектрах некоторых паров и газов

Л и т и й	Н е о н	Н а т р и й	Р т у т ь	К а л и й
6103,6	5400,6	5890	4358,4	4044
6707,8	5832,5	5896	5460,7	4047
	5852,5			
	6402,2			

радуги, но далеко не все цвета, встречающиеся в природе. Если произвести интерференционное разложение света, прошедшего через пурпуровый фильтр, то оказывается, что этот свет состоит из синего и красного света. В сущности говоря, механизм цветного зрения очень сложен. Иногда цвет, воспринимаемый нами как спектральный, образуется светом, содержащим не те длины волн, которые соответствуют данному спектральному цвету. Спектральный анализ света, основанный на определении положений максимумов и минимумов интерференционной картины, позволяет точно устанавливать длины волн, входящие в состав света данного цвета. Таким образом, интерференционные полосы расширяют наши познания далеко за пределы того, что нам сообщает невооруженный глаз.

Описанные выше опыты вы могли бы проделать и сами. В частности, вы могли бы проверить приведенную выше оценку длин волн красного и сине-фиолетового света, получив снимки типа рис. II (см. цветную вклейку). Снимки интерференционной картины, приведенные на этом рисунке, были получены с одним источником белого света и двумя щелями. Оба снимка (красный и сине-фиолетовый) были сфотографированы одновременно, с помощью красного и сине-фиолетового фильтров, поставленных один над другим на горизонтальном пути света между источником и фотопленкой. Отношение шагов полос на двух половинах пленки должно равняться отношению длин волн красного и сине-фиолетового цветов. Произведя соответствующие измерения на снимке, находим, что шаг полос на красной половине снимка приблизительно в 1,4 раза больше, чем на сине-фиолетовой. Это отношение можно сравнить

с отношением соответствующих длин волн, измеренных независимо друг от друга, которое равно

$$\lambda_{кр}/\lambda_{с-ф} = (6,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}) / (4,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}) \approx 1,4.$$

Вы могли бы провести целую серию интерференционных опытов с измерением длин волн. Вместо фотоаппарата можно воспользоваться собственным глазом. Две щели можно получить, проведя парой лезвий для бритвы, сложенных вместе, по закопченной стеклянной пластинке. Единственными необходимыми принадлежностями являются яркий источник света и несколько фильтров из цветного целлофана или стекла. В качестве источника света лучше всего взять лампу накаливания с прямой нитью накала (рис. 18.6).

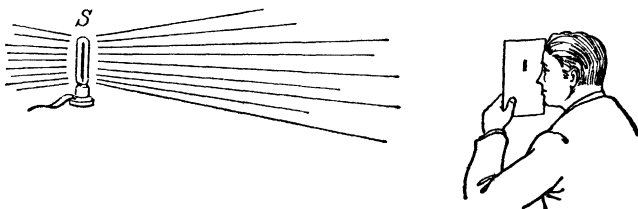


Рис. 18.6. Наблюдение интерференционной картины от двух щелей. Оптическая система глаза сводит лучи от обеих щелей на сетчатке глаза, где и образуется интерференционная картина.

Итак, нам удалось показать, что спектральный цвет света непосредственно зависит от его длины волны в вакууме. Мы смогли измерить длину волны света любого спектрального цвета путем измерения шага интерференционных полос, образуемых двумя щелями. Это равносильно тому, что мы имеем в своем распоряжении примитивный спектроскоп (см. гл. 7), действие которого нам вполне понятно.

Гораздо более совершенный спектроскоп, использующий интерференцию для разложения света на спектральные цвета, основан на применении ряда параллельных щелей с одинаковыми интервалами между ними. Действие совокупности многих щелей сводится к усилению света, испускаемого щелями в любом заданном направлении, и к повышению резкости максимумов для каждой длины волны. Спектроскопы такого рода, называемые дифракционными, широко используются для разложения света по длинам волн. Для некоторых целей эти спектроскопы имеют преимущества перед призмными.

18.5. Дифракция. Интерференция от одной щели

Если процарапать лезвием бритвы (или иголкой, чтобы получить несколько большую ширину) только одну щель и посмотреть через нее на источник белого света, то можно наблюдать картину типа представленной на рис. III, а (см. цветную вклейку). По обе стороны от яркой широкой средней белой полосы располагаются цветные полосы меньшей яркости. При освещении щели одноцвет-

ным, например красным, светом получается аналогичная картина с той разницей, что здесь имеются только красные и темные полосы (рис. III, б). Хотя эти картины несколько и отличаются от картин в опыте Юнга, они имеют явное сходство с интерференционными картинами. Тут тоже есть либо узлы и максимумы одноцветного света, либо разноцветные полосы при белом освещении. То, что этот интерференционный эффект имеет место при всего лишь одной щели, может вызвать сомнения в правильности нашего объяснения картины,

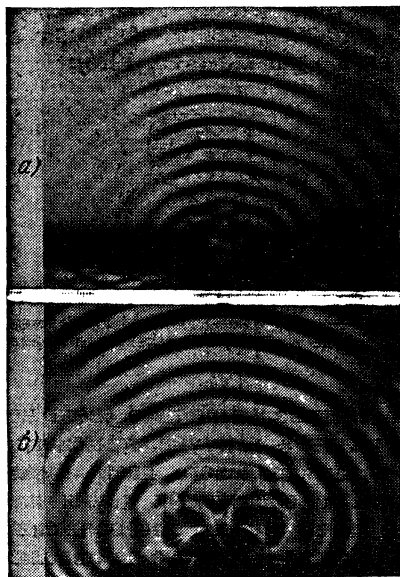


Рис. 18.7. а) Дифракционная картина от прямолинейных волн, падающих на щель. б) Интерференционная картина от шеренги точечных источников волн, расставленных поперек щели. Вблизи источников наличие интервалов между ними ведет к некоторой разнице между обеими картинами. На достаточном же расстоянии от источников (а) и от щели (б) обе картины совершенно одинаковы.

наблюдаемой в опыте Юнга с двумя отверстиями. Чтобы выяснить этот вопрос, необходимо более подробно исследовать поведение света, проходящего через одну щель.

Вернувшись к нашему суждению дифракции волн на щели (см. раздел 16.7), мы заметим, что одна щель ведет себя как точечный источник волн только при том условии, что ширина щели меньше длины волны. При обычных же наблюдениях дифракции или интерференции света применяются щели, ширина которых во много раз превышает длину волны света. Как более узкие щели, процарапываемые лезвием безопасной бритвы, так и более широкие, получаемые с помощью острия иглки, во много раз шире длины световых волн. Ширина этих щелей близка к $0,1$ мм, тогда как длины волн света заключаются в пределах от $4 \cdot 10^{-4}$ до $7 \cdot 10^{-4}$ мм. Объяснение интерференционной картины, образуемой светом при прохождении

через одну щель, следует искать в поведении света, проходящего через узкую щель, ширина которой в то же время во много раз превышает длину световых волн.

На рис. 16.19 уже была показана дифракция прямолинейных волн, проходящих через узкую щель в волновой кювете. За щелью волны образуются путем дальнейшего распространения тех участков гребней и впадин, которые попадают от источника в щель. Однако такие же чередующиеся гребни и впадины в самой щели можно было бы образовывать не только пропусканием прямолинейных волн от источника, но, по-видимому, и с помощью шеренги точеч-

ных источников, расположенных поперек щели и совершающих вертикальные колебания с одинаковой фазой. Для проверки этого предположения заменим щель шеренгой очень малых точечных источников с интервалом между ними, составляющим малую долю длины волны. При этом длина шеренги должна равняться ширине щели. Заставив эти источники колебаться с одинаковой фазой и с частотой прежних волн, мы убедимся, что вид получающихся волн действительно не отличается от прежней дифракционной картины (рис. 18.7).

Итак, можно принять, что волновые картины при дифракции прямолинейных волн не отличаются от тех, которые создает шеренга синфазных точечных источников, густо и равномерно расположенных по всей ширине щели. Исходя из этой равноценности прямого фронта падающей на щель волны и эквивалентного ряда точечных источников, мы попытаемся объяснить интерференционную картину, наблюдаемую от одной щели, наложением (суперпозицией) волн, исходящих от отдельных эффективных точечных источников. Этот общий метод предсказания путей дальнейшего распространения волн посредством замены фронтов волн рядами точечных источников был применен Гюйгенсом ко многим задачам в области отражения и преломления волн.

18.6. Теория дифракции от щели

В нашем исследовании интерференции от шеренги точечных источников, тесно расставленных по ширине щели, мы будем рассматривать интерференционную картину только на расстояниях, очень больших по сравнению с шириной щели. Волны, прошедшие такое расстояние, распространяются от источников по почти параллельным прямым (рис. 18.8). Начнем с результирующей волны, образуемой точечными источниками в весьма удаленной точке, лежащей на средней линии, т. е. на перпендикуляре к плоскости щели, восстановленном из середины щели. Длина пути лучей от всех точечных источников до рассматриваемой точки почти одинакова, так что гребни волн от всех источников приходят туда практически одновременно.

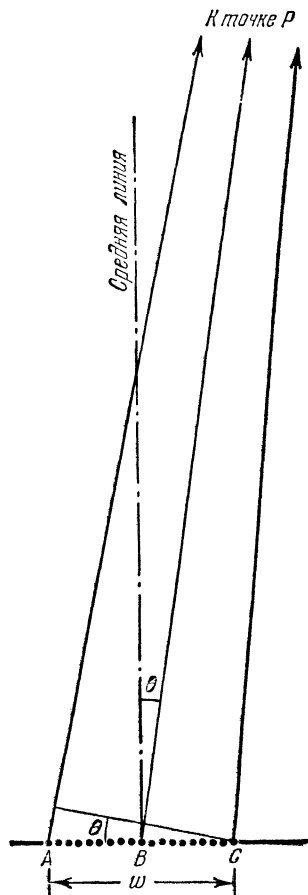


Рис. 18.8. Лучи, идущие от различных точечных источников до далекой точки P (расположенной за пределами рисунка), почти параллельны. Однако если эта точка не находится на средней линии, пути этих лучей различны по длине.

Далее рассмотрим некоторую точку P , находящуюся сбоку от средней линии, так что угол θ , образуемый прямой PB на рис. 18.8 со средней линией, уже не равен нулю (точка B находится в середине щели). Поскольку PB практически параллельно PA , угол между PA и средней линией тоже равен θ . Но PA перпендикулярно фронту волны, а средняя линия перпендикулярна прямолинейной цепочке точечных источников; отсюда угол между фронтом волны и линией этой цепочки также равен θ . Пути от разных точечных источников до точки P уже не равны. В частности, PC короче, чем PA .

Начнем теперь отодвигать точку P все дальше и дальше от средней линии, увеличивая угол θ до тех пор, пока разность хода лучей от краев щели не достигнет значения

Как видно из рис. 18.9, для этой точки $\sin\theta = \lambda/w$. Кроме того, как видно из того же рисунка,

Теперь можно показать, что волны от отдельных точечных источников гасят друг друга, так что на экране или фотопленки на этом нарисован паре отдельных точечных источников S и B слева от этих точек. Они так, что гребни, посланные из левого источника, приходят в точку P одновременно с впадинами от правого источника, так что волны от этих источников гасят друг друга. То же самое происходит с волнами, расположенными слева от промежуточных парами источников. Таким образом, в результате наложения (суперпозиции) волн от отдельных источников парно уничтожаются, и в точке P не наблюдается волн.

156

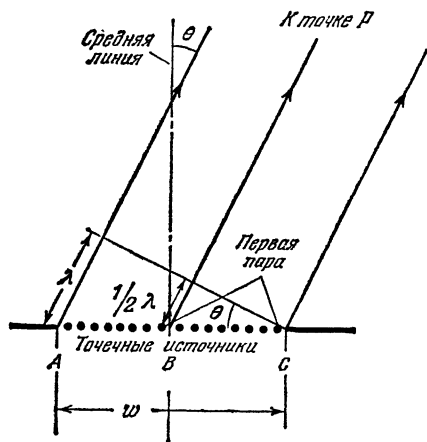


Рис. 18.9. При $\sin \theta = \lambda/w$ волны от всех точечных источников взаимно уничтожаются.

чать один и тот же результат. Прием попарного сложения является лишь простейшим способом выяснения окончательного результата. Итак, мы показали, что под углом θ , определяемым равенством $\sin\theta = \lambda/w$, происходит полное гашение волн.

При дальнейшем увеличении угла θ гашение перестает быть полным и освещенность экрана или фотопленки возрастает. Она проходит через максимум и затем вновь падает до нуля при $\sin\theta = 2\lambda/w$. Полное гашение волн под этим углом легко объяснить с помощью рис. 18.10. Для каждого источника интервала 1 можно найти парный ему источник в интервале 2, так что волны всех источников интервала 1 будут погашены волнами всех источников интервала 2. То же самое справедливо в отношении интервалов 3 и 4. Таким образом, освещенность на данном направлении будет равна нулю.

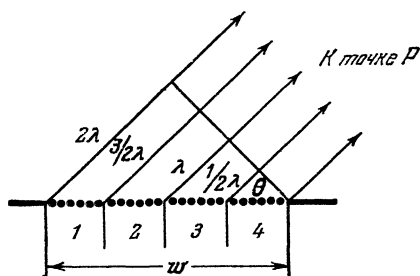


Рис. 18.10. При $\sin\theta = 2\lambda/w$ тоже происходит полное гашение волн.

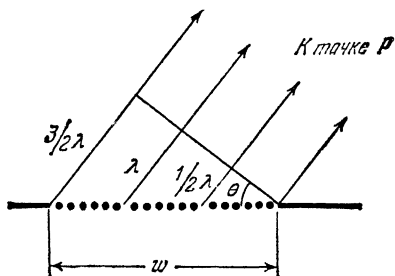


Рис. 18.11. При $\sin\theta = 3/2\lambda/w$ происходит частичное усиление волн.

Естественно ожидать, что максимум освещенности должен находиться где-то посередине между $\sin\theta = \lambda/w$ и $\sin\theta = 2\lambda/w$, т. е. вблизи $\sin\theta = 3/2\lambda/w$. При этом угле (рис. 18.11) щель может быть разделена на три равных интервала с разностями хода $1/2\lambda$ между их концами.

Рассматривая, по-прежнему попарно, источники правого и среднего интервалов находим, что волны всех этих источников попарно гасятся, как и в предыдущих случаях. Только третий интервал посылает под этим углом непогашенные волны. Только самые крайние источники этого интервала посылают взаимно гасящиеся волны, но никакие промежуточные источники не имеют разности хода $1/2\lambda$, необходимой для полного попарного гашения; поэтому здесь имеет место по крайней мере частичное взаимное усиление волн. Из сказанного вытекает, что под данным углом ($\sin\theta = 3/2\lambda/w$) свет будет распространяться, но более слабый, чем тот, который третья часть всех источников посылает из щели вдоль средней линии. Поэтому данный максимум освещенности гораздо слабее центрального, где все источники щели взаимно усиливают свои волны в наибольшей степени.

Как уже упоминалось, при $\sin\theta = 2\lambda/w$ имеет место второй минимум освещенности (узел). При дальнейшем увеличении угла θ

освещенность вновь возрастает и достигает слабого максимума вблизи $\frac{5}{2}\lambda/w$. Затем она вновь падает до нуля при $3\lambda/w$. При еще большем росте θ освещенность продолжает поочередно принимать максимальные значения и падать до нуля, причем максимумы становятся все слабее и слабее, как показано на рис. 18.12.

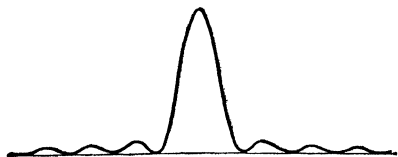


Рис. 18.12. Дифракционная картина от одной щели для света определенной длины волны. Освещенность экрана или фотопленки отложена по вертикали как функция расстояния точки экрана или пленки от средней линии.

18.7. Экспериментальная проверка теории для одной и двух щелей

Мы теперь располагаем теорией, связывающей вид дифракционной картины, получаемой от одной щели, с шириной щели и длиной волны света. Согласуется ли эта теория с непосредствен-

ными наблюдениями? Для выяснения этого вопроса необходимо располагать щелями точно измеренной ширины, а также измерять расстояния от средней линии до темных полос дифракционной картины, возникающих при освещении щели светом того или иного определенного цвета. Эти измерения показывают, что, в согласии с теорией, расстояния между соседними узлами (т. е. минимумами освещенности на экране) одинаковы для всех узлов. Кроме того, как предсказывает теория, расстояние между двумя узлами, ближайшими к центру, вдвое больше шага других узлов (измерьте эти расстояния сами на рис. III, б цветной вклейки). Далее, в соответствии с той же теорией, яркость максимумов тем меньше, чем они дальше от среднего максимума. Все это дает основания доверять изложенной выше теории дифракции от одной щели.

Наконец, можно определять длину волны одноцветного света, измеряя расстояние от центра дифракционной картины до первого узла. Используя равенство

$$x/L = \sin\theta = \lambda/w,$$

находим длину волны для соответствующего цвета. Найденные таким путем длины волн совпадают с данными, полученными с парой щелей или с многощелевым спектро스코пом. Это свидетельствует о том, что наше теоретическое объяснение результатов опыта Юнга и дифракции от одной щели по всей вероятности правильно.

Теперь понятно, почему нас не должны были смущать дифракционные картины от одной щели при обсуждении опыта Юнга. Этот опыт производился нами при весьма узких щелях (прорезанных в слое копоти на стекле лезвиями безопасной бритвы). При столь малой ширине каждой щели средняя яркая полоса ее дифракционной картины охватывает довольно большой угол. На достаточном расстоянии от щелей их средние яркие полосы в значительной своей части перекрываются, и уже внутри этой области перекрытия наблюдаются обычные интерференционные полосы от двух щелей. Боко-

вые же максимумы дифракционной картины отдельных щелей расположены слишком далеко от центра, они слишком слабы, чтобы быть

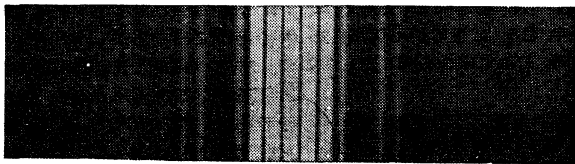


Рис. 18.13. При получении интерференционной картины от двух совершенно одинаковых довольно широких параллельных щелей, расположенных на расстоянии друг от друга, соизмеримом с их шириной, картина соединяет в себе признаки интерференционной картины от одной щели и от двух узких щелей.

легко наблюдаемыми. Чтобы они были заметнее, щели должны быть шире (рис. 18.13).

18.8. Разрешающая способность

Наше исследование дифракции света на одиночной щели показало, что свет от точечного источника, пройдя сквозь узкую щель или булавочный прокол, рассеивается и дает на экране пятно более широкое, чем пройденное отверстие. Мы также выяснили,

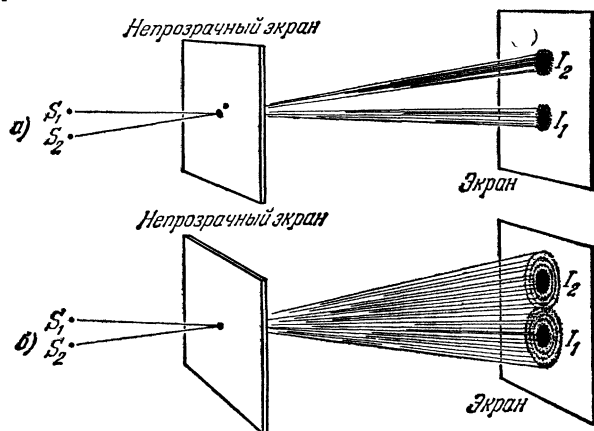


Рис. 18.14. а) При прохождении света от двух источников S_1 и S_2 через узкое отверстие изображения размыты, но разрешены, т. е. не сливаются. б) Если отверстие слишком узко, изображения перекрываются, т. е. не разрешаются (см. рис. 18.15).

что узкие отверстия рассеивают свет сильнее, чем широкие. Дифракция от узких отверстий имеет большое значение при проектировании микроскопов и телескопов, так как именно она определяет крайний предел полезного увеличения, достигаемого с помощью оптического прибора.

Чтобы понять, почему дифракция ограничивает полезное увеличение, рассмотрим, что получается, когда два близко сдвинутых точечных источника посылают свет сквозь булавочный прокол на экран. На рис. 18.14, а пятно I_1 является размытым изображением

источника S_1 , а I_2 — источника S_2 . Эти изображения являются, в сущности говоря, дифракционными картинками, образуемыми булавоочными проколами. Именно поэтому они велики и нерезки. Рис. 18.14, б отличается от предыдущего только меньшей шириной отверстия, которое еще больше рассеивает свет, в результате чего изображения расширены до того, что они перекрываются. Если

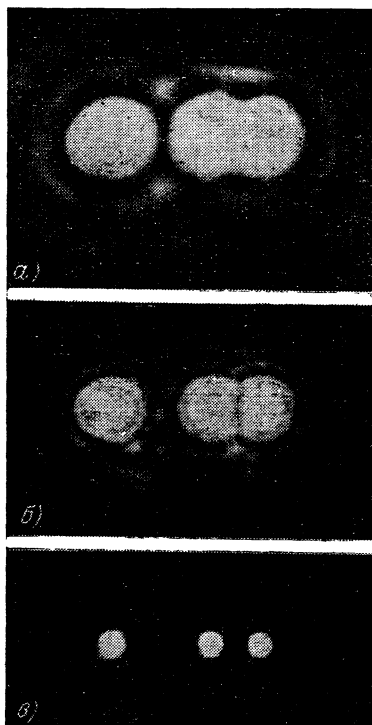


Рис. 18.15. Дифракционные картины от трех точечных источников, образованные линзами разных диаметров. По мере увеличения диаметра (от а к в) разрешающая способность повышается.

смотреть только на экран, изображенный на рис. 18.14, б, то трудно решить, видим ли мы две перекрывающиеся картины от двух точечных источников или от одиночного источника сложной формы. Когда отверстие настолько мало или источники настолько сближены, что их изображения неразличимы в отдельности, то говорят, что источники не разрешены. Когда мы можем различить отдельные изображения источников, то говорят, что эти источники разрешены. Разрешающая способность оптического прибора является мерой его способности давать раздельные изображения близких предметов.

При замене булавоочного прокола линзой можно сфокусировать свет от двух точечных источников, т. е. получить более или менее резкие изображения этих источников. Тщательный осмотр этих изображений, однако, показывает, что линза не устраняет дифракционного рассеяния света, так как при прохождении через линзу свет проходит через отверстие ограниченных размеров. На рис. 18.15 показан ряд фотоснимков одних и тех же точечных источников света. Снимки сде-

ланы через линзы с одинаковым фокусным расстоянием, но разных диаметров. На рис. 18.15, а свет проходит через линзу малого диаметра, на рис. 18.15, б — через более широкую линзу, на рис. 18.15, в — через самую широкую. На рис. 18.15, а изображения не разрешены. При увеличении диаметра линзы дифракция ослабевает и разрешающая способность линзы повышается; при очень широкой линзе изображения настолько хорошо разделены, что даже при несколько более сближенных источниках они могли бы быть разрешены.

В микроскопе, где свет проходит через объектив малого диаметра, следует ожидать сильного проявления дифракции. Повышение

увеличения микроскопа полезно только до тех пор, пока дифракция не препятствует разрешению близких мелких предметов. Дальнейшее повышение увеличения приводит к тому, что все предметы кажутся более крупными, но оно нисколько не помогает нам раздельно наблюдать более близкие предметы. Даже с наилучшими линзами рост увеличения микроскопа бесполезен, начиная с того увеличения, при котором мы ясно видим все, что может быть разрешено, несмотря на дифракцию.

Телескопы тоже подвержены влиянию дифракции. Чем больше диаметр объектива, как отражательного (зеркального), так и составленного из линз, тем выше разрешающая способность. Большой телескоп на г. Паломар способен разрешать отдельные звезды туманности Андромеды, что недоступно телескопам меньшего диаметра.

18.9. Интерференция в тонких пленках и слоях

Из интерференционных картин различного происхождения одним из наиболее часто встречающихся типов являются интерференционные полосы, возникающие при падении света на тонкие пленки, например мыльные. При падении белого света на тонкую пленку возникают характерные цветовые эффекты (рис. IV на цветной вклейке).

Исследование интерференции в тонких слоях мы начнем с рассмотрения картины, получаемой при свете одного спектрального цвета (рис. V на цветной вклейке). При отражении света от пленки в верхней ее части получилась широкая темная область. Здесь пленка имеет наименьшую толщину, так как мыльный раствор стекал вниз, оставляя за собой лишь пленку толщиной в несколько сцепившихся молекулярных слоев. Ниже этой области толщина пленки возрастает и наконец достигает такого значения, при котором отраженный свет ясно виден. Еще ниже, при еще большей толщине пленки, на снимке появляется темная полоса: отражение здесь прекращается. Однако при дальнейшем утолщении пленки вновь появляется отражение, за которым опять следует темная полоса. Чередование светлых и темных полос продолжается и дальше книзу.

То, что наличие светлой или темной полосы действительно зависит от толщины пленки, подтверждается наблюдениями за движением полос после образования свежей пленки при ее стекании вниз. Когда в результате этого стекания толщина верхней части пленки снижается до некоторой величины, там появляется яркая полоса. По мере дальнейшего стекания эта полоса перемещается вниз, а на ее прежнем месте образуется темная полоса. Этот процесс появления чередующихся ярких и темных полос вверх и их движения вниз по мере стекания пленки продолжается и далее, причем каждая полоса связана с областью пленки определенной толщины. В конце концов темная область распространяется вниз на всю площадь пленки, когда пленка становится очень тонкой.

Опыты с тонкими клинообразными слоями, например со слоями воздуха между поверхностями стеклянных пластинок, еще яснее демонстрируют роль толщины слоя (рис. VI на цветной вклейке). При уменьшении угла клина полосы (которые в данном случае расположены на равных интервалах друг от друга) увеличивают свой интервал, двигаясь от острия клина, причем каждая полоса остается связанной с совершенно определенной толщиной слоя.

Чем можно объяснить появление этих чередующихся ярких и темных полос? Они очень напоминают чередующиеся интерференционные полосы в опыте Юнга, и происхождение тех и других почти одинаково.

При падении света на слой прозрачной преломляющей среды часть его отражается от первой ее поверхности, а часть — от второй. Взгляните на рис. 13.7 или представьте себе характер зеркального изображения предмета на оконном стекле, когда вы и предмет находитесь в освещенной комнате в темную ночь. Если стекло достаточно толсто, то будут заметны два несовпадающих изображения. Разумеется, незначительная часть света, отраженного от задней поверхности стекла, будет отражаться обратно в стекло от передней поверхности, вместо того чтобы выходить к наблюдателю. Поэтому часть света может частично отражаться несколько раз внутри стекла, но для таких слабо отражающих сред,

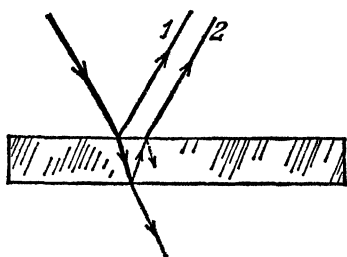


Рис. 18.16. Лучи 1 и 2 являются наиболее яркими из отражаемых лучей.

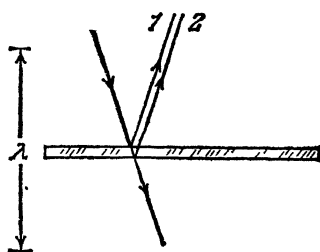


Рис. 18.17. Несмотря на то, что разность хода лучей 1 и 2, отраженных соответственно от верхней и нижней поверхностей пленки, составляет лишь ничтожную часть длины волны, эти лучи гасят друг друга.

как стекло или мыльная пленка, обычно заметны только первые два отражения: от передней и задней поверхностей слоя среды (рис. 18.16).

Подобно отражению от толстого слоя стекла, свет, отражаемый тонкой мыльной пленкой, состоит из двух лучей, прошедших разные расстояния. Назовем луч, отраженный от передней поверхности, первым лучом, а луч, прошедший сквозь пленку и отраженный от второй поверхности, — вторым (см. рис. 18.16). Именно интерференция подобных пар лучей образует яркие и темные полосы при отражении одноцветного света или разноцветные полосы при отражении белого света от тонких слоев или пленок.

Чтобы легче всего понять происхождение интерференционной картины, рассмотрим лишь случай нормального падения света на поверхность. Однако на рис. 18.17—18.21 лучи проведены с небольшим отклонением от нормали, чтобы они не сливались. (Разумеется, «нормальные лучи» не претерпевали бы никакого преломления при пересечении поверхностей раздела.) Начнем с очень тонкой пленки, подобной верхней части мыльной пленки, показанной на рис. IV цветной вклейки. Как известно из опытов с монослоями, даже толщина в несколько монослоев мала по сравнению с длинами волн видимого света. Для желтого света длина волны составляет около $6 \cdot 10^{-7}$ м, тогда как толщина слоя в 100 атомов равна лишь приблизительно 10^{-8} м. Рассматриваемая тонкая пленка иллюстрируется рис. 18.17. Так как толщина гораздо меньше длин световых волн, разность хода между двумя лучами тоже во много раз меньше длины волны, и можно было бы ожидать, что волны двух отраженных пучков лучей будут накладываться таким образом, что отраженные гребни обоих пучков будут почти совпадать. В таком случае отраженный свет должен быть виден. В действительности же никакого отражения здесь не происходит. Верхняя часть пленки темна. По всей видимости, волны двух отраженных пучков здесь гасят друг друга, вместо того, чтобы усиливать.

Это гашение может показаться загадочным; но если вспомнить поведение волн, распространяющихся и отражаемых на спиральных пружинах, то вопрос разъясняется. При отражении волнового импульса от более тяжелой пружины, на которой скорость волн меньше, происходит мгновенное обращение волны. При отражении же от более легкой пружины, где скорость больше, обращение не происходит (см. раздел 15.4). При отражении световых волн имеет место аналогичное положение. На первой (верхней на рис. 18.17) поверхности пленки отражение происходит от более преломляющей среды, в которой волны распространяются медленнее, тогда как на второй (нижней на рис. 18.17) поверхности свет отражается от воздуха, т. е. менее преломляющей среды, в которой световые волны имеют большую скорость. Можно, пожалуй, уподобить более преломляющую среду более тяжелой пружине. В таком случае световые волны, отраженные от первой поверхности пленки и образующие луч 1, должны претерпевать обращение в момент отражения; падающий гребень превращается в отраженную впадину. С другой стороны, гребень, падающий изнутри пленки на ее заднюю поверхность, отражается в виде гребня же, направляясь назад по лучу 2. Поскольку одна волна претерпевает описанное обращение, а другая — нет, они гасят друг друга, и отраженного света мы не видим.

Теперь посмотрим, что должно происходить по мере утолщения пленки. Луч 2, пронизывающий пленку вперед и назад, проходит больший путь, чем луч 1. Поэтому в луче 2 при утолщении пленки гребни все больше отстают. По достижении пленкой толщины в $\frac{1}{4}\lambda$ весь путь луча 2 в пленке достигает длины $\frac{1}{2}\lambda$; к концу

этого пути гребни, следовательно, отстают на $\frac{1}{2}\lambda$ (рис. 18.18). Поэтому, вместо того чтобы накладываться на впадины отраженного луча 1, как это было бы при толщине пленки, стремящейся к нулю, гребни луча 2 накладываются на гребни же отраженного луча 1, и яркость отраженного луча достигает максимума *).

При дальнейшем утолщении мыльной пленки гребни луча, претерпевающего внутреннее отражение, отстают еще больше. По достижении толщины пленки в $\frac{1}{2}\lambda$ полная длина пути луча 2 внутри пленки (туда и назад) достигает полной длины волны. Поскольку при этом гребни этого луча отстают на целую длину волны, они теперь опять накладываются на впадины отраженного луча 1, как

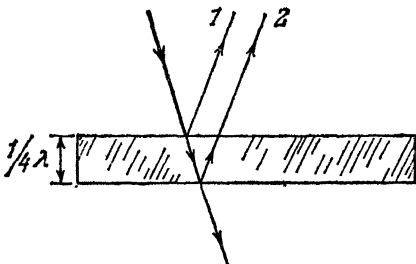


Рис. 18.18. Отражение света от передней и задней поверхностей пленки, толщина которой равна $\frac{1}{4}\lambda$. Так как луч 2 проходит лишний путь $\frac{1}{2}\lambda$, а волны луча 1 при отражении претерпевают полное обращение, отраженные лучи усиливают друг друга.

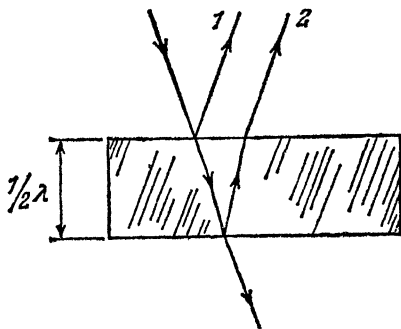


Рис. 18.19. Два отраженных луча при толщине пленки $\frac{1}{2}\lambda$. Разность хода равна λ , но волны луча 1 переворачиваются при отражении. Лучи взаимно гасятся.

это было при толщине пленки, почти равной нулю (рис. 18.19). Гребни и впадины двух отраженных лучей взаимно уничтожаются, и при отражении света в том месте пленки, где ее толщина равна $\frac{1}{2}\lambda$, мы видим темную полосу. При еще большем утолщении пленки через каждые $\frac{1}{4}\lambda$ будет иметь место смена отсутствия отражения на максимальную яркость отражения или наоборот. Отражение будет отсутствовать при толщине $\frac{1}{2}\lambda$, λ , $\frac{3}{2}\lambda$ и т. д. Наиболее яркое отражение будет иметь место при толщинах $\frac{1}{4}\lambda$, $\frac{3}{4}\lambda$, $\frac{5}{4}\lambda$ и т. д. Вот почему яркие и темные полосы, видимые на пленке, расположены на равных интервалах. Толщина клина изменяется равномерно; поэтому и полосы чередуются с равными интервалами.

18.10. Интерференция света, проходящего сквозь тонкую пленку

Если яркость отраженного света зависит от толщины пленки, то как ведет себя свет, проходящий сквозь пленку? Можно ожидать, что в отсутствие отражения яркость света, пропущенного пленкой, будет равна яркости падающего света. Опыт подтверждает

*) Само собой разумеется, что здесь мы имеем в виду ту длину волны, которую данный свет имеет внутри пленки.

это. При толщинах пленки в $\frac{1}{2}\lambda$, λ , $\frac{3}{2}\lambda$ и т. д. весь падающий свет, без остатка, пропускается пленкой. Кроме того, при толщинах пленки, при которых отражение происходит, энергия прошедшего света уменьшена как раз на величину энергии отраженного света.

Почему пропущенный пленкой свет ослабевает при усилении отраженного света, можно объяснить с точки зрения интерференции. Как и отраженный свет, пропущенный свет состоит из двух интерферирующих пучков лучей: пучка, прошедшего сквозь пленку без всяких отражений, и пучка, претерпевшего двухкратное внутреннее отражение (рис. 18.20).

Прочие внутренние отражения дают слишком слабые лучи, чтобы принимать их в расчет.

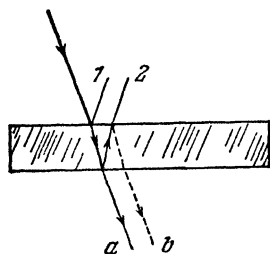


Рис. 18.20. В проходящем свете интерферируют неотраженный луч *a* и дважды отраженный луч *b*.

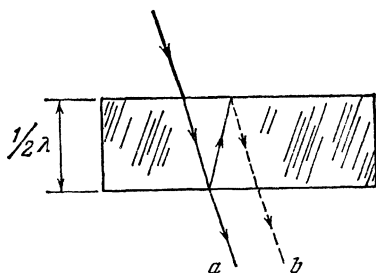


Рис. 18.21. При толщине пленки в одну полуволну неотраженный и дважды отраженный лучи усиливают друг друга. Лишний путь, пройденный лучом *b*, равен λ .

Проследим на рис. 18.20, к чему приводит интерференция лучей *a* и *b* при двух характерных значениях толщины пленки: при толщине, устраняющей отражение, и при толщине, соответствующей наиболее интенсивному отражению. Отражение отсутствует при толщине пленки в одну полуволну. В этом случае (рис. 18.21) дважды отраженный луч *b* отстает от неотраженного луча *a* на целую длину волны вследствие двухкратного прохождения пути $\frac{1}{2}\lambda$ при движении взад и вперед сквозь толщину пленки. Поэтому гребень дважды отраженных волн выходит из задней поверхности пленки одновременно с гребнем неотраженных волн. При наложении двух гребней происходит взаимное усиление колебаний, и окончательный результат сводится к тому, что в полном проходящем свете гребни выше, чем в одних неотраженных лучах. С другой стороны, при максимальном отражении, например при толщине пленки в $\frac{1}{4}\lambda$, дважды отраженный луч *b* проходит лишний путь $\frac{1}{2}\lambda$ по сравнению с неотраженным лучом *a*. Поэтому гребни волн луча *b* совмещаются со впадинами волн луча *a* и их взаимное наложение приводит к уменьшению высоты гребней и глубины впадин в пропущенном пленкой свете. Таким образом, при отсутствии отражения света пленкой происходит усиление пропущенных лучей, а при наи-

более интенсивном отражении пропущенный свет ослабляется в наибольшей степени. Если рассмотреть весь этот вопрос количественно, то оказывается, что сумма энергий отраженного и проходящего света равна энергии падающего света *).

18.11. Цвета тонких пленок интерференционного происхождения

При объяснении происхождения интерференционных полос в тонких пленках и слоях мы ограничились случаями падения света одного спектрального цвета. Теперь вернемся к интерференционной картине, показанной на рис. IV цветной вклейки, и выясним происхождение разноцветных полос, наблюдаемых при падении белого света. Во всех подобных случаях объяснение этих полос одинаково. Необходимо рассмотреть интерференционную картину, которая получилась бы при падении света каждого спектрального цвета в отдельности; затем для каждого узкого участка пленки надо отметить, какие цвета на нем могут и какие не могут наблюдаться, после чего можно предсказать тот сложный цвет, который будет виден в данном месте пленки при падении белого света. Например, если в некотором месте голубой цвет отсутствует, а красный интенсивен, при падении белого света будет виден цвет, сходный с одним из цветов красного конца спектра: с желтым или красным. Если в другом месте могут наблюдаться только голубой и красный цвета, то падение белого света даст в этом месте пурпуровый цвет. Изложенный метод предсказания цвета иллюстрирован на рис. VII цветной вклейки. Там этот метод применен к дифракционным картинам от одной щели при белом освещении, но тот же метод можно применять ко всем видам интерференционных картин, в частности к результатам опыта Юнга и к цветам тонких пленок.

18.12. Заключение

В этой части курса мы рассмотрели поведение света. Мы начали с его простейших свойств — распространения в пустоте, отражения и преломления. Явления, относящиеся к этим вопросам, мы попытались объяснить с помощью корпускулярной модели. Затем мы перешли к характерным волновым свойствам света и рассмотрели вопросы дифракции и интерференции. С помощью волновой кюветы мы непосредственно проследили эти волновые процессы.

Теперь нам ясно, что свет ведет себя как волны. Он не только отражается и преломляется подобно волнам, он обнаруживает и интерференцию. Отражение и преломление могут быть объяснены и простой корпускулярной теорией, но интерференция является характерной особенностью именно волн. После обнаружения интерференции света волновая природа света не подвергалась сомнению.

Хотя свет изучался издавна, современная наука продолжает открывать новые стороны в его поведении. Уже в текущем веке

*) Если пренебречь ничтожно слабым поглощением энергии волн внутри очень тонкой пленки. (*Прим. ред.*)

выяснилось, что рентгеновские лучи являются световыми волнами, причем наблюдения интерференции этих лучей позволили определить их длины волн. Но было также обнаружено, что свет иногда ведет себя как поток частиц. В некоторых случаях можно даже сосчитать число этих частиц, как это будет показано в части IV.

В настоящее время разработана единая теория, описывающая и волновую, и корпускулярную стороны поведения света.

У вас, вероятно, возникло много новых вопросов относительно света. Например, какова связь между измеряемой освещенностью и высотой волн? Мы не имеем возможности останавливаться здесь на этом вопросе, но ответ на него существует. По всей вероятности, большинство возникающих у нас вопросов вставало и перед другими лицами, которые успели по ним кое-что выяснить. Многие из подобных вопросов привели к потрясающим открытиям. Остановимся на одном примере. Какая среда является проводником света? Все вещественные среды влияют на распространение света, но свет распространяется и в вакууме. Однако если предположить, что существует некоторая среда, позволяющая свету распространяться и в вакууме (она была названа «эфиром»), то, как будет показано позже, эту среду невозможно обнаружить. Отрицательный результат измерений, имевших целью доказать существование эфира, составил одну из тех загадок, которые привели Эйнштейна к его теории относительности.

Мы не затронули многих общих вопросов, касающихся света и волн вообще. К числу таких общих вопросов относится вопрос о связи между энергией и высотой волн и многие другие, из которых приведем еще один последний пример.

Вы, возможно, замечали, что в некоторых помещениях (обычно с большими свободными площадями стен) существуют «зоны молчания», в которых звуки определенных тонов почти не слышны. Совсем рядом тот же звук хорошо слышен. Это легко продемонстрировать, издавая свист высокого тона. Этот эффект обусловлен интерференцией волн, испускаемых источником и отражаемых стенами. При некоторых частотах в помещении образуется неподвижная система узлов и пучностей, обычно называемая стоячими волнами.

В волновой кювете можно наблюдать отражение волн, когда они движутся к барьеру по нормали. Если падающие и отраженные волны имеют при этом приблизительно одинаковую высоту, то вблизи барьера можно видеть зоны покоящейся жидкости, расположенные на равных расстояниях друг от друга и чередующиеся с зонами вертикальных колебаний поверхности. Во всей этой прилегающей к барьеру зоне не видно никаких волн, которые распространялись бы к барьеру или от него. Здесь мы опять имеем пример стоячих волн. Стоячие волны встречаются среди волн любого происхождения. Мы вкратце затронем их вновь при изучении волн материи в части IV.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

1*. Каким образом можно искать узловые линии в темноте, находясь в лодке на озере, играющем роль волновой кюветы с длинными волнами? (Раздел 18.1.)

2. Почему нельзя наблюдать интерференцию от двух независимых источников света?

3. На интерференционной картине, полученной от двух узких щелей в белом свете, расстояние между темными полосами на экране составляет 0,32 см, расстояние между щелями — около 0,02 см, а расстояние от щелей до экрана — 130 см. Найти среднюю длину волны белого света.

4. Источник красного света создает интерференцию лучей от двух узких щелей, расположенных на расстоянии 0,01 см друг от друга. На каком расстоянии от щелей нужно поместить экран для того, чтобы интерференционные полосы вблизи средней полосы располагались с интервалом в 1 см? Какой получится интервал, если красный свет заменить фиолетовым?

5. В опыте с двумя узкими щелями, разделенными интервалом d , используется свет с длиной волны λ . Под какими углами образуются интерференционные максимумы освещенности?

6. Двухщелевой источник с постоянной разностью фаз можно воспроизвести, используя свет, идущий непосредственно от одиночной щели, и свет, отраженный от стеклянной пластинки (рис. 18.22). Интерференционные полосы можно наблю-

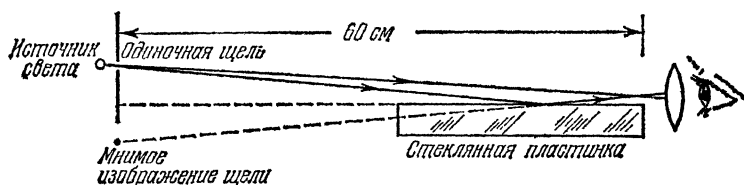


Рис. 18.22. К задаче 6.

дать через простую лупу, фокусируемую на край стеклянной пластинки. При таком способе наблюдения темные полосы, начиная от отражающей плоскости, оказываются равноотстоящими.

а) На что это указывает в отношении разности фаз между двумя источниками?

б) Если длина волны равна $5400 \text{ \AA}$, а темные полосы отстоят друг от друга на 0,9 мм, то каково расстояние щели от отражающей плоскости, если щель расположена в 60 см от края пластинки?

7*. Какой путь проходит свет в воздухе за $3 \cdot 10^{-9}$ с? (Раздел 18.3.)

8. Вычислите период колебаний в волнах желтого света. Приблизительно сколько таких длин волн уложится в пакете световых волн, излучаемых атомом за один прием?

9*. Интерференционная картина от двух щелей получена при освещении натриевым пламенем. Расстояние между узлами оказалось равным 1,0 мм. Каким получилось бы это расстояние при использовании в той же установке фиолетового света от паров калия? (Раздел 18.4.)

10*. Каково отношение интервалов между узловыми линиями на рис. VII цветной вклейки для красного и голубого света? (Раздел 18.5.)

11. Опишите оптический метод измерения ширины узкой щели.

12. Что и по какой причине произойдет с дифракционной картиной от одной щели, если отклонить экран с щелью от обычного положения, при котором плоскость щели перпендикулярна к падающим на нее лучам (рис. 18.23)?

13*. Почему частичное усиление на рис. 18.11 в случае интерференционной картины от одной щели дает гораздо меньшую яркость, чем у центрального максимума для той же щели? (Раздел 18.6.)

14. а) Желтый свет падает на щель шириной 1 мм. Определить углы, под которыми расположены первые четыре узла дифракционной картины.

б) Определить те же углы, если щель в 10 раз шире.

в) То же, если щель в 10 раз уже.

15. Как изменится дифракционная картина, получаемая по схеме рис. 18.8, если:

- а) закрыть правую половину цепочки точечных источников?
- б) закрыть крайнюю левую и крайнюю правую четверти?

16. Свет с длиной волны λ падает на три щели с интервалом d между соседними щелями. Докажите, что максимум освещенности получится под тем же углом, что и в случае двух таких же щелей.

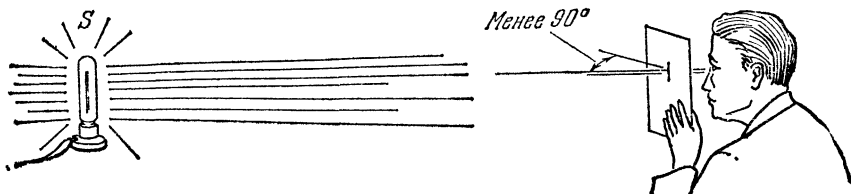


Рис. 18.23. К задаче 12.

17. Два громкоговорителя с диаметром мембраны 7,5 см расположены в 2 м друг от друга и издают непрерывный звук, частота которого составляет 1000 колебаний в секунду. Скорость звука равна 300 м/с.

- а) Под какими углами к средней линии, проведенной между громкоговорителями, можно ожидать отсутствия распространения звука?
- б) Что, по вашему мнению, произошло бы, если бы данный опыт был поставлен в помещении с твердыми голыми стенками?

18. На рис. 18.13 укажите темные полосы как принадлежащие дифракционным картинам каждой из щелей, так и обусловленные интерференцией света между щелями.

19*. Сравните увеличения снимков а) и б) на рис. 18.15. (Раздел 18.8.)

20. а) Микроскопы, под которыми предмет освещается ультрафиолетовым светом, позволяют достигать большего увеличения, чем микроскопы, использующие видимый свет. Чем это можно объяснить?

б) Как можно рассматривать изображения, если под микроскопом используются лучи невидимых частей спектра?

в) Поскольку стекло непрозрачно для ультрафиолетового света, как изготовить такого рода микроскоп?

21. Два изображения могут быть разрешены, если центральный максимум освещенности одного совпадает с первым узлом другого.

а) Докажите, что разрешающая способность узкой щели зависит от величины λ/ω , где ω — ширина щели.

б) Приблизительно на каком минимальном расстоянии друг от друга можно расположить два линейных источника света, чтобы разрешались их изображения, создаваемые щелью шириной 0,01 см (наименьшая ширина, которую вы можете легко получить), расположенной в 3 м от источников?

22. Звезды нередко фотографируются через синий светофильтр. В чем преимущество этого приема?

23*. Как изменится расстояние между линиями на рис. VI цветной вклейки при замене зеленого цвета красным? (Раздел 18.9.)

24*. Найти длину волны в воде для зеленого света, длина волны которого в воздухе составляет 5600 Å (скорость света в воде равна $\frac{3}{4}c$). (Раздел 18.9.)

25*. Для изготовления пластинок толщиной в $\frac{1}{4}\lambda$ для красного света с длиной волны 6100 Å используются разные материалы. Одинакова ли толщина всех таких пластинок? (Раздел 18.9.)

26*. Если между стеклянными пластинками (рис. VI цветной вклейки) зажать слева два одинаковых листа бумаги вместо одного, как изменится интерференционная картина? (Раздел 18.9.)

27. Используя верхнюю часть рис. V цветной вклейки, постройте график толщины пленки как функции расстояния, отсчитываемого вниз от верхнего края пленки.

28. Воздушный клин образован двумя стеклянными пластинками длиной по 10 см (рис. VI цветной вклейки), между которыми на одном конце зажат человеческий волос диаметром 0,09 мм. Интерференционная картина наблюдается в отраженном свете под прямым углом к поверхности пластинок.

а) Каков интервал между соседними полосами, если на пластинки падает синий свет?

б) Сколько ярких полос уложится на 1 см длины пластинки при пользовании красным светом?

в) Увидим ли мы максимум или минимум освещенности пластинок в месте их непосредственного соприкосновения?

г) Можно ли установить на основании этого опыта, какие волны претерпевают обращение фазы: отраженные от верхней или от нижней поверхности воздушного клина?

29. а) Чему равна разность хода между лучами a и b на рис. 18.21?

б) Сколько раз происходит там обращение волн?

в) Чему равно полное отставание по фазе между лучами a и b ?

30. Иногда линзы покрывают тонкой прозрачной пленкой, чтобы ослабить отражение света.

а) Если показатель преломления пленки равен 1,3, какова минимальная толщина пленки, при которой отражение желтого света от линзы будет самым слабым?

б) Линзы такого рода в отраженном свете нередко имеют слабую пурпуровую окраску. Почему?

31. Не можете ли вы указать причину, по которой не наблюдается интерференция света при его отражении от двух поверхностей оконного стекла?

II.1. Отражение от плоского зеркала

Возьмите карандаш и держите его вертикально перед собой на расстоянии вытянутой руки. Другой рукой держите второй карандаш примерно на 15 см ближе первого. Не передвигая карандашей, посмотрите на них, перемещая голову вправо и влево. Куда сместится карандаш, расположенный ближе к вам, по отношению к первому карандашу, если вы переместите голову налево? Теперь поместите второй карандаш ближе к первому и наблюдайте кажущееся относительное перемещение карандашей друг относительно друга при перемещении вашей головы. Каким образом следует расположить карандаши, чтобы при этом не наблюдалось их относительного перемещения друг относительно друга, т. е. не наблюдалось бы параллакса?

Попытаемся теперь использовать параллакс для определения положения изображения гвоздя, которое мы видим в плоском зеркале. Установите плоское зеркало в вертикальном положении на столе, прикрепив его к деревянному бруску с помощью резинового жгута. Поставьте гвоздь на шляпку на расстоянии 10 см перед зеркалом. Где, по-вашему, находится изображение гвоздя? Перемещайте голову вправо и влево и смотрите на гвоздь и его изображение в зеркале. Находится ли изображение гвоздя на одном и том же расстоянии перед самим гвоздем или за ним? Возьмите второй гвоздь и определите положение изображения гвоздя, перемещая второй гвоздь около первого до тех пор, пока не исчезнет параллакс между этим вторым гвоздем и изображением первого гвоздя.

Определите этим способом, где находятся изображения нескольких положений объекта. Как можно сравнить расстояния изображения и объекта от отражающей поверхности?

Мы можем также определить положение объекта, проводя лучи, указывающие направление, в котором свет идет от объекта к нашему глазу. Воткните булавку вертикально в листок бумаги, лежащий на куске мягкого картона. Эта булавка будет представлять собой объект. Определите направление, в котором свет идет от булавки к глазу, воткнув еще две булавки в листок бумаги вдоль линии зрения. Ваш глаз должен быть на расстоянии вытянутой руки от всех трех булавок, для того чтобы вы могли одновременно все отчетливо видеть. Посмотрите на булавку, являющуюся объектом, по несколь-

ким совершенно различным направлениям и с помощью еще нескольких булавок отметьте получившиеся линии зрения от глаза к объекту? Где пересекутся эти линии?

Этот же прием мы можем использовать для определения положения изображения. На чистом листе бумаги определите положение изображения булавки, получающегося в плоском зеркале с помощью по крайней мере трех лучей, проведенных в трех совершенно различных направлениях. Перед тем как убрать зеркало, отметьте его положение, проведя на его месте прямую линию. В какой точке сойдутся линии зрения?

Проведите лучи, показывающие, как идет свет от булавки, являющейся объектом, к точкам на зеркале, в которых лучи света отражаются в ваш глаз. Какой вывод можно сделать об углах, образованных плоскостью зеркала с лучами света?

Расположите на бумаге два зеркала под прямым углом друг к другу и поставьте где-нибудь между ними гвоздь в качестве объекта. Определите все изображения по методу параллакса. Исходя из того, что вы узнали об отражении, покажите, что эти изображения находятся именно в тех местах, где вы должны были бы найти их.

11.2. Изображение в вогнутом зеркале

Посмотрите на ваше изображение в вогнутом зеркале. Какое это изображение: прямое или перевернутое? Меняется ли размер и положение изображения, если вы передвигаете зеркало ближе к вам или дальше от вас?

Для того чтобы систематически исследовать изображение, получающееся в вогнутом зеркале, расположите это зеркало и светящуюся лампочку на длинной полоске бумаги, как это изображено на рис. 11.1. Начните с того, что поместите лампочку на конце бумажной полоски и постройте ее изображение по методу параллакса. Будет ли это изображение прямым или перевернутым?

Далее постепенно передвигайте объект по направлению к зеркалу, отмечая и записывая по мере передвижения положения объекта и изображения. Продолжайте это до тех пор, пока изображение не дойдет до конца бумажной ленты и вы уже не сможете его отмечать. Каким образом изменение в положении изображения связано с изменением в положении объекта? В каком месте бумажной ленты должно получиться изображение, когда объект будет удален на несколько метров? Проверьте ваш ответ. Если объект будет находиться далеко, вы сможете легко определить положение изображения, сфокусировав его на небольшом (1 или 2 см) кусочке бумаги. То место, в котором получается изображение, когда объект находится на очень большом расстоянии, называется главным фокусом зеркала.

Теперь поместите лампочку-объект как можно ближе к зеркалу и определите положение изображения по методу параллакса. Получается ли оно прямым или перевернутым? После этого снова посте-

пенно удаляйте объект от зеркала, отмечая и записывая положение объекта и изображения до тех пор, пока изображение еще помещается на бумажной ленте.

Измерьте расстояние s_0 от главного фокуса до объекта и расстояние s_i от главного фокуса до изображения для нескольких пар точек. Вы увидите, что s_i заметно уменьшается при увеличении s_0 . Постройте графики зависимости s_i от $1/s_0$. Какой вывод вы можете сделать о соотношении между s_0 и s_i ?

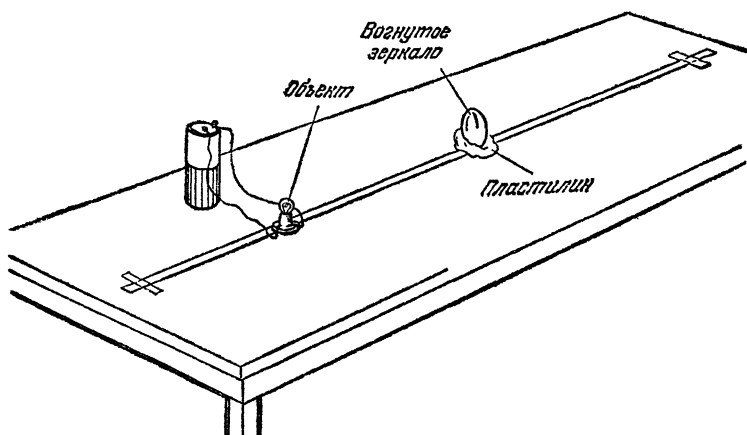


Рис. 11.1.

Где получится изображение, если объект будет находиться в главном фокусе? Можете ли вы увидеть при этом изображение?

11.3. Преломление

Преломление света удобно изучать, рассматривая углы падения и преломления. Когда, например, свет попадает из воздуха в воду, то углом преломления принято называть угол между направлением луча в воде и перпендикуляром к поверхности воды. В описываемом ниже опыте мы постараемся найти соотношение между углом падения и углом преломления.

Процарапайте булавкой вертикальную линию посередине плоской стенки прозрачного полуцилиндрического сосуда. Заполните этот сосуд на половину высоты водой и установите его на положенный на мягкий кусок картона (рис. 11.2) лист миллиметровой бумаги таким образом, чтобы основание перпендикуляра попадало в точку пересечения двух линий на бумаге. Воткните булавку в какую-нибудь точку, находящуюся на линии, проходящей через центр сосуда, как это изображено на рис. 11.2. Постарайтесь воткнуть булавку строго вертикально.

Теперь посмотрите на булавку через воду со стороны выпуклой поверхности сосуда, передвигая голову до тех пор, пока булавка и вертикальная метка не окажутся на одной линии зрения. Отметьте

положение этой линии с помощью другой булавки. Какой вывод вы можете сделать о преломлении света, идущего из воздуха в воду и из воды в воздух при угле падения 0° ?

Измените положение первой булавки так, чтобы угол падения получился равным приблизительно 20° . С помощью второй булавки

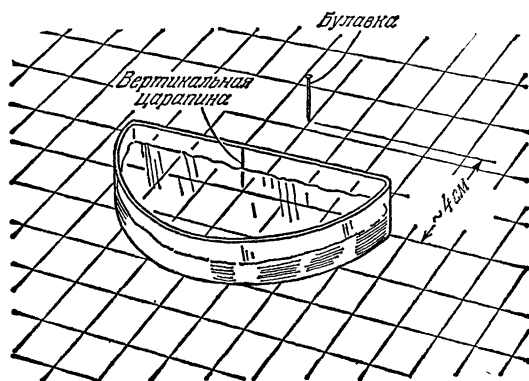


Рис. 11.2.

отметьте направление луча, идущего от первой булавки через вертикальную метку и сквозь воду. Повторите то же самое для углов падения примерно до 80° . Чтобы обеспечить резкое изображение первой булавки при больших углах падения, следует втыкать эту

булавку на расстоянии не ближе 4 см от вертикальной метки на плоской стенке сосуда (по отверстиям, остающимся в бумаге от булавок, можно измерить углы).

Остается ли постоянной разность между углами падения и преломления? Остается ли постоянным отношение между этими углами?

Начертите окружность большого радиуса с центром в точке, в которой луч света входит в воду, и для каждого случая найдите отношение полухорды

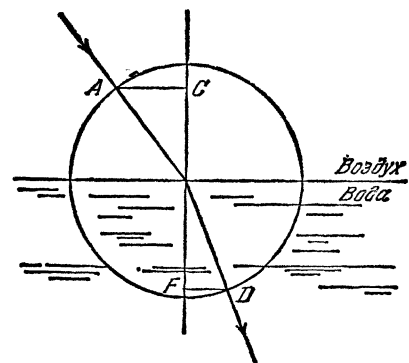


Рис. 11.3.

AC (рис. 11.3) к полухорде FD. Так как отношение полухорд равно отношению синуса угла падения к синусу угла преломления, проще найти это отношение, измеряя углы и вычисляя отношение их синусов.

Постройте график зависимости отношения синусов углов падения и преломления от угла падения. Кроме того, на том же чертеже постройте график зависимости отношения углов падения и прелом-

ления от угла падения. Какое из этих отношений в большей степени сохраняется постоянным? Какой формулой лучше всего можно выразить закон преломления света?

Каков будет ход луча на границе раздела «воздух — вода», если пустить луч в обратном направлении? Исследуйте этот вопрос с помощью имеющейся у вас установки.

Можете ли вы изобразить ход луча, проходящего через стеклянную плоскопараллельную пластинку?

Повторите опыт не с водой, а с другой жидкостью в полуцилиндрическом сосуде, и постройте график зависимости отношения синусов углов падения и преломления от угла падения. Будет ли отличаться преломление этой жидкости от преломления воды?

II.4. Изображения, образованные с помощью собирающей линзы

Посмотрите сквозь собирающую линзу на какой-нибудь объект. Получается ли при этом изображение больше или меньше, чем объект? Получается ли оно прямое или перевернутое? Изменяется ли размер и положение изображения при перемещении линзы по отношению к объекту?

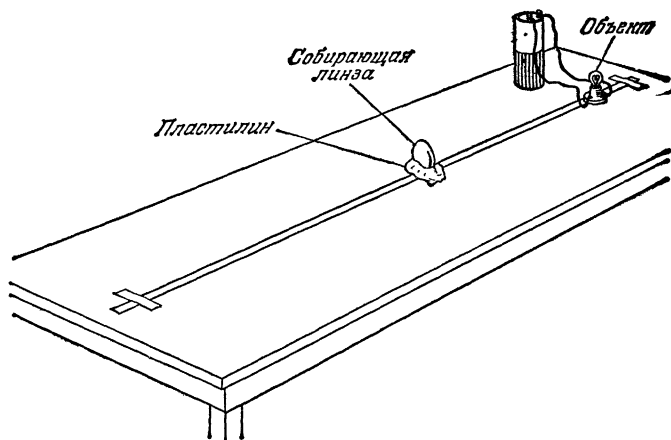


Рис. II.4.

Чтобы выяснить, какие изображения получаются с помощью собирающей линзы, установите линзу и светящуюся лампочку на длинной полоске бумаги, как это изображено на рис. II.4. Вначале расположите на конце бумажной полоски лампочку и определите положение ее изображения по методу параллакса. Прямое или перевернутое изображение получается при этом?

Теперь понемногу придвигайте объект к линзе, отмечая и записывая как положение объекта, так и положение линзы. Продолжайте это делать до тех пор, пока изображение не дойдет до конца бумажной ленты, и вы не сможете больше его отмечать. Как изменяется

положение изображения при изменении положения объекта? Где (на бумажной ленте) должно получиться изображение, если объект расположить на расстоянии нескольких метров от линзы? Проверьте это на опыте. Если расположить объект далеко, то можно легко найти его изображение на листе бумаги. То место, где находится изображение объекта, удаленного от линзы на большое расстояние, называется главным фокусом линзы. Каким образом вы можете убедиться в том, что у линзы имеются два главных фокуса — по одному с каждой стороны линзы и на одинаковом расстоянии от ее центра?

Теперь поместите лампочку (объект) возможно ближе к линзе и снова определите положение изображения по методу параллакса. Прямым или обратным получится оно при этом? Затем снова постепенно удаляйте предмет от линзы и отмечайте и записывайте положение изображения до тех пор, пока изображение еще получается на бумажной ленте.

Измерьте расстояния: s_0 от главного фокуса до объекта и s_i от главного фокуса до изображения. (Расстояние s_0 измеряется от главного фокуса до объекта с той стороны линзы, где расположен объект, а расстояние s_i всегда измеряется от главного фокуса до изображения по другую сторону линзы.) Так как s_i отчетливо уменьшается при увеличении s_0 , то полезно построить график зависимости s_i от $1/s_0$. Что вы можете сказать о характере зависимости между s_0 и s_i ?

Где получится изображение, если поместить объект в главном фокусе? Сможете ли вы увидеть это изображение?

11.5. Преломление частиц

Стальной шарик, катящийся по горизонтальной плоскости, движется по прямой линии с почти постоянной скоростью. Если шарик попадает на другую плоскость, расположенную наклонно по отношению к горизонтальной плоскости, то он изменяет направление своего движения. В конце наклонной плоскости направление движения шарика будет отличаться от направления первоначального движения.

Путь шарика, скатывающегося таким образом, очень похож на ход луча света, преломляющегося на границе раздела двух сред, например воздуха и стекла. Когда шарик скатывается сверху вниз по наклонной плоскости, он изменяет направление своего движения; на границе раздела двух сред свет изменяет направление. Поэтому в нашей модели верхний уровень соответствует одной среде (воздуху), а нижний уровень — другой среде (стеклу). Наклонная плоскость соответствует границе раздела между ними. С помощью аппаратуры, изображенной на рис. 11.5, мы можем на опыте убедиться в том, что путь «преломляющейся» частицы подчиняется закону Снеллиуса.

Скатите стальной шарик по верхней плоскости так, чтобы он достиг наклонной плоскости. Снимите копировальную бумагу и отметьте след, прочерченный шариком на верхней и нижней плоско-

стях. Повторите опыт пять или шесть раз при разных углах падения, тщательно следя за тем, чтобы шарик скатывался всегда из одной и той же точки и поэтому всегда имел бы одну и ту же начальную скорость.

Измерьте и запишите углы падения и преломления, образованные направлением движения шарика с перпендикуляром, проведенным к горизонтальным границам наклонной плоскости. Можно ли

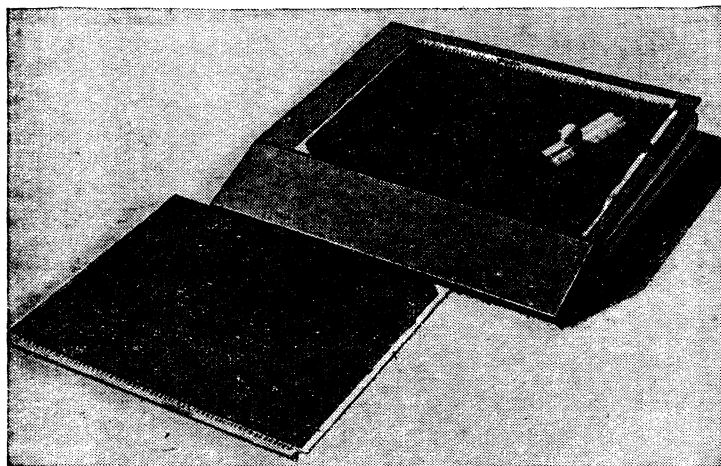


Рис. 11.5.

описать изменение направления шарика с помощью закона Снеллиуса? Какой вывод о скорости света в воде по сравнению со скоростью света в воздухе можно сделать на основании этой модели с частицами?

Могли бы вы сделать модель «линзы», которая будет фокусировать падающие шарики?

11.6. Волны на спиральной пружине

Вы, вероятно, много раз видели различные волны, но не проделывали с ними никаких опытов. В этом опыте вы начнете детально изучать волны.

В то время как ваш партнер держит за один конец пружину на гладком полу, растяните ее за другой конец, чтобы пружина вытянулась в длину приблизительно до 10 м. После небольшой практики вы научитесь возбуждать короткие легко наблюдаемые импульсы. Понаблюдайте за этими импульсами, когда они распространяются по пружине. Изменяется ли их форма?

Изменяется ли скорость их распространения?

Возбудите несколько импульсов различных размеров и форм. Будет ли зависеть скорость распространения от размера импульса?

Чтобы более точно определить скорость распространения волн, вы можете наблюдать движение импульса в одну и в другую сторону несколько раз. При этом вы должны допустить, что скорость распространения импульса не изменяется при его отражении. Каким образом можно проверить справедливость этого допущения?

Измените натяжение пружины. Окажет ли это влияние на скорость распространения импульса?

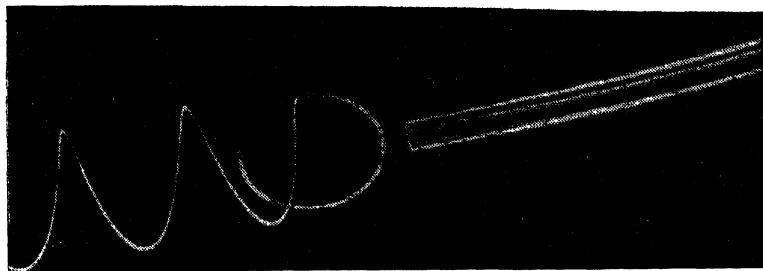


Рис. 11.6.

Прodelайте опыт с двумя пружинами из одного и того же материала, но растянутыми на разную длину. Должны ли вы рассматривать их как одинаковые или как различные среды?

Вы и ваш партнер можете послать в один и тот же момент времени два импульса. Что произойдет при столкновении этих импульсов? Попробуйте прodelать это с импульсами разных размеров и

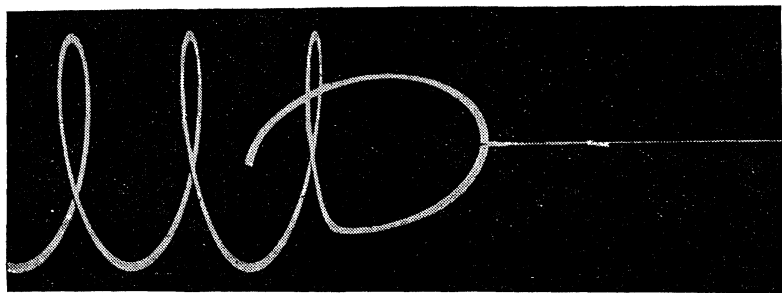


Рис. 11.7.

форм, посылая их с одного и того же конца пружины и с противоположных концов. Как при встрече импульсов будет отличаться максимальное смещение пружины от максимального смещения в каждом отдельном импульсе? Вы можете определить наибольшее смещение в отдельном импульсе по перемещению вашей руки на определенное расстояние при возбуждении импульса. Третий участник

может отметить мелом наибольшее смещение пружины при встрече импульсов.

Мы можем исследовать переход волн из одной среды в другую, соединив вместе две различные пружины, по которым волны распространяются с различными скоростями (рис. II.6). Пошлите импульс сначала в одном направлении, а затем в другом. Что произойдет, когда импульс достигнет места соединения обеих пружин?

Привяжите пружину к длинной тонкой нити (рис. II.7). Как отражается импульс, посланный вдоль пружины, когда он достигает нити? Чем отличается отражение в этом случае от отражения в случае закрепленного конца?

Сравните скорости распространения импульса по нити и по пружине. Какая из этих двух скоростей больше?

II.7. Волновые импульсы в волновой кювете

Смонтируйте плоскую ванну, экран и источник света так, как это изображено на рис. II.8. Наполните ванну водой на глубину от 0,5 до 0,75 см и измерьте глубину во всех четырех углах, чтобы убедиться, что она всюду одинакова.

Теперь вы располагаете очень удобной установкой для изучения поведения волн; она обладает тем преимуществом перед спиральной пружиной, что в ней направление распространения волн не ограничено какой-то одной линией. Чтобы убедиться в этом, коснитесь поверхности воды кончиком пальца. Какую форму при этом будет иметь волна, которую вы увидите на экране?

Будет ли скорость ее распространения одинакова по всем направлениям?

Вы можете также возбудить прямолинейный импульс*) на поверхности воды в ванне, поворачивая в воде на неполный оборот длинную планку. (Возьмитесь рукой за верхний край планки и переместите его вперед приблизительно на 1 см.) Попрактикуйтесь в возбуждении таких импульсов до тех пор, пока вы не научитесь получать импульсы, дающие резкое и яркое изображение на экране.

Будут ли волны оставаться прямолинейными при их распространении вдоль ванны?

Поместите в ванну прямой барьер и возбудите импульсы таким образом, чтобы их угол падения на барьер был равен 0° . В каком направлении они будут отражаться?

Заставьте волны отражаться под разными углами. Будут ли отраженные волны прямолинейными? В каком соотношении будут углы падения и отражения волн?

*) Прямолинейные импульсы и волны чаще называют плоскими, хотя это не совсем точно. В плоской волне волновая поверхность представляет собой плоскость, а в прямолинейной волне волновая поверхность превращается в прямую линию, распространяющуюся в направлении, перпендикулярном к этой линии. (Прим. ред.)

Вы можете, вместо того чтобы проводить непосредственные измерения, изучить несколько случаев, из которых отчетливо будет видно соотношение между углами падения и отражения. Понаблюдайте, например, как будет отражаться круговая волна от прямого

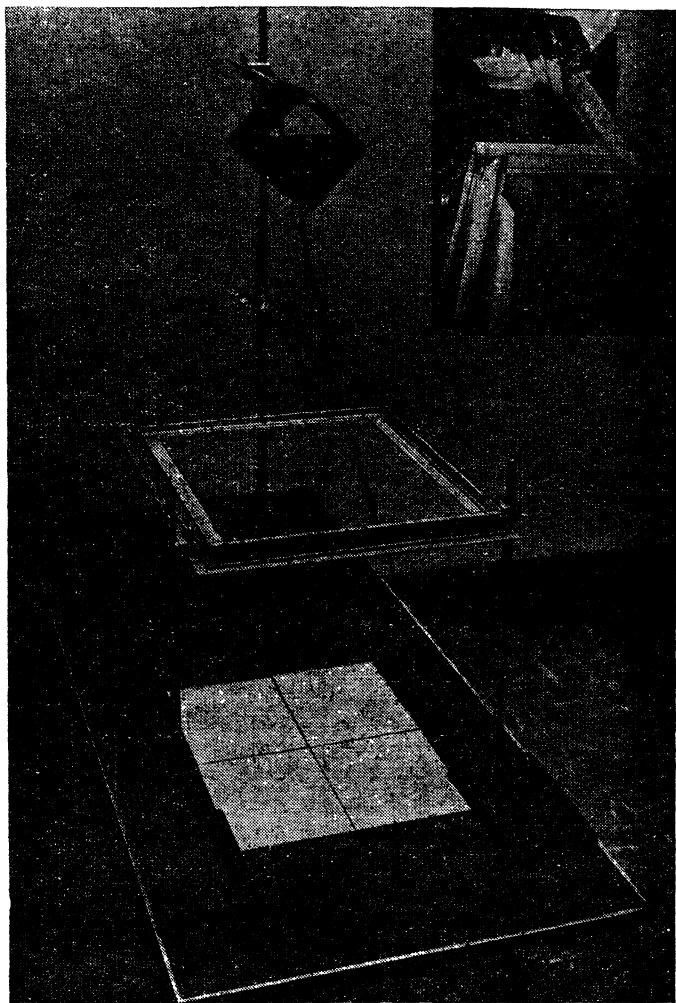


Рис. 11.8.

барьера. Можете ли вы определить положение источника отраженной волны (изображение точки, в которой возникла волна)? Как можно объяснить полученный результат?

Изогните резиновую трубку большого диаметра, как это изображено на рис. 11.9. Форма изогнутой трубки будет близка к па-

рабolicеской. Что получится, если использовать эту изогнутую трубку для отражения от нее прямолинейных волн в ванне? Определите положение фокуса параболы из отражения таких волн и отметьте его положение на экране. Попробуйте проследить за движением нескольких небольших участков волны. Каким образом вы можете определить направление движения каждого сегмента? Как связано это направление с направлением лучей света? Можно ли считать, что лучи, соответствующие первоначальному направлению волны, параллельны друг другу?

Возбудите круговые волны из фокуса параболы. Какова будет форма отраженных волн? Существуют ли другие точки, которые будут давать такой же результат?

Какое предположение следует сделать о соотношении между углами падения и отражения для того, чтобы объяснить полученные вами результаты?

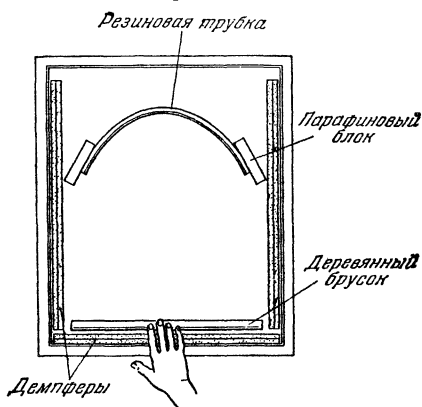


Рис. 11.9.

11.8. Периодические волны

Соотношение $v = f\lambda$ для скорости, частоты и длины волны периодических волн справедливо для любых периодических волн. Теперь мы используем это соотношение для описания волн, наблюдаемых в плоской ванне и на спиральной пружине.

Смонтируйте генератор прямолинейных волн, изображенный на рис. 11.10 (глубина воды должна быть от 0,5 до 0,75 см). Попробуйте в генерировании волн различной частоты. Посмотрите на волны через ваш стробоскоп (2 или 4 открытые щели) и «остановите» их движение.

После того как вы отрегулировали генератор волн на низкие частоты, пусть ваш партнер поможет вам изменить частоту вращения стробоскопа в тот момент, когда вы «остановите» волны. Как связана частота вращения стробоскопа с частотой волн?

Для того чтобы найти длину волны, «остановите» волны с помощью стробоскопа и попросите вашего партнера положить два карандаша или линейку параллельно направлению движения волн на протяжении нескольких длин волн.

Проделайте несколько измерений частоты и длины волны и вычислите скорость распространения. Какова будет точность вашего измерения скорости распространения волн? Учтите при этом, что длину волны вы измеряли по изображению волн на экране. Как связаны эти кажущиеся длины волн с истинной длиной волны на поверхности воды?

Картину распространения волн по поверхности воды можно также остановить, поместив посередине ванны барьер, как это изображено на рис. II.11. Падающие и отраженные волны будут складываться друг с другом и давать стационарную картину, которая будет соответствовать стоячим волнам. В каком соотношении

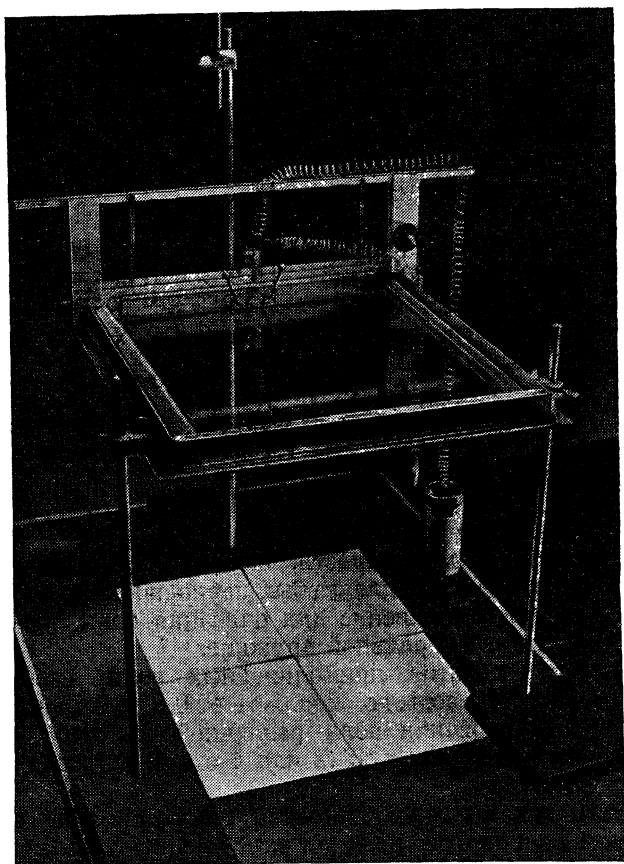


Рис. II.10.

будет находиться расстояние между двумя светлыми полосами в стоячих и проходящих волнах? Можете ли вы измерить длину волны по картине стоячих волн?

Можете ли вы обнаружить изменение в скорости распространения волн, если глубина воды в ванне увеличится приблизительно до 2 см?

Легкими движениями руки создайте периодические волны на спиральной пружине. Подбирайте частоту до тех пор, пока не возникнут стоячие волны. Измеряя длину волны и частоту, определите скорость волн, распространяющихся по пружине.

Можно ли образовать стоячие волны любой длины волны, не изменяя при этом длину пружины?

Если у вас есть две спиральные пружины, по которым импульсы распространяются с различной скоростью, сцепите их вместе за концы. Попробуйте создать стоячие волны в обеих пружинах. Закрепите один конец этих двух пружин и встряхивайте за другой конец. Каково будет соотношение между частотами, длинами волн и скоростями их распространения в этих двух средах?

11.9. Преломление волн

В опыте 11.8 мы пришли к выводу, что скорость волн на поверхности воды зависит от глубины воды. Поэтому две различные глубины воды представляют собой как бы две разные среды, в которых могут распространяться волны. Отсюда следует, что волны на поверхности воды могут преломляться, если они будут переходить, например, из области, где глубина больше, в область, где глубина меньше.

Укрепите стеклянную пластинку таким образом, чтобы ее верхняя поверхность была расположена не менее чем на 1,5 см выше дна ванны. Добавьте в ванну столько воды, чтобы глубина воды над

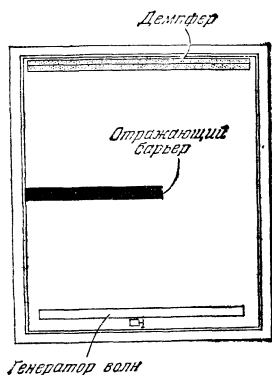


Рис. 11.11.

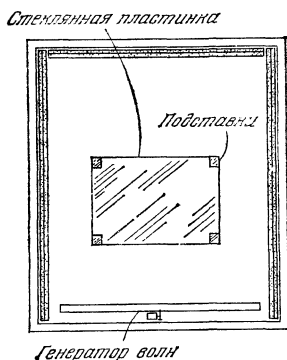


Рис. 11.12.

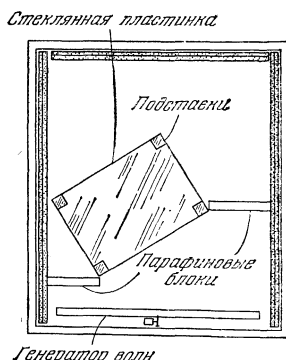


Рис. 11.13.

стеклянной пластинкой была не больше, чем 0,2 см. Убедитесь в том, что глубина воды над стеклянной пластинкой всюду одинакова.

Чего вы можете ожидать, если прямолинейные периодически возбуждаемые волны, распространяясь по поверхности воды, из области, где глубина больше, попадут в область, где глубина меньше, при условии, что граница раздела между этими областями параллельна генератору волн (рис. 11.12)? Используя низкочастотные вол-

ны, проверьте с помощью стробоскопа ваше предположение о влиянии глубины воды на скорость распространения волн.

Теперь поверните стеклянную пластинку так, чтобы граница раздела «сред» не была параллельна падающим волнам (рис. II.13). Прямолинейны ли преломленные волны?

Сопоставьте углы падения и преломления волн. Что можно сказать о длинах волн, распространяющихся в двух областях, различающихся между собой по глубине воды? Что можно сказать о скоростях распространения волн в этих двух областях? Сохраняя частоту возбуждения волн постоянной, попробуйте проделать опыты с другими углами падения.

Какая из двух моделей, волновая или корпускулярная, лучше согласуется с законами преломления света, если мы учтем, что в одной из сред скорость распространения больше?

Для того чтобы установить количественное соотношение между углами падения и преломления, требуется большая тщательность. Поддерживая частоту постоянной, вы можете измерить угол преломления для четырех или пяти различных углов падения. В каких пределах вы можете выбирать углы падения? Какой вывод вы можете сделать на основании полученных вами результатов?

II.10. Волны и препятствия

Если на пути параллельного пучка света поместить непрозрачное тело, то на экране, расположенном за этим телом, получится



Рис. II.14.

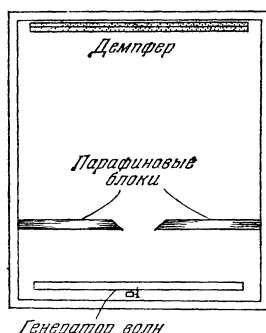


Рис. II.15.

его резко очерченная тень. При этом размеры тени будут такими же, как и размеры тела. Что произойдет, если на пути плоской волны поместить препятствие?

Поместите небольшой гладкий парафиновый блок в ванну на расстоянии приблизительно 10 см от генератора плоских волн (рис. II.14) и возбудите периодические волны большой длины. Будут ли волны распространяться по прямой с обеих сторон блока? Можете ли вы обнаружить присутствие блока только по картине вблизи краев экрана? Отбрасывает ли блок резкую тень?

Какая картина наблюдается за блоком, когда длина волны уменьшается при увеличении частоты? (Для получения хороших волн при высокой частоте генератор должен быть очень гладким. Нужно, чтобы на его ребре не было неровностей.) При высоких частотах картина волн на поверхности воды хорошо видна, если рассматривать ее с помощью стробоскопа, у которого все щели открыты. При каких условиях блок будет давать резкую тень?

Мы можем пропустить параллельный пучок света через малое отверстие. Если расположить экран за отверстием, то мы увидим на нем светлое пятно такого же размера, как и отверстие. То же самое мы можем сделать и в нашей ванне (рис. II.15). Будут ли волны большой длины прямолинейными за щелью? Продолжают ли волны двигаться в первоначальном направлении? Что произойдет, если вы будете постепенно уменьшать длину волны? Начертите схематическое изображение изменения картины волн на поверхности воды.

После того как вы наблюдали влияние длины волны на картину волн на поверхности воды за щелью, проследите за влиянием ширины щели. Попробуйте сделать это с волнами средней длины. Как вы должны изменить длину волны, чтобы восстановить прежнюю картину волн на поверхности воды?

II.11. Волны от двух точечных источников

Что произойдет, если два точечных источника, находящихся близко друг от друга, будут генерировать периодические волны одной и той же частоты? Попробуйте осуществить это в плоской ванне с двумя точечными источниками, прикрепленными к генератору плоских волн на расстоянии около 5 см друг от друга. Как вы могли бы описать получающуюся при этом картину? Есть ли такие области, в которых волны от двух источников все время гасят друг друга? Как изменяется картина, когда вы меняете частоту?

Измените расстояние между источниками, не останавливая мотора, и частоту поддерживайте по возможности постоянной. Как изменяется при этом картина, наблюдаемая на поверхности воды?

Применяя принцип суперпозиции, вы можете убедиться в том, что для двух точечных источников, имеющих одинаковую фазу, направление n -й узловой линии в удалении от источников дается соотношением

$$\sin \theta_n = x/L = (n - 1/2) \lambda/d.$$

Проверьте это соотношение, определив из него длину волны по измеренным значениям x , L , n и d и сравнив полученную величину с результатом непосредственного измерения длины волны.

Вспомните, что прямолинейные волны, проходя через узкую щель, сильно дифрагируют. Если щели достаточно узки, то их действие такое же, как и точечных источников. Можете ли вы повторить этот опыт, используя генератор прямолинейных волн и две щели, сделанные из парафиновых блоков?

II.12. Интерференция и фаза

В последнем опыте мы изучали интерференционную картину, получавшуюся от двух точечных источников, обладавших одинаковой фазой. В этом опыте мы увидим, как изменяется интерференционная картина (направление узловых линий), когда у двух точечных источников возникает разность фаз.

Генератор, в котором может быть осуществлена разность фаз, изображен на рис. II.16. Два штока с обеих сторон мотора закреплены эксцентрично. Если оба они в одно и то же время поднимаются,

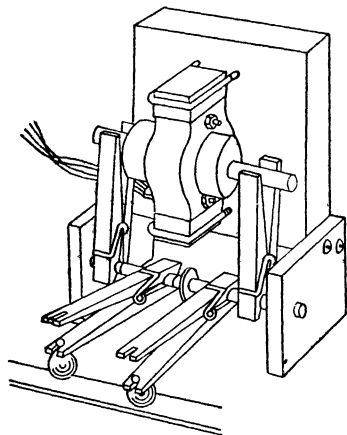


Рис. II.16.

то источники находятся в одной и той же фазе. Если же один поднимается, а другой опускается, то задержка фазы составляет π . Установите такое же расстояние между источниками, как и в предыдущем опыте, подберите такую же длину волны и так отрегулируйте генератор, чтобы оба источника имели одинаковую фазу. Получите ли вы такую же интерференционную картину, как и раньше?

Теперь изменяйте понемногу разность фаз и наблюдайте, как будет изменяться направление узловых линий. Используя в качестве ориентира интерференционную картину, получающуюся от двух источников с одинаковыми фазами, определите из-

менение в положении первой узловой линии при изменении разности фаз от нуля до 2π . Как изменится положение второй узловой линии?

Как должна была бы измениться интерференционная картина, если бы вы могли изменять фазы источников во время работы генератора?

II.13. Опыт Юнга

Мы наблюдали интерференционную картину на поверхности воды в плоской ванне, получающуюся от двух точечных источников. Если мы теперь посмотрим на картину, получающуюся от двух источников света, имеющих одну и ту же фазу, то мы должны получить максимум интенсивности в некоторых направлениях и отсутствие света в других направлениях (направления узловых линий). Зная направление узловых линий и расстояние между источниками, мы можем вычислить длину волны света.

Две узкие щели, освещаемые лампой (для этой цели удобно использовать лампу для освещения витрин), будут представлять собой два источника. Способ приготовления двух таких щелей показан на рис. II.17. Покройте стеклянную пластинку суспензией коллоидного графита и дайте ей высохнуть. Процарапайте две щели, как

показано на рисунке, держа вместе два лезвия безопасной бритвы и слегка надавливая на них. Сделайте несколько пар щелей. Выберите для работы ту пару щелей, которая даст не менее трех отчетливых белых линий, если смотреть сквозь эти щели на лампу для освещения витрин. Процарапайте «окошко» поперек каждой пары щелей. Это позволит вам наблюдать картину через щели и в то же время отсчитывать деления по шкале. Для того чтобы предохранить щели от повреждений, покройте зачерненную пластинку другой стеклянной пластинкой и свяжите их вместе. Посмотрите сквозь эти щели на нить лампы накаливания с расстояния около 2 м. Используя рис. II.18, объясните, почему вы увидите при этом темные и светлые полосы.

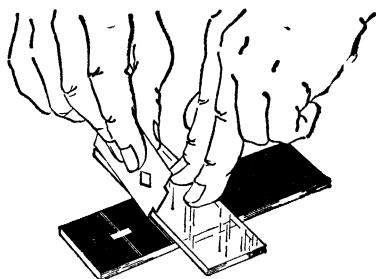


Рис. II.17.

Можете ли вы объяснить, почему полосы по краям картины окрашены? Как изменится картина, если часть лампы закрыть красным целлофаном?

Теперь закройте всю лампу красным целлофаном и поместите за ней линейку, как это показано на рис. II.19. Интерференционную картину и бумажные метки на линейке можно видеть одновременно, если смотреть через щели и окошко. Целлофан прикрепляется резиновой полоской. Каким образом вы определите $\sin \theta_n$ для самой далекой, но еще хорошо видной узловой линии?

Измеряя с помощью оптического микрометра толщину одного из безопасных лезвий, можно определить расстояние между щелями. Чему равна длина волны для красного света?

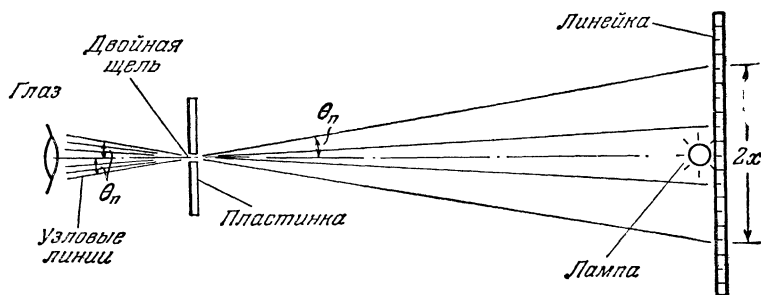


Рис. II.18.

Повторите ваши измерения для того, чтобы найти источник наибольшей ошибки. Насколько точно ваше измерение длины волны?

Закройте одну часть лампы красным целлофаном, а другую — синим. Какому цвету соответствует меньшая длина волны?

Что произойдет с интерференционной картиной, если вы повернете фотопластинку так, что она будет образовывать угол 30° с направлением линии зрения, а не 90° ? Как можно объяснить то, что вы увидите?

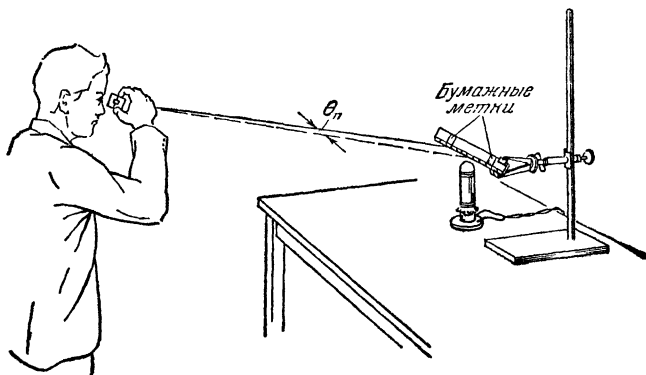


Рис. 11.19.

11.14. Дифракция света от одной щели

Когда вы делали двойные щели для опыта 11.13, у вас случайно могло получиться несколько одиночных щелей. Вы заметили, что они также дают картину темных и светлых полос. Для того чтобы более подробно изучить это явление, процарапайте несколько одиночных щелей, используя для этого и иголку, и лезвие безопасной бритвы.

Сравните картину, которая получается от двух щелей, с картиной, получающейся от одной щели. При этих наблюдениях используйте как белый, так и красный свет. Когда вы будете смотреть на лампу через двойную щель, попробуйте закрыть одну из двух щелей с помощью лезвия от безопасной бритвы, держа его за пластинкой. Что произойдет при этом?

Измерить ширину щели непосредственно довольно трудно. Однако ее можно определить, используя найденное вами значение длины волны для красного света и теорию интерференции для одной щели.

11.15. Разрешающая способность

Разрешающую способность мы можем изучать с качественной стороны, рассматривая сквозь очень небольшое отверстие два малых и расположенных близко друг к другу источника света. В качестве источников света могут быть использованы крохотные отверстия в алюминиевой фольге, расположенной перед лампой. Отверстия, через которые мы будем рассматривать источники света, могут представлять собой дырочки разных размеров, проделанные в другом куске алюминиевой фольги. Схема наблюдения изображена на рис. 11.20, а.

(Для того чтобы получить точечные источники света, проткните иголкой два отверстия в алюминиевой фольге на расстоянии около 0,75 см друг от друга и укрепите фольгу непосредственно перед нитью 150-ваттной лампы. Отверстия, через которые рассматриваются источники, изображены на рис. 11.20, б. Чтобы сделать эти отверстия, проткните полоску фольги кончиком иголки; диаметр самого большого отверстия сделайте равным толщине иголки, а самого маленького — таким, чтобы только был виден свет.)

Посмотрите одним глазом с расстояния около 1 м на два источника. Убедитесь в том, что яркий свет непосредственно от нити накаливания достигает вашего глаза через отверстия, играющие роль двух источников. Можете ли вы различить источники в виде двух

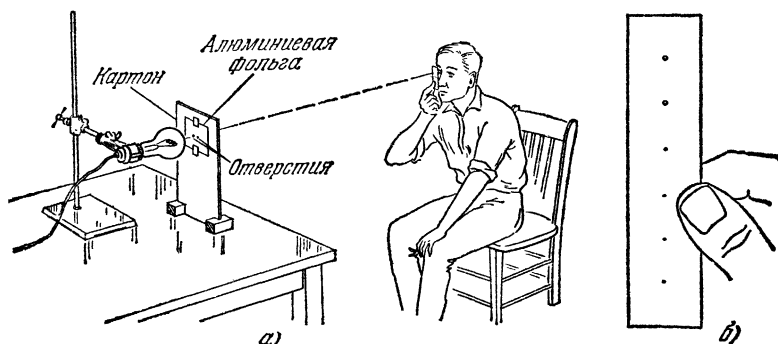


Рис. 11.20.

отдельных светлых точек, если вы смотрите на них невооруженным глазом? Каков размер отверстия, через которое вы видите источники?

Посмотрите на источники через одно из отверстий среднего размера. Можете ли вы различить два источника? Теперь увеличьте расстояние от источников и наблюдайте изменение в их изображении. Найдите расстояние, при котором можно различить оба источника. С этого расстояния посмотрите на два источника через каждое из отверстий разного размера и схематически изобразите, как выглядят изображения этих источников. Почему разрешение источников зависит от их расстояния до отверстия? Почему это разрешение зависит от размера отверстия?

В то время как вы смотрите на источник сквозь отверстия, которые разрешают их, пусть ваш партнер поместит сначала красный, а затем синий целлофан перед источниками. Каким образом длина волны света влияет на разрешение? Как вы можете объяснить это влияние?

Как будут выглядеть источники, если по размеру они будут больше, а расстояние между их внутренними краями останется прежним?

II.16. Измерение малых расстояний с помощью интерференции

Тонкий слой воздуха между двумя стеклянными пластинками обладает такими же свойствами по отношению к свету, как и стенки мыльного пузыря. Чтобы убедиться в этом, положите друг на друга две свежеччищенные стеклянные пластинки длиной приблизительно 20 см; поместите их на черный фон. Затемните комнату и осветите пластинки зеленым или желтым светом. Если поверхность стеклянных пластинок плоская, то в отраженном свете вы увидите несколько полос неправильной формы. Чем вызваны эти полосы?

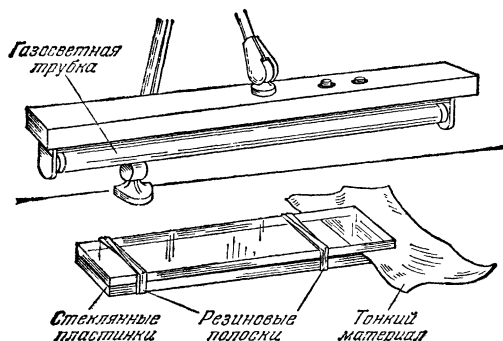


Рис. II.21.

Надавите карандашом на пластинки. Можно ли добиться того, чтобы какая-то светлая полоса переместилась и заняла место соседней полосы? Если это так, то насколько можно сблизить верхнюю и нижнюю пластинки в той точке, где вы нажимали на пластинки?

Вы можете измерить толщину кусочка какого-нибудь очень тонкого материала, помещая его между пластинками с одного конца (рис. II.21). Прежде всего следует убедиться в том, что материал гладкий и что пластинки очень чистые. (Пластины нужно аккуратно положить одну на другую и с обоих концов туго обвязать резиновыми полосками).

Насколько при этом будет изменяться расстояние между двумя соседними светлыми полосами? Сосчитайте число светлых полос на отрезке в 2 см (для этого полезно воспользоваться увеличивающей линзой). Какова толщина материала? Сравните полученное значение толщины с толщиной материала, измеренной с помощью микрометра. Какое измерение более точное?

Что ограничивает область толщин, которые могут быть измерены оптическим методом?

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО

Введение

Вторая часть курса преследует три цели: 1) анализ световых явлений; 2) рассмотрение модели, объясняющей эти явления; 3) исследование распространения волн.

Раздел оптики изучается в данном курсе достаточно подробно. Значительная часть материала усваивается в ходе лабораторных работ, способных вызвать интерес учащихся и не требующих в то же время особых экспериментальных навыков или сложной аппаратуры. Исследование света начинается с простых явлений, а затем делается переход к таким сложным понятиям, как «волна». Таким образом, понимание природы волнового движения формируется у учащегося еще до изучения механики частиц в части III. Хотя большинство из нас имеет более ясные интуитивные представления о поведении частиц, нежели о характеристиках волн, такое построение курса обычно облегчает учащимся восприятие изложенной в IV части идеи о том, что частицы материи обладают в некоторой степени и волновыми свойствами.

В итоге, изучение оптики дает нам (параллельно описанию световых явлений) чрезвычайно важный материал для рассмотрения вопроса о том, как развивается физическая теория.

Построение материала во II части курса позволяет попутно подойти к некоторым тонким понятиям современной физики.

Главы 11—13 описывают поведение света без всякого привлечения моделей, способных объяснить его свойства. В этих главах формулируются законы отражения и преломления на основании наблюдений и экспериментов в лаборатории, а также с помощью анализа экспериментов, описанных в тексте Учебника. Показано применение сформулированных принципов на примере линз и простых оптических приборов.

Гл. 14 содержит изложение корпускулярной модели света. Эта модель позволяет объяснить большинство характеристик света, но не способна дать простое объяснение соотношению между показателями преломления света и скоростями его распространения в средах. Из-за этого и ряда других осложнений простая корпускулярная модель временно оставляется с целью поисков более удовлетворительной модели. В данной главе привлекается внимание к тем характеристикам света, которые подлежат объяснению новой моделью; кроме того, материал главы может послужить примером того, как научные гипотезы вырастают из эксперимента и подтверждаются или опровергаются им.

Главы 15—17 служат основанием для введения волновой модели света. Это достигается рассмотрением отражения и преломления волн сначала в одном

измерении (волны на спиральной пружине), затем в двух измерениях (волны на поверхности воды). В этих главах вводятся также явления дифракции и интерференции. При исследовании свойств волн их параллелизм со свойствами света становится очевидным.

Гл. 18 рассматривает объяснение интерференции и дифракции с точки зрения волновой теории, результатом чего является вывод о волновой природе света.

ТАБЛИЦА 1

Главы	9-недельный план изучения части II			14-недельный план изучения части II		
	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты
11	2	0	—	2	0	—
12	5	3	II.1, II.2	6	4	II.1, II.2
13	4	2	II.3, II.4	7	4	II.3, II.4
14	3	1	II.5	4	2	II.5
15	2	1	II.6	4	1	II.6
16	2	5	II.7—II.10	4	6	II.7—II.10
17	2	2	II.11, II.12	4	3	II.11, II.12
18	3	2	II.13, II.14	5	4	II.13—II.16,

Предлагаемое в табл. 1 распределение учебных часов находится в соответствии с общим распределением учебной нагрузки в рамках всего курса *). Предлагается два варианта для изучения II части курса: 9-недельный и 14-недельный. Сокращенный вариант рекомендуется для годичного курса. Разумеется, эти планы являются лишь приблизительными; но в то же время каждый из них является обобщением определенного педагогического опыта.

*) См. «Изучение физики по курсу Комитета», Физика, ч. I. Вселенная, перевод с англ., под ред. А. С. Ахматова, «Наука», 1973, стр. 11. (Прим. ред.)

Цель этой главы — дать вкратце качественное представление о предмете оптики, ввести учащихся в то, что составит отдельные темы последующих глав II части. Это вводное представление о свете может быть получено в результате чтения главы дома с последующей проверкой усвоения путем обсуждения в классе задач из раздела ДКЛ Учебника.

Заданию главы на дом желательно предпослать вводную беседу, вариант которой приводится ниже. Назначение этой предварительной беседы — преодолеть возможное отсутствие интереса у учащихся, считающих себя достаточно знакомыми с основными свойствами света. Последнее обстоятельство может потребовать известных усилий, чтобы внушить учащимся «уважение» к проблемам света и красоте учения о свете. Те учащиеся, которые поймут, что они в сущности знакомятся со светом впервые, и которые в процессе чтения главы получают свежие сведения, приобретут важные устойчивые знания.

Краткое содержание главы 11

Содержание этой главы может быть понято в правильном свете, если с самого начала напомнить о назначении II части данного курса — довести до сознания учащихся, что такое свет и как он себя ведет. Следует одобрить установившуюся систему откладывать вопрос о том, что такое свет, до тех пор, пока не станет ясным, как он себя ведет в тех или иных условиях. Таким образом, содержание данной главы заключено в предварительных ответах на перечисленные ниже вопросы. (На данном этапе ответы по необходимости упрощены; ответы на более высоком уровне, из которых вытекают важные заключения, даются в дальнейших главах, после подробного описания соответствующих наблюдений и опытов.)

1. Как возникает свет? Что может служить источниками света? (Раздел 11.1.)
2. Что происходит, когда свет падает на предмет? Весь ли свет проходит в него? Проходит ли он насквозь? Отражается ли он? (Разделы 11.2 и 11.3.)
3. Существуют ли, помимо глаз, приспособления, чувствительные к свету? Все ли они одинаково чувствительны или некоторые из них способны обнаруживать то, что другие не замечают? (Разделы 11.4 и 11.5.)
4. Распространяется ли свет прямолинейно? Не случается ли, что он загигается? (Разделы 11.6 и 11.7.)
5. Появляется ли свет сразу в разных местах или он распространяется с конечной скоростью? (Раздел 11.8.)

Чтобы помочь учащимся взглянуть на свет по-новому, полезно провести в классе беседу на тему о том, как описать свет племени слепых, ровно ничего не знающих о свете. Обычные слепые для этого не годятся, так как они живут среди людей, постоянно обсуждающих то, что они видят. Следует говорить о воображае-

мых существах, «незнакомство» которых со светом подобно «незнакомству» людей с радиоволнами до открытия радио.

Очевидно, наиболее разительное различие между племенем слепых и нами заключается в том, что для оценки размеров, формы и текстуры поверхности им необходимо ощупывать предмет, тогда как мы способны оценивать все эти показатели издали, просто *глядя* на предмет. Эта наша способность, несомненно, показала бы людям племени слепых невероятной (возможно, в такой же мере, как нам в 1800 г. показалась бы невероятной возможность слышать и видеть по телевизору то, что происходит на другой стороне земного шара). Пусть учащиеся попытаются дать представление о свете этим воображаемым людям из племени слепых.

Возможны следующие варианты высказываний учащихся.

«Мы способны судить о вещах, не прикасаясь к ним, благодаря такой штуке, которую мы называем *светом*. Свет — странная вещь: его нельзя пощупать или почувствовать (вернее, обычно нельзя чувствовать, но если он достаточно сильный, то он греет). Мы узнаем о нем только потому, что мы его *видим*. А *видеть* — значит...»

«Дело в том, что у людей на лице есть такие «выпуклости». Когда свет в них попадает, люди об этом узнают. Мы, в сущности, не ощущаем света; мы только его видим. Вы можете подумать, что свет делает глазу больно, ударяясь об него. Нет, не делает (если только он не слишком ярко)...»

«Дело в том, что, когда вы видите свет, вы узнаете кое-что о предмете, от которого свет пришел. Представьте это себе следующим образом. Если вы бросаете шарик и слышите звук удара, вы узнаете, что там, куда вы бросили шарик, что-то есть или что-то было. Более того, если вы бросили шарик и он вернулся назад, вы узнаете, что он ударился о какой-то предмет достаточно плоской формы, вроде стены. Так вот, видеть свет — это гораздо больше, чем слышать звук удара или ловить отскочивший шарик. Вам нет надобности «бросать» свет (что очень удобно, так как вы и не могли бы это делать без карманного фонарика — эдакого приспособления, которое может «бросать» свет). Обычно свет идет от Солнца или от электрической лампочки. Не так уж важно, откуда вначале пришел свет, потому что он рассеивается и часть его идет к вам...»

«Может показаться странным, что свет от всего «отскакивает» и идет по всем направлениям, а вы все-таки можете определить, откуда он попал к вам, но дело в том, что...»

«Другая интересная особенность света заключается в том, что он появляется (по всем признакам) везде мгновенно. Например, если вы нажали кнопку, включающую свет, то он появляется везде сразу — даже раньше, чем вы услышали звук от нажатой кнопки; это совсем не похоже на движение камня или даже на эхо...»

«...И еще свет может быть разного цвета. Под цветом я подразумеваю...»

Некоторые из ваших учащихся могут выдвинуть более удачные объяснения, чем приведенные выше. На классных занятиях иногда происходили очень оживленные дискуссии с критикой предлагаемых объяснений для людей из племени слепых.

Не исключена возможность, что вы найдете лучший путь настроить учащихся взглянуть на свет как бы впервые. Если вам удастся добиться того, чтобы они

приступили к чтению этой главы с таким настроением, то это будет в большой степени способствовать достижению цели, поставленной в данной главе.

После вашего «введения» к этой главе (предшествующего заданию ее на дом) можно предложить учащимся в процессе чтения главы отмечать те перечисленные в ней свойства света, которые для них новы. Найдется очень мало учащихся, которые при внимательном чтении данной главы не усмотрят в ней ни одного нового для них свойства света.

После прочтения главы учащимися вы, возможно, пожелаете вкратце обсудить ее в целом, например в виде развития (на более высоком уровне) объяснений для племени слепых или в виде обсуждения тех новых сведений, которые нашли в ней некоторые учащиеся.

Другой интересный вопрос, по которому можно организовать дискуссию до прочтения главы учащимися, заключается в том, добавляет ли цветное стекло что-либо к свету или, наоборот, отнимает от него нечто (см. раздел 11.2).

Следует заметить, что в гл. 16 на сцену выступает волновая кювета. Это — один из интереснейших и поучительных опытов во всем курсе. Необходимо начать осваивать работу с волновыми кюветами уже на этой стадии, чтобы приобрести навыки работы с ними к тому времени, когда ими начнут заниматься учащиеся! Как бы перегружены вы ни были, вам следует наладить эти кюветы в самый короткий срок, даже если для этого потребуется пожертвовать каким-либо другим видом вашей деятельности.

План изучения главы 11

Так как гл. 11 является вводной, вопрос о распределении времени обстоит здесь очень просто. Эта глава должна занять два часа классных занятий независимо от того, планируется ли 9 или 14 недель на изучение всей II части. Если прибегать к предварительной беседе вроде намеченной выше, то лучше всего использовать для этого часть первого часа до прочтения главы учащимися. Ниже приводятся несколько методических разработок, посвященных подробному обсуждению разделов; впрочем, вы, очевидно, пожелаете использовать только одну или две из них, которые смогут в наибольшей степени заинтересовать ваш класс.

Дополнительные материалы к главе 11

Домашние, классные и лабораторные задания. Ответы и решения к задачам, а также таблица классификации задач по степени трудности приведены на стр. 203.

11.1. Источники света

Ц е л ь. Объяснить причины видимости предметов.

С о д е р ж а н и е. Светящиеся предметы излучают свет. Бóльшая часть видимых предметов не светится, но отражает свет.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Может возникнуть желание продемонстрировать учащимся изменение цвета лампочки накаливания при ослаблении накала или постоянство цвета люминесцентных и неоновых ламп при разной яркости. Здесь несвоевременно объяснять, в чем различие этих источников света.

Достаточно отметить, что нити накала излучают свет, зависящий не от материала нити, а от температуры. В люминесцентных же и неоновых лампах цвет зависит от излучающего материала, от его атомов и молекул. Учащиеся бывают часто знакомы с такими терминами, как «красное каление» или «белое каление»;

однако они могут заинтересоваться тем, что цвет накала может служить (и действительно является) мерой температуры.

Можно подчеркнуть значение отраженного света, задав учащимся вопрос о том, как бы все выглядело, если бы свет ни от чего не отражался. Представление о результате усилится от вопроса, где в повседневных занятиях необходимо было бы освещение. Большинство учащихся удивится, узнав, что наш мир мало отличался бы от мира слепых, если бы все не было покрыто люминесцентной краской. Например, источниками света должны были бы быть отмечены все двери и проходы. Нельзя было бы ни водить машины, ни ходить пешком, если бы вдоль дорог и на всех встречаемых предметах не было сигнальных огней. При этом они не освещали бы предметы, а только сигнализировали бы об их присутствии в данных местах. Вы не могли бы видеть ни себя, ни кого-либо другого. Нельзя было бы пользоваться зеркалом.

11.2. Прозрачные, окрашенные и непрозрачные материалы

11.3. Отражение

Ц е л ь. Объяснить, что происходит при падении света на различные предметы.

С о д е р ж а н и е. а) Одни предметы преимущественно пропускают свет, другие в основном поглощают его, а третьи главным образом отражают.

б) Свет частично поглощается и отражается даже предметами, которые кажутся прозрачными.

в) Цветной полупрозрачный материал поглощает свет некоторых цветов и кажется окрашенным в те цвета, свет которых он пропускает.

г) Как при входе в прозрачный материал, так и при выходе из него свет преломляется.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Следует отметить, что отражение света подробно изучается в гл. 12, сразу по окончании данной главы, а преломление света описывается в гл. 13. Можно вызвать оживленную дискуссию в классе, задав учащимся вопрос, каким образом они могут экспериментально показать, добавляет ли цветное стекло что-либо к белому свету или, наоборот, отнимает от него нечто. При этом нужно иметь под рукой источник белого света и несколько пластинок цветного стекла, чтобы иметь возможность тут же проверить высказанные учащимися предположения.

Если глава учащимися еще не прочитана, приведенная выше схема предварительной беседы дает возможность подчеркнуть сущность простых и убедительных рассуждений, содержащихся в тексте Учебника. Если же текст ими уже прочитан, то беседа может завязаться, если сначала вызвать менее словоохотливых учащихся, а затем более склонных к дискуссиям. Наконец, если охотников вступить в дискуссию не найдется, следует потребовать критики следующего утверждения:

«Красный светофильтр добавляет красный свет, а зеленый добавляет зеленый свет, но применение одновременно обоих светофильтров приводит к взаимному гашению красного и зеленого света».

Учащиеся должны понять, что если бы гасились только добавляемые цветные составляющие света, то в остатке получался бы белый или по крайней мере какой-то яркий свет.

В лучшем случае может найтись учащийся, придумавший некий более сложный вариант трактовки явления. Такая инициатива заслуживает поощрения, однако следует сразу установить, не содержит ли его объяснение явных погрешностей. При отсутствии таковых следует признать допустимость выдвинутой гипотезы, но одновременно спросить, которое из возможных объяснений выглядит более правдоподобным и простым. При ответе на этот вопрос представляется удобный случай отметить, что всякий раз, когда некоторая совокупность фактов может получить различные объяснения, физики обычно отдают предпочтение более простому, но продолжают придумывать опыты, способные решить вопрос окончательно.

В заключение беседы можно спросить, нельзя ли проделать какой-либо опыт, еще более убедительный, чем приведенный в тексте Учебника. Проследите, не предложит ли кто-либо воспользоваться отдельными цветными лучами радуги (или солнечного спектра) для проверки действия цветных стекол? (Разумеется, если это предложение поступит на слишком ранней стадии беседы, его рассмотрение должно быть отложено.) Чтобы воспользоваться подобным предложением, должны быть наготове соответствующие принадлежности.

Не перевернут ли рис. 11.4? Этот вопрос заинтересовывает многих учащихся. Большинство понимает, что рисунок не перевернут. Один из наиболее убедительных доводов в пользу его правильного расположения заключается в том, что при переворачивании книги названия лодок оказываются зеркально обращенными. Кроме того, внимательный осмотр позволяет заметить на воде мелкую рябь.

Еще одна оживленная дискуссия о свойствах света, обсужденных в разделах 11.2 и 11.3, может быть вызвана вопросом о том, какими оптическими свойствами должен обладать человек-невидимка. Ясно, что он не должен ни отражать, ни поглощать света. Но есть одно необходимое свойство, которое многим учащимся не придет в голову: человек-невидимка не должен также преломлять света.

Некоторые из учащихся, пытающихся воспроизвести эффект «плавающей монеты», изображенный на рис. 11.2, испытывают разочарование, так как увеличение оказывается меньшим, чем по рисунку. Большинство видит, что монета как бы приблизилась и потому кажется плавающей. Однако в случае воды максимальное увеличение (1,33) может быть приближенно достигнуто только при поднесении глаза непосредственно к поверхности воды, налитой до краев в высокий стакан.

Качество демонстрации поглощения света толстой стопой стеклянных пластинок может быть улучшено при замене воздуха между пластинками минеральным маслом. Этим ослабляется нежелательное отражение, происходящее на всех границах раздела «воздух — стекло» в стопе. Для данной демонстрации вполне пригодны предметные стекла площадью $2,5 \times 7,5$ см и толщиной в 1 мм. Полностью освободиться от воздуха, заключенного между стеклами, можно путем составления стопы под поверхностью масла.

На данном этапе не следует пытаться объяснять, каким образом масло ослабляет отражение. Это должно быть отложено до конца гл. 15 (или гл. 16), когда учащиеся будут располагать уже достаточной экспериментальной базой для самостоятельного решения этого вопроса.

В обширных дискуссиях рекомендованного типа всегда существует опасность появления споров вокруг чрезмерно точных определений: «насколько прозрачным

должно быть вещество, чтобы называться прозрачным?» Нужно в корне пресекать поднятие таких вопросов. Они бессмысленны. Подобные термины не подлежат точному определению, они носят лишь описательный характер.

11.4. Светочувствительные приспособления

11.5. Невидимый свет

Ц е л ь. Показать, что глаз — не единственный светочувствительный приемник и что не всякий «свет» вызывает зрительное ощущение.

С о д е р ж а н и е. а) Существуют вещества, реагирующие на свет; в фотопленке свет вызывает устойчивые химические изменения, а в фотоэлементах влияет на электрический ток *).

б) Тепловое излучение (инфракрасного диапазона), испускаемое нагретыми телами, а также ультрафиолетовые лучи сходны с видимым светом, но не вызывают зрительного ощущения.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Следует избегать обсуждения понятий электромагнитного спектра, длины волны, частоты и вообще волновой природы света. Легкость усвоения материала ближайших последующих глав и, в частности, гл. 14 отчасти обеспечивается отсутствием у учащихся предвзятых представлений о природе света. Если со стороны учащихся последуют вопросы об электромагнитных волнах, нужно заверить их, что исчерпывающий ответ они получат до окончания всего курса.

11.6. Как распространяется свет?

11.7. Дифракция

С о д е р ж а н и е. а) Свет обычно распространяется прямолинейно. Вблизи от краев препятствий он слегка загибается, но настолько незначительно, что в большинстве случаев в порядке первого приближения этим можно пренебрегать.

б) Свет способен распространяться в пустоте и проходить огромные расстояния.

в) Глаз замечает свет только в тех случаях, когда свет в него входит непосредственно.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Прямолинейное распространение света подробно рассматривается в начале гл. 12. Явление дифракции разъясняется в гл. 18; на данном этапе учащимся незачем даже запоминать термин *дифракция*. Дифракция упоминается здесь только как интересное явление, которое в дальнейшем надо будет объяснить.

Учащиеся иногда нуждаются в помощи при воспроизведении дифракционных эффектов, указанных в тексте Учебника. Обычно их затруднения связаны с тем, что они не находят подходящих длинных тонких предметов. Предложите им шнур, протянутый на фоне окна, или тонкие планки оконного переплета. Щель, параллельную рассматриваемому предмету, можно образовать из двух пальцев, расположенных непосредственно перед глазом. Хорошие щели можно также получить, установив подходящее расстояние между проволочками скрепки для бумаг или вращая карандаш с держателем-зацепкой до образования достаточно узкого просвета между стволом и параллельной ему зацепкой.

*) В вентильных же фотоэлементах свет даже вызывает электрический ток.
(Прим. перев.)

Дифракция, пожалуй,— самое сложное явление из рассматриваемых в части II. На данном этапе не следует вдаваться в углубленное обсуждение этого явления. Пока его следует рассматривать только как пример отклонения света от прямолинейного распространения. Полезно пока воздерживаться от утверждения, что дифракция — одно из явлений, «доказывающих» правильность волновой теории света. Это преждевременно приоткроет замысел, на котором построена II часть курса. Если у учащихся останется некоторая неудовлетворенность — тем лучше. Повысится интерес к предстоящему уточнению.

В тексте Учебника говорится, что дифракция вызывает «размытость» краев теней, и иллюстрации действительно показывают эту размытость. При этом у

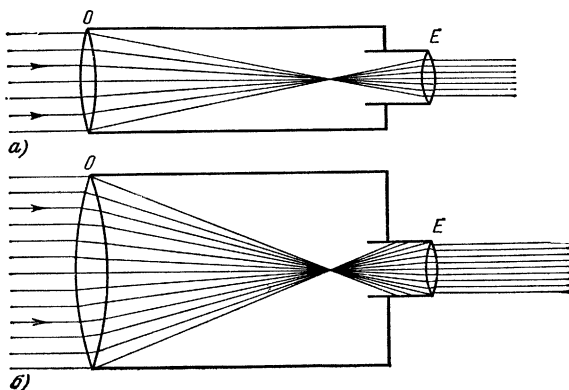


Рис. 1.

учащихся не должно сложиться представление, что обычно наблюдаемая размытость краев теней есть результат дифракции. Эта размытость обусловлена конечными размерами («неточностью») светящихся источников, что создает область вокруг тени, освещаемую лишь частью поверхности источника. Освещенность плавно ослабевает по направлению к тени и это обуславливает нерезкость ее краев. По всей вероятности, ни один из учащихся никогда не наблюдал теней, достаточно четко обрисованных для возможности наблюдения настоящих дифракционных эффектов. Для этого свет должен исходить от чрезвычайно узкого источника (булавочного прокола или щели) и край тени должен создаваться весьма острым краем экранирующего предмета: например лезвием бритвы. На данном этапе, по-видимому, лучше всего вообще избегать демонстраций по дифракции.

На стр. 19 упоминается термин «наименьшее отверстие» в телескопе, определяющее степень размытости изображений. Это «наименьшее отверстие», или апертурная диафрагма, отсекает крайние лучи проходящего пучка. На рис. 1 показаны схемы двух простых телескопов, объективы которых значительно шире окуляров. На схеме а) «наименьшим отверстием», или апертурной диафрагмой, является объектив O . Весь проходящий через него свет выходит через окуляр E . Однако на схеме б) в окуляр попадает не весь свет, пропускаемый объективом; поэтому апертурной диафрагмой служит окуляр E .

11.8. Скорость света

Содержание. Скорость света в пустоте или воздухе настолько сильно превышает скорость всех доступных наблюдению предметов, что ее трудно себе представить: она составляет $3 \cdot 10^8$ м/с.

Методические указания. Чтобы придерживаться задуманного в этом курсе плана изложения учения о свете, на данном этапе лучше не обсуждать вопроса о скорости света в средах, отличных от вакуума или воздуха. Некоторым учащимся, возможно, уже известно, что $3 \cdot 10^8$ м/с — наивысший предел скорости чего бы то ни было, и что, следовательно, если свет распространяется в других средах с другой скоростью, то она может быть только меньше. Могут найтись учащиеся, которым известна зависимость между скоростью света в среде и ее показателем

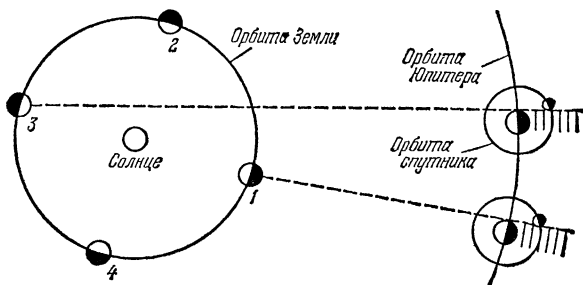


Рис. 2.

преломления. Постарайтесь убедить столь осведомленных учащихся в необходимости пока держать свои знания при себе, поскольку эти сведения не имеют прямого отношения к обсуждаемому вопросу.

Если класс будет настаивать на дальнейшем обсуждении вопроса о скорости света, можно предложить учащимся придумать какой-либо метод измерения скорости света в вакууме или других прозрачных средах, отличный от описанного на стр. 19. Однако до изучения гл. 14 не следует подробно обсуждать другие методы.

Учащиеся, знакомые со схемой движения планет и их спутников в солнечной системе, смогут получить ясное представление о методе измерения скорости света по Рёмеру. Остальные получат лишь общее представление. Однако глубокого понимания здесь и не требуется. Впрочем, кто-нибудь может попросить дополнительных внеклассных разъяснений. Приведенные ниже сведения не являются исчерпывающими, но могут быть полезны.

Обратимся к схеме, изображенной на рис. 2. Когда Земля находится в положении 1, измеренное время между двумя последовательными затмениями спутника Юпитера позволяет установить, что период обращения спутника равен 42,5 ч. Эти измерения настолько точны, что позволяют точно предсказать момент определенного очередного затмения, которое должно произойти, например, через шесть месяцев, когда Земля переместится из положения 1 в положение 3. Действительное наблюдение этого очередного затмения, произведенное в положении 3, показывает, что оно начинается с запозданием на 16 мин 20 с. Измерения, выполненные самим Рёмером, были менее точны, и он получил опоздание на 22 мин. Однако

он правильно предположил, что это опоздание обусловлено временем прохождения светом пути, равного диаметру земной орбиты. Рёмер, между прочим, исходил из постоянства периода обращения спутника Юпитера. В части III этого курса учащиеся познакомятся с основаниями, которые имелись в 1676 г. для подобного утверждения.

Для более углубленного понимания приведенных рассуждений необходимо учесть, что хотя за 42,5 ч между двумя последовательными затмениями спутника Юпитера Земля в положении 1 успевает переместиться по своей орбите на 5,26 млн. км, она тем не менее почти совсем не успевает удалиться от Юпитера. Поэтому время, измеренное между последовательными затмениями, является точной мерой истинного периода обращения спутника. Через три месяца, когда Земля находится в положении 2, положение в корне меняется. Здесь за время между двумя последовательными затмениями Земля удаляется на 5,26 млн. км от Юпитера. На это дополнительное расстояние свет тратит 15,3 с и потому в положении 2 измеренный период обращения спутника оказывается увеличенным на 15,3 с по сравнению с измеренным в положениях 1 или 3. Вблизи положения 2 через каждые 42,5 ч затмение спутника увеличивает свое кажущееся опоздание на 15,3 с. К моменту достижения Землей положения 3 это опоздание достигает 16 мин 20 с. В других положениях Земли на ее траектории между положениями 1, 2 и 3 период обращения спутника кажется нам увеличенным по сравнению с 42,5 ч на величину, меньшую 15,3 с. Точное значение этого избытка зависит от того, насколько Земля удаляется от Юпитера за 42,5 ч. В процессе движения Земли из положения 3 через положение 4 в положение 1 время обращения спутника Юпитера кажется укороченным по сравнению с 42,5 ч. К моменту возвращения Земли в положение 1 вся прежняя «потеря» времени полностью компенсируется. Таким образом, для предсказания момента затмения можно пользоваться *средним* кажущимся периодом обращения спутника вместо однократно измеренного. Это дает более точный результат.

Приведенное рассмотрение не учитывает сравнительно небольшого перемещения Юпитера за время обращения Земли вокруг Солнца. Юпитер обращается вокруг Солнца за 12 лет. Таким образом, за земной год он проходит $1/12$ своей орбиты. Движение Юпитера вносит существенную поправку в приведенный анализ, но это уточнение не нарушает общего хода рассуждений.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам.

Большая часть задач этой главы носит качественный характер и предназначена скорее для классных занятий, чем для домашней работы. Задачи 8 и 9 должны по возможности сопровождаться демонстрациями. Количественный характер имеют только задачи 16—19: задача 16 требует некоторых сведений из тригонометрии; остальные базируются лишь на простейшей кинематике в применении к скорости света. Задача 10 представляет собой простое, но интересное внеклассное упражнение.

В табл. 2 приведена классификация задач по степени трудности и по разделам, к которым они относятся. Отдельно указаны задачи, подходящие для классного обсуждения. Особо рекомендуемые задачи помечены значком # *).

*) Напомним, что звездочкой отмечены задачи, которые предназначены для проверки усвоения текста Учебника соответствующего раздела (указанного в условии задачи). (Прим. ред.)

ТАБЛИЦА 2

Разделы	Со звездочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
11.1	1, 2		3		
11.2, 11.3	4		5, 6, 7#		5, 7#
11.4, 11.5	11, 12	9	8#, 10		8#, 9, 10
11.6, 11.7	13		14, 15	16	14
11.8		17#, 18	19		

Краткие ответы

1*. Светлячок, лампа-вспышка, спираль электроплитки.

2*. Осмотреть в темноте.

4*. Предмет *A* будет казаться красноватым, предмет *B* — очень темным.

11*. При большей температуре тело интенсивнее излучает инфракрасные лучи.

12*. Нет; ультрафиолетовые лучи не проходят через стекло.

13*. При отражении света или при его преломлении в процессе перехода из одной среды в другую.

Ответы с указаниями и решениями

3. Наблюдения лучше всего производить на плоской пластинке, но с помощью цветного бутылочного стекла можно также обнаружить искомый эффект. При косом падении доля отраженного света возрастает. Полезно сравнение отражений от цветного и белого стекол. Учащиеся могут наблюдать отражение в стекле ярко освещенных предметов, либо использовать стекло в качестве рефлектора, отражающего солнечный свет или свет от какого-либо другого яркого источника. Тот результат, что наблюдаемый отраженный луч не окрашен, приводит учащегося к заключению, что свет не проникал в стекло. Подтверждением служат также блики на блестящих окрашенных предметах, как, например, бутылках, вазах, елочных украшениях, телефонных аппаратах, ярко начищенной обуви и т. п.

5. Все известные нам вещества в какой-то мере поглощают свет. Чистая вода поглощает его в слабой степени. Но на большой глубине в океане господствует темнота; даже на дне освещенного Солнцем пруда свет значительно ослаблен. Однако поглощение света в этих случаях может быть обусловлено примесями, так что приведенные факты еще не решают вопроса. Если отождествлять оптически чистую воду с химически чистой, то для окончательного заключения необходимы тщательные измерения с использованием дистиллированной воды.

Экспериментальное выяснение вопроса требует измерения поглощения света водой. Учащиеся могут наблюдать источник света через столб воды, например, высотой около 40 см, налитой в мерный цилиндр; иначе, можно опустить на дно этого цилиндра белый диск и наблюдать уменьшение его освещенности. Поглощение света 40-сантиметровым столбом воды крайне незначительно, но может быть измерено с помощью чувствительного фотометра. Вероятно, лучший способ дать учащимся полуквантитативное представление о поглощении света водой заключается в том, чтобы опускать белый диск на дно пруда на разных глубинах и определять глубину, на которой диск перестает быть видимым.

6. У некоторых учащихся может возникнуть предположение, что голубой свет поглощается сильнее, чем свет других цветов, вследствие чего при прохождении большей толщи воздуха на закате в солнечных лучах недостает большего количества голубого света. Это, однако, не объясняет голубого цвета неба. Небо кажется голубым потому, что голубой свет рассеивается легче, чем остальные лучи. На закате, когда путь лучей в воздухе длиннее и количество рассеянного голубого света больше, относительное содержание красного света по отношению к голубому в прямых проходящих солнечных лучах возрастает.

7. Выглядит ли предмет светлым или темным — зависит как от источника освещения, так и от фона, на котором виден предмет. Так, дым на рис. 11.8 кажется

светлым на темном фоне. Тот же дым, однако, поглощает часть падающего на него света. Если дым освещен сзади, он поглощает часть света и выглядит темнее фона. (В большинстве случаев дым представляет собой угольный аэрозоль и потому имеет черный цвет. Даже дым сигареты совершенно темен, но его частицы настолько мелкие, что представляют собой отличные рассеиватели света, вследствие чего этот дым может казаться голубым. Большинство разновидностей белого промышленного «дыма» состоит из водяного пара.)

8. Эта лабораторная задача обнаруживает одно из интересных, но не фундаментальных свойств глаза. Большинству людей серый квадрат кажется черным или темно-серым на белом фоне, зеленым на красном фоне и светло-серым на черном фоне.

9. Обсуждение этих явлений в классе должно по возможности сопровождаться демонстрациями.

Позитивное изображение или отпечаток получается в результате пропускания света через негатив на другую пленку или на фотобумагу. Негатив должен непосредственно соприкаться с позитивным материалом во избежание размытости окончательного изображения. Поскольку через светлые участки негатива проходит больше света, чем через темные, темные места негатива дадут светлые участки на позитиве или отпечатке. Таким образом, белый предмет дает темное изображение на негативе и светлое на позитиве. (Поляроидная камера не образует негатива обычного типа.)

10. Эта задача вновь приводит к необходимости фокусировки глаз.

Кратчайшее расстояние для ясного видения («расстояние наилучшего зрения») составляет около 20 см для учащихся средней школы и может достигать метра и более у лиц большего возраста. В большинстве случаев, но не всегда, оба глаза более или менее одинаковы. Утомление глаз может влиять на расстояние наилучшего зрения.

14. Для одних учащихся эта задача покажется тривиальной, а для других — заинтриговывающей, это зависит от того, сталкивались ли они ранее с этим вопросом. Необходимо обеспечить понимание того, что Солнце, Земля и Луна находятся всегда приблизительно в одной плоскости.

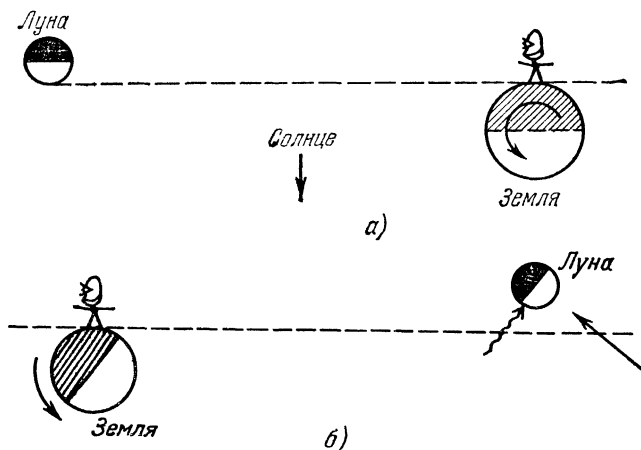


Рис. 3.

а) Если рассматривать Землю и Луну по направлению с севера, то мы увидим следующее.

Человек из положения, показанного на схеме рис. 3,а, видит Луну в момент пересечения ею линии горизонта. Проекция плоскости горизонта показана штриховой линией. В процессе вращения Земли в направлении стрелки плоскость горизонта тоже вращается, и нам кажется, что Луна восходит. Где расположено Солнце? Поскольку речь идет о полуночи, Солнце находится «на полпути» между

заходом и восходом, т. е. где-то далеко внизу, на продолжении перпендикуляра, восстановленного к середине штриховой линии. Поэтому, как показано на схеме, освещена нижняя половина Луны. Изображенному на схеме наблюдателю Луна представляется в виде освещенного полудиска, обращенного к горизонту; следовательно, это отнюдь не полнолуние.

б) Позже, после начала нового лунного месяца (когда наступает новолуние), расположение Земли, Луны и Солнца принимает вид, показанный на схеме рис. 3,б. Виден только серп Луны, т. е. «молодой месяц», обозначенный волнистой стрелкой. Прямая стрелка показывает направление лучей от недавно зашедшего Солнца.

15. Перед тем как отвечать на вопрос п. а), необходимо дать определение понятия прямой линии. Найти это определение не так просто, и в первых попытках учащиеся могут пойти окольными путями, прежде чем они нападут на определение прямой линии, не связанное с распространением света.

а) Один из экспериментальных методов получения прямой линии заключается в закреплении конца нити на гвозде, вбитом в доску, и обматывании другого конца нити вокруг второго гвоздя, вбитого в доску на расстоянии 30—40 см от первого гвоздя. Затем нить туго натягивается. Можно утверждать, что потребуется наименьшее число одинаковых отрезков нити для проведения линии, соединяющей эти два гвоздя. В пределах точности эксперимента натянутая между двумя гвоздями нить является прямой. Визуруйте один глаз по линии нити для проверки того, что свет распространяется по прямой.

б) Если погрузить в воду один из концов натянутой нити в наклонном положении (подобно метровой линейке на рис. 11.1), то нить будет казаться согнутой в точке пересечения поверхности воды. Однако, поскольку нить является прямой по определению, можно утверждать, что лучи света не прямолинейны. Фактический путь света от одного гвоздя до другого может быть установлен путем втыкания ряда булавок между двумя гвоздями, часть которых втыкается под водой, а другая — над водой.

16. За два часа Земля поворачивается на 30° , так что солнечные лучи, освещающие спутник, касаются земной поверхности в 30° к западу. Гипотенуза прямо-

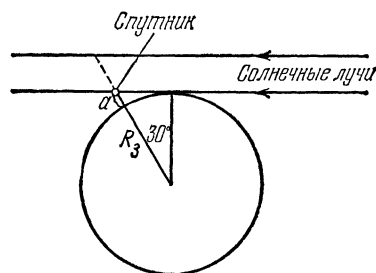


Рис. 4.

угольного треугольника, изображенного на рис. 4, равна сумме радиуса Земли и искомой высоты спутника:

$$R_3 + a = R_3 / \cos 30^\circ,$$

откуда

$$a = R_3 / \cos 30^\circ - R_3,$$

где радиус Земли $R_3 = 6,37 \cdot 10^6$ м.

Итак, $a = 9,9 \cdot 10^6$ м.

17. а) Расстояние от Земли до Солнца составляет около $1,5 \cdot 10^{11}$ м и поэтому

$$t = d/v = (1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}) / (3 \cdot 10^8 \text{ м/с}) = 500 \text{ с.}$$

б) 4,3 световых лет составляют $4,3 \text{ года} \cdot 365 \text{ дней/год} \cdot 24 \text{ ч/день} \cdot 3600 \text{ с/ч} \times 3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 4,1 \cdot 10^{16} \text{ м.}$

в) Световой год, равный $9,46 \cdot 10^{15}$ м, удобен в качестве единицы длины, поскольку межзвездные расстояния настолько велики, что их проще выражать в этих крупных единицах, чем в таких ничтожно малых (в астрономических масштабах) единицах, как метр. Это аналогично выражению расстояний между городами в километрах вместо сантиметров.

18. а) Световой луч не может быть послан прямо из Нью-Йорка в Сан-Франциско, вследствие кривизны поверхности Земли. Однако радиоволны частотного диапазона от 5 до 30 МГц претерпят на пути между этими двумя городами несколько последовательных отражений от ионизованного слоя газа в верхней части атмосферы и от Земли (рис. 5). Время распространения радиосигнала равно

$$t = \frac{d}{v} = \frac{4,8 \cdot 10^3 \text{ км} \cdot 10^3 \text{ м/км}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ с.}$$

б) Полный путь составляет

$$d=vt=3\cdot 10^8 \text{ м/с}\cdot 2,7 \text{ с}=8,1\cdot 10^8 \text{ м.}$$

Расстояние до Луны равно половине этого пути: $d/2=4,0\cdot 10^8 \text{ м.}$

19. а) Минимальное время между посылкой вопроса и приемом ответа составило бы 2,7 с.

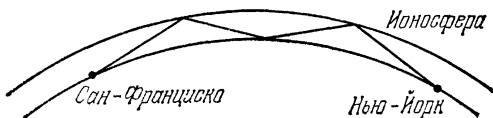


Рис. 5.

б) В случае Земли и Марса это время составило бы 540 и 2540 с. Когда, Марс и Земля находятся по одну сторону от Солнца и максимально сближаются, их разделяет расстояние в $2,3\cdot 10^{11}-1,5\cdot 10^{11}=0,8\cdot 10^{11} \text{ м}$; когда они находятся по разные стороны от Солнца и максимально удалены друг от друга, расстояние между ними равно $2,3\cdot 10^{11}+1,5\cdot 10^{11}=3,8\cdot 10^{11} \text{ м}$.

в) Для получения ответа потребовалось бы 8,6 лет.

В этой главе обсуждается прямолинейность распространения света, ход лучей, законы отражения и образования изображений. Простые представления о прямолинейном распространении света и законах отражения подводят итоги всей огромной массе накопленных экспериментальных данных. Для понимания содержания гл. 13 учащиеся должны основательно изучить материал этой главы.

Краткое содержание главы 12

Раздел 12.1. Рассматривается применение представления о прямолинейности распространения света к исследованию вопроса об образовании теней. Это дает учащимся навыки в построении хода лучей прежде, чем они приступят к более сложным случаям, связанным с отражением и образованием изображений.

Раздел 12.2. Разъясняется идеализированное понятие светового луча и обосновываются лучевые построения с той точки зрения, что пересечение лучей не влияет на ход каждого из них.

Разделы 12.3 — 12.5. Целесообразно эти разделы рассматривать как единое целое, дающее учащимся связную картину образования изображений плоским зеркалом. В разделе 12.3 излагается принцип нахождения положения изображения предмета по проведенным от него лучам. В разделе 12.4, опирающемся на опыт 11.1, обсуждаются законы отражения. Наконец, в разделе 12.5 на основе двух предыдущих разделов выясняется, что именно мы видим в плоском зеркале. Представление о том, каким образом с помощью лучей можно установить положение точек в пространстве и, в частности, оптического изображения предмета, чрезвычайно важно для усвоения данной и последующих глав. Законы отражения также крайне важны и служат одной из ярких иллюстраций того, как простой закон способен объяснить огромное число фактов.

Раздел 12.6. Излагается, каким образом совокупность плоских зеркал может осуществлять фокусировку, затем рассматривается парабола как сечение поверхности, обеспечивающей идеальную фокусировку лучей, параллельных ее оси. В качестве предпосылки к рассмотрению образования изображений (в разделах 12.8 и 12.9) здесь обсуждается последующий ход лучей, падающих на поверхность параллельно оси.

Раздел 12.7. Вводится понятие обратимости хода лучей и распространяется принцип параболического зеркала на случай использования его в качестве прожектора. В виде предпосылки к технике построения изображений (в разделах 12.8 и 12.9) в данном разделе разъясняется ход отраженных лучей при прохождении падающих лучей через главный фокус.

Разделы 12.8, 12.9. Разъясняется образование изображений вогнутыми зеркалами. В разделе 12.8 описывается фокусирование параллельных пучков,

наклонных к оси. Хотя рассуждение относится главным образом к астрономическим телескопам, основная мысль сводится к тому, что в вогнутых зеркалах изображения точек получаются концентрированием исходящих из них лучей также в точках. Это подготавливает почву для изучения раздела 12,9, в котором довольно подробно обсуждаются реальные изображения.

До ознакомления с разделом 12.9 учащимся следует показать соответствующие лабораторные демонстрации. Здесь следует проделать опыт II.2 или по крайней мере часть его. Затем учащиеся должны изучить и обсудить образование изображений в вогнутых зеркалах.

Преподаватели должны выдвигать на первый план геометрические схемы хода лучей и подчеркивать их важность даже при использовании аналитического метода в целях уточнения результатов.

Раздел 12.10. Резюмируются некоторые сведения о действительных и мнимых изображениях.

План изучения главы 12

Законы отражения и построение изображений чрезвычайно важны с точки зрения заложенных в них идей. На обоснование этих законов, однако, не требуется большой затраты времени. Основополагающий характер этих законов лучше всего довести до сознания учащихся путем построений хода лучей в неплоских зеркалах с использованием произвольных лучей (вместо главных), исключающих необходимость построения угла отражения, равного углу падения.

С другой стороны, построение хода лучей, нахождение точек расхождения пучков лучей и построение изображений требуют пояснений и некоторой практики.

Если вы стеснены во времени и вынуждены спешить при изложении материала данной главы, делайте лучше упор на геометрическое построение лучей, а не на формулы. Необходимо заботиться о том, чтобы учащиеся никогда не теряли из вида законы отражения, даже если приходится спешить при изложении таких вопросов, как параболические зеркала, прожекторы, пучки расходящихся, сходящихся и параллельных лучей и т. п.

В табл. 3 приводятся возможные варианты распределения времени при изучении гл. 12, согласованные со схемой планирования занятий по всей II части курса (см. Введение, стр. 194).

Т А Б Л И Ц А 3

Глава 12	9-недельный план изучения части II			14-недельный план изучения части II		
	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты
12.1, 12.2	1	0	—	1	0	—
12.3—12.5	1,5	1,5	II.1	1,5	2	II.1
12.6, 12.7	0,5	0	—	0,5	0	—
12.8, 12,9	2	1,5	II.2	3	2	II.2
12.10	0	0	—	0	0	—

Дополнительные материалы к главе 12

Лаборатория. В опыте II.1 (*Отражение от плоского зеркала*) учащиеся находят положение изображения, создаваемого плоским зеркалом. Лучи определяются визированием по булавкам, втыкаемым в мягкий картон.

Для этого опыта требуется настолько простое оборудование, что оно может быть роздано учащимся в обычном классном помещении, что даст возможность приступить к обсуждению проделанного опыта. Данный опыт следует проводить в начальной стадии изучения главы, лучше всего сразу после изучения раздела 12.3.

В опыте в II.2 (*Изображение в вогнутом зеркале*) находится главный фокус небольшого вогнутого зеркала. В качестве предмета используется маленькая лампочка, а положение изображения определяется методом параллакса. После выполнения опыта при различных расстояниях предмета проверяется формула $s_0 s_i = f^2$. Этот опыт лучше всего выполнять перед обсуждением раздела 12.9. Вогнутые зеркала желательно раздать учащимся значительно раньше, чтобы обеспечить материальную базу для понимания разделов 12.6—12.9.

Домашние, классные и лабораторные задания. Ответы и решения к задачам, а также таблица классификации задач по степени трудности приведены на стр. 228.

12.1. Тени

12.2. Пучки световых лучей, параллельные пучки и лучи

Цель. Ввести метод геометрического построения хода лучей как полезный метод, способствующий пониманию поведения света.

Содержание. а) Градации в густоте теней могут быть детально поняты после проведения лучей от источника (или источников) света до тени.

б) Световые лучи представляют собой идеализацию весьма узких пучков.

в) Поскольку пучки лучей не влияют друг на друга при взаимном пересечении, отдельные лучи можно проводить безотносительно к другим лучам.

Методические указания. Построение хода лучей имеет основное значение для усвоения данной главы, а также гл. 13. Образование теней само по себе не так важно, но оно служит хорошим и простым введением в построение хода лучей. Раздел 12.2 требует очень мало времени для классных заданий, так как учащиеся легко усваивают применение лучевых схем, даже если им не известен точный смысл понятия луча. То обстоятельство, что пересекающиеся лучи не влияют друг на друга, является естественным предположением, о котором достаточно упомянуть лишь мимоходом.

Большинству учащихся существенно помогает накопление под руководством преподавателя определенных навыков в построении простейших схем хода лучей прежде, чем будет изучен материал по построению изображений. Кроме того, некоторые учащиеся испытывают удовлетворение, когда при содействии преподавателя они начинают понимать новые подробности в таком обыденном явлении, как образование теней.

1. Сначала покажите учащимся резкую тень, образование которой большинству из них совершенно понятно. Подходящую тень нетрудно получить с помощью небольшого источника света в затемненной комнате. В качестве источника годится электролампа с прозрачным стеклом. Отличный результат получается со специальным источником света, применяемым в волновой кювете. (Общез-

вестный пример мы наблюдаем, когда кто-нибудь пересекает луч кинопроектора или когда какой-либо предмет, скажем, рука, оказывается на пути бокового паразитного луча, пробивающегося через случайное отверстие в кожухе проекционного фонаря.) Для образования интересных и даже забавных теней можно использовать силуэты вырезанных фигур или пальцев. Полезно проанализировать эти простые случаи путем показа на доске хода некоторых характерных лучей.

2. Затем покажите размытую тень. Учащимся это явление покажется менее понятным. (Тени, отбрасываемые светом, проникающим в класс через окна, или тени от потолочных ламп, обычно не подходят, поскольку они целиком размыты и не имеют четкой темной сердцевины.) Создайте тень от крупного источника света в комнате, лишенной другого освещения. Интересную тень дает длинная люминесцентная лампа: резкую в одном направлении и сильно размытую — в другом. Надо при этом позаботиться о том, чтобы учащимся была видна темная сердцевина тени и чтобы размытая ее часть не была однородного серого цвета, а имела плавно изменяющуюся освещенность. Постройте соответствующую схему хода лучей. Используйте промежуточные лучи для выяснения вопроса о том, какие участки источника освещают тот или иной участок тени.

3. Предложите учащимся предсказать результаты перемещения источника или препятствия, отбрасывающего тень, или, наконец, экрана, после чего покажите им эти результаты в натуре. Можно также использовать несколько источников света, сначала поочередно, а затем одновременно.

До демонстрирования всех этих эффектов, полезно предложить учащимся описать последовательные изменения характера тени от фар автомобиля, приближающегося к вам ночью. Пока автомобиль находится далеко, тень вполне резка. С приближением автомобиля возникают две тени от двух фар. В то же время каждая из этих теней приобретает внутреннюю структуру: темную сердцевину, окруженную областью с плавным изменением освещенности.

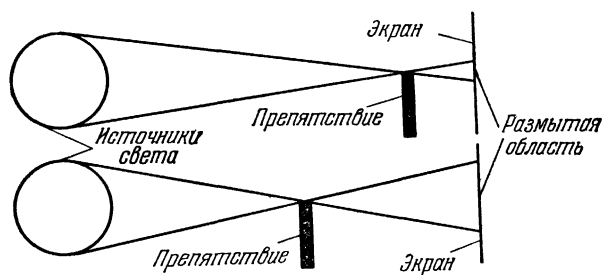


Рис. 6.

Чтобы резюмировать наблюдения, а также удостовериться в том, что учащимся понятен вопрос об образовании теней, можно обсудить в классе задачу 1. Учащиеся должны сами подсказать, что резкость тени должна увеличиваться при удалении источника света или при уменьшении либо размеров источника, либо расстояния между препятствием и экраном. Если кому-либо это будет неясно, следует вернуться к соответствующим лучевым схемам, сначала показав лучи, определяющие размеры размытой области, и затем участки источника, освещающие определенные участки размытой области тени. На рис. 6 приведена схема, поясняющая, что именно происходит при неподвижных источнике и экране и

перемещающемся препятствии. Аналогичная, хотя и несколько более сложная картина наблюдается, когда учащийся рассматривает тень своей руки, приближая ее к доске.

Следует отметить, что в случае одного источника света, как это видно из приведенной на рис. 6 схемы, увеличение резкости тени является результатом сокращения размытой области. Однако мы нередко имеем дело с несколькими источниками света (или несколькими щелевыми источниками при одном первичном). При приближении препятствия к экрану побочный свет ослабевает, способствуя усилению контрастности тени.

Далее переходим к обсуждению взаимнезависимости световых лучей. Попросите учащихся взглянуть на рис. 12.4 и объяснить, какое он имеет отношение к ходу лучей. Большинство учащихся понимает, что пересекающиеся световые лучи не взаимодействуют, но некоторые могут недооценивать тот факт, что при построении хода лучей мы постоянно опираемся на это отсутствие взаимодействия.

Задайте учащимся вопрос: что произойдет, если два луча белого света на рис. 12.4 заменить голубым и желтым лучами? Возможно, найдутся учащиеся, ожидающие взаимодействия этих лучей; некоторые скажут, что эти лучи станут зеленоватыми. Пожалуй, имеет смысл продемонстрировать взаимное пересечение цветных лучей, чтобы разубедить этих учащихся. При этом, однако, попросите учащихся самих придумать какие-либо эксперименты. Если ни один из них не порекомендует просто взглянуть на две поставленные рядом разноцветные поверхности, то предложите всему классу посмотреть на расположение рядом голубую и желтую поверхности. Найдутся учащиеся, которые отметят, что разноцветные лучи сохраняют свой цвет, несмотря на то, что они пересекаются как на пути к глазу, так и внутри глаза.

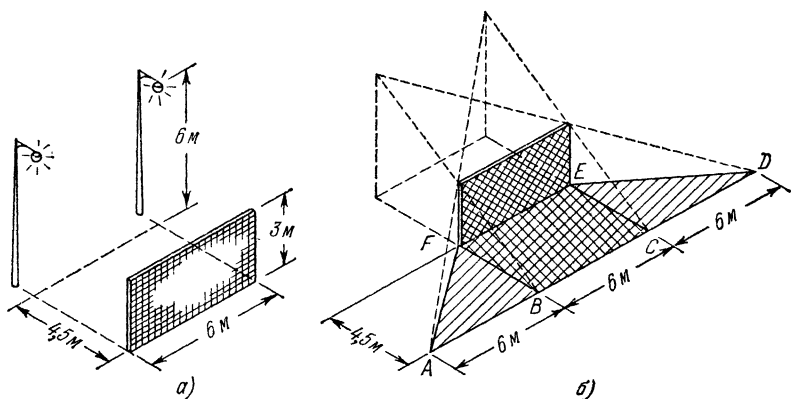


Рис. 7.

Отметим одно обстоятельство. На основании качественных сведений о дифракции, почерпнутых из гл. 11 или приобретенных ранее, некоторые учащиеся могут связывать размытость теней с дифракцией. Им следует разъяснить, что в образовании теней дифракция является мелкомасштабным эффектом, которым можно пренебречь. Если этот вопрос не будет поднят, дифракцию здесь лучше всего вообще не упоминать.

Подходящими задачами для решения в классе могут служить варианты задачи 3. Приводим один из них.

Два уличных фонаря, подвешенные на высоте 6 м, расположены в 4,5 м от плоской кирпичной стены длиной 6 м и высотой 3 м, как показано на рис. 7, а. Показать области полной и неполной тени.

О т в е т. Полная тень занимает площадку $BCEF$; неполная тень занимает площадку ABF и CDE (рис. 7, б).

12.3. Как мы определяем положение предмета?

Ц е л ь. Дать понятие о лучевом методе нахождения положения предмета.

С о д е р ж а н и е. Местоположение предмета визуально оценивается по точкам, из которых расходятся лучи. Это почти самоочевидное утверждение подчеркивается здесь по той причине, что в разделе 12.5 и в последующих главах оно используется для построения оптических изображений. Этот принцип важен не столько для определения положения предметов, сколько для подготовки к усвоению метода определения положения изображений с помощью построений хода лучей.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Приведите учащимся простейшие примеры пар расходящихся лучей и предложите им найти точки, из которых лучи расходятся.

Предложите им провести дополнительные лучи, которые выходили бы из тех же точек.

Достаточно ли двух лучей для нахождения положения точки? — Достаточно, но третий луч можно использовать для проверки. Геодезист определяет положение объекта посредством двух визирований, но иногда для проверки использует третье.

На рис. 8, а представлен интересный случай хода лучей, который подготавливает почву для нахождения изображений удлинённых наклонных предметов в зеркалах. Пунктирные лучи исходят от головы, а сплошные — от ног человека. Стоит этот человек или лежит?

Проведение продолжений этих лучей до точек их пересечения показывает, что он лежит (рис. 8, б).

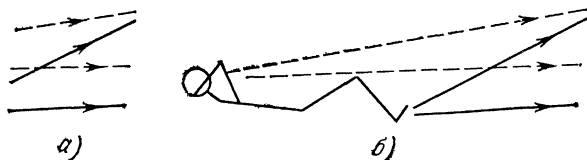


Рис. 8.

Не слишком задерживайтесь на материале этого раздела. Он показался бы излишним, если бы не сопровождался тут же применением лучевого метода для построения изображений, создаваемых зеркалами. Естественным продолжением приведенных упражнений является построение изображения в плоском зеркале (опыт II.1), после чего следует перейти к обсуждению в классе материала, изложенного в разделах 12.4 и 12.5.

Возможно, что некоторым учащимся незнакомы выражения «схождение лучей» и «фокусирование». Понятие схождения можно разъяснить уже на этой стадии, но подробное обсуждение вопросов фокусировки лучше отложить.

Учащиеся уже читали в гл. I о необходимости аккомодации глаза для обеспечения «резкости» или «ясности» изображения. Можно просто добавить, что эта аккомодация и является фокусировкой.

Хотя существуют и другие способы оценки расстояния (и, следовательно, положения) точек, помимо продолжения лучей до точек их расхождения, тем не менее этот метод особенно важен для дальнейших целей. Нет надобности подолгу останавливаться в классе на таких важных способах оценки расстояний, как, например, бинокулярное зрение или использование кажущейся величины предметов. Пространственное зрительное ощущение основано на том, что два глаза дают несколько различные изображения близкого предмета. Вместе с ранее приобретенным знанием формы предмета различие в этих изображениях позволяет составить достаточно точное представление о местонахождении предмета. Кажущаяся величина знакомого предмета составляет второй важный критерий его удаленности. Большинство учащихся быстро поймет это, если напомнить им о том, каким образом они оценивают относительную глубину расположения тех или иных предметов, изображенных на фотоснимке или картине. Оценке дальности предметов способствуют также постепенное сглаживание деталей текстуры поверхностей (текстура ткани перестает ощущаться на достаточном расстоянии), потускнение цвета (ярко-зеленая листва сереет с расстоянием благодаря фильтрации и рассеянию в атмосфере) и некоторые другие факторы.

12.4. Законы отражения

Ц е л ь. Вывод двух законов отражения.

С о д е р ж а н и е. а) При отражении света отраженный луч проходит в плоскости, в которой лежат падающий луч и нормаль (перпендикуляр) к отражающей поверхности, восставленная в точке отражения.

б) Угол отражения равен углу падения.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Законы отражения очень важны. Учащиеся должны хорошо их понимать. Эти законы потребуют лишь умеренной затраты классного времени, если класс легко справился с лучевым методом нахождения положения источника, а также ввиду того, что практическое применение этих законов будет встречаться во всей остальной части главы. Прохождение глав 12 и 13 может быть ускорено, если на данном этапе будет уделено достаточное внимание понятию нормали и определению понятий углов падения и отражения.

Если учащиеся уже выполняли опыт II.1, посвященный изображениям в плоских зеркалах, то законы отражения могут быть использованы в качестве объяснения образования этих изображений. Можно предложить им сформулировать второй закон отражения (о равенстве углов) при проведении одного из световых лучей от булавки объекта до зеркала и обратно к визирным булавкам и установлении равенства углов падения и отражения. Зеркальное отражение может быть вначале определено как вид отражения, наблюдаемого на блестящих поверхностях, подобных поверхности зеркала. На поверхностях различной степени гладкости получается различная степень зеркальности отражения. Идеально зеркального отражения не получается ни на одной реальной поверхности, так как никакая поверхность не является идеально гладкой.

Пока обсуждение ограничивается зеркальным (или правильным) отражением, учащиеся легко следят за развитием темы, но есть одна деталь, требующая внимания. Учащиеся должны строго различать угол падения (угол между падающим

лучом и нормалью) и его дополнительный угол (т. е. угол между падающим лучом и отражающей поверхностью). Пользуясь двухмерной схемой, некоторые из них сочтут более естественным измерять угол от поверхности, а не от нормали. Легко показать им, что это нежелательно, прибегнув к следующему упражнению в трехмерном пространстве.

1. Представим себе, что классная доска есть зеркало.
2. Воспользуемся метровой линейкой или указкой в качестве указателя направления падающего луча. Расположим этот указатель наклонно.
3. Сделаем отметку в точке «падения луча».
4. Предложим одному из учащихся приставить другую линейку или указку в направлении отраженного луча.
5. Сохраняя прежнюю точку падения, изменим положение «падающего луча» так, чтобы изменились и угол, и плоскость падения. Спросим учащихся, как изобразить теперь «отраженный луч»?

После демонстрации нескольких различных «падающих лучей» спросите учащихся, какая неизменная неподвижная прямая позволяет установить как плоскость падения, так и направление отраженного луча при неизменной точке падения и заданных углах падения? Такой удобной прямой и служит перпендикуляр, восставленный к отражающей поверхности в точке падения. т. е. «нормаль», соответствующая этой точке. Несмотря на такие «трехмерные» доводы, некоторые учащиеся будут продолжать молчаливо пользоваться дополнительным углом, так как на двухмерной схеме им легче его найти и подобная замена угла не отражается на конечном результате. Надо отучать такого рода индивидуалистов от этой вредной привычки, которая впоследствии будет их только путать в вопросах отражения.

12.5. Изображения в плоских зеркалах

Ц е л ь. Разъяснение понятия изображения и геометрическое построение изображений в плоском зеркале.

С о д е р ж а н и е. а) Изображение точки, создаваемое плоским зеркалом, находится там, откуда, как нам кажется, исходят лучи.

Изображение точки, видимое в результате отражения света от плоского зеркала, может быть найдено следующим образом: 1) опускается перпендикуляр из данной точки предмета на плоскость зеркала и продолжается за эту плоскость; 2) отмечается точка на продолжении этого перпендикуляра, отстоящая от плоскости зеркала на расстояние, равное расстоянию от точки предмета до плоскости зеркала. Найденная точка и является изображением рассматриваемой точки предмета.

б) Положение изображения однозначно определяется законами отражения.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Следует делать упор на изображения лишь в плоском зеркале. Не рекомендуется касаться систем, образуемых несколькими зеркалами, установленными под разными углами, если не считать факультативных лабораторных заданий для учащихся, которые еще не были вызваны в классе.

Некоторые преподаватели считают целесообразным проводить обсуждение разделов 12.4—12.10 на лабораторных занятиях, связывая это обсуждение с опытами II.1 и II.2. Вся последовательность представлений, начиная с метода определения положения предметов с помощью лучей (что может осуществляться накалыванием булавок на одной общей прямой с булавкой-предметом) и законов

отражения и кончая построением изображений в зеркалах, поддается естественному развитию в процессе лабораторных занятий.

Разумеется, формальное разделение разбора вопросов в классе и на лабораторных занятиях тоже возможно. В этом случае желательно планировать занятия так, чтобы лаборатория предшествовала обсуждению. В каждом из этих двух вариантов весьма полезно обеспечить понимание учащимися параллакса как метода определения положения изображения, поскольку этот метод используется в последующих опытах.

Если учащиеся неуверенно используют метод продолжения лучей в обратном направлении для нахождения положения точечного изображения (на что было обращено внимание в разделе 12.3), может потребоваться повторный обзор этого метода для более углубленного рассмотрения вопроса о построении изображений. Для закрепления материала полезно проделать следующие упражнения. (Можно повысить интерес учащихся, если преподнести первое упражнение в виде загадки.)

1. Проведите несколько расходящихся лучей, например, как показано на рис. 9, а. Задайте классу вопрос: каково наименьшее число точек, из которых

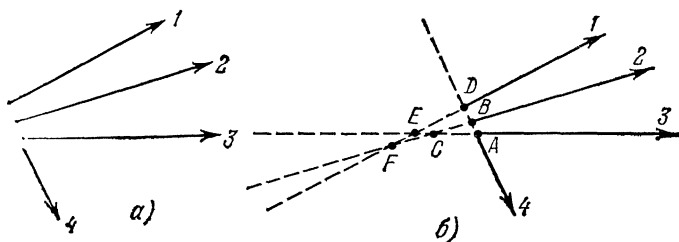


Рис. 9.

могут расходиться эти лучи? Если вопрос не будет поднят самими учащимися, не вдавайтесь в обсуждение неоднозначности ответа о фактическом числе точек расхождения этих лучей. Например, наряду с другими вариантами, возможен любой из следующих вариантов:

- лучи 1 и 2 выходят из F, а 3 и 4 из A;
- лучи 1 и 3 выходят из E, а 2 и 4 из B;
- лучи 1 и 4 выходят из D, а лучи 2 и 3 из C.

В реальном случае из каждого фактического точечного источника расходитесь целый пучок лучей, и неоднозначность решения вопроса о фактическом числе точек расхождения лучей отпадает.

2. Еще одно полезное упражнение заключается в построении на доске схемы, изображенной на рис. 10, а (она является ключом ко всем подобным ответам). Спросите, обязательно ли в точке расхождения лучей 1, 2 и 3 должна находиться точка самого предмета или эти лучи могут идти от зеркала. Изобразите сечение зеркала и предложите одному из учащихся провести луч, который по закону отражения должен отразиться в виде луча 1, затем предложите проделать то же самое для лучей 2 и 3 (рис. 10, б).

При заданном положении зеркала какой единственный точечный источник мог бы испускать эти лучи? Если смотреть на ход этих лучей, не зная положения

зеркала, где можно было бы искать их точечный источник? Здесь следует подчеркнуть понятие точки изображения, соответствующей точке предмета. Может потребоваться краткое повторение рассуждений, приведенных в разделе 12.5. Многие из учащихся усваивают приведенные рассуждения легко, но некоторым нужна помощь.

Следует заметить, что хотя в данном разделе и вводятся понятия действительного и мнимого изображений, обсуждение действительных изображений целесообразно пока отложить. Учащимся известно, что изображение в плоском зеркале

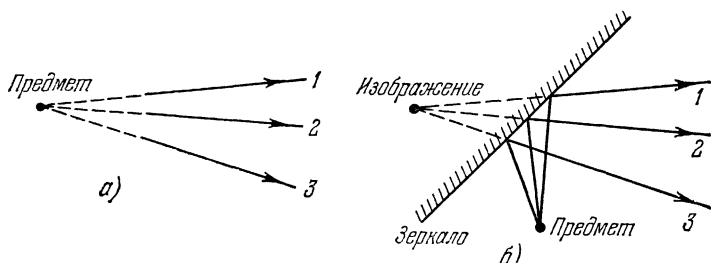


Рис. 10.

называется мнимым, так как свет в действительности не исходит от него, и этого достаточно. За зеркалом свет не проходит. На вопрос, могут ли вообще быть изображения, кроме мнимых, можно привести пример действительных изображений на киноэкране, а также разъяснить, что вопрос о действительных изображениях, создаваемых вогнутыми зеркалами, составит отдельную тему. Можно добавить, что изображение называется действительным, если лучи света на самом деле из него расходятся.

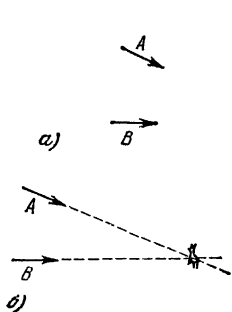


Рис. 11.

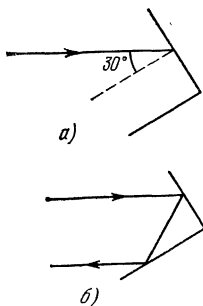


Рис. 12.

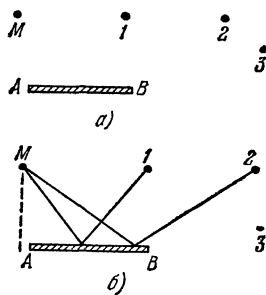


Рис. 13.

В Приложении 1 на стр. 379 приводятся некоторые сведения о множественных изображениях.

Для закрепления изложенного материала полезно решить в классе следующие задачи.

А. (Эта задача тривиальна, но помогает некоторым учащимся усвоить самое основное.) Охотники А и В целятся, как показано стрелками на рис. 11, а. Если они целятся в одного и того же оленя, где он находится?

О т в е т. Следует продолжить линии прицеливания до точки их пересечения (рис. 11, б). В этой точке и должен находиться олень.

Б. Два зеркала сходятся под прямым углом (рис. 12, а). Луч света падает на одно из них под углом в 30° . Построить дальнейший ход этого луча.

О т в е т. Независимо от величины угла падения на одно из двух зеркал, сходящихся под прямым углом, отраженный от второго зеркала луч пойдет параллельно падающему.

В. Человек стоит в точке M чуть левее левого края плоского зеркала AB (рис. 13, а). Может ли он видеть себя в этом зеркале? Сможет ли он увидеть предметы 1, 2 и 3?

О т в е т. Себя он не увидит (рис. 13, б). Он не увидит и предмета 3, так как из 3 до M нельзя провести ни одного луча, подчиняющегося законам отражения. Предметы 1 и 2 он увидит благодаря лучам, показанным на рис. 13, б.

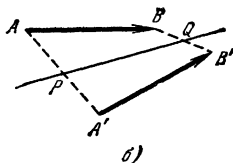
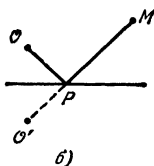
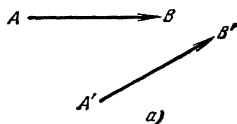
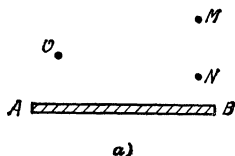


Рис. 14.

Рис. 15.

Г. а) Определить положение изображения точки O в плоском зеркале AB (рис. 14, а).

б) Увидит ли это изображение человек, находящийся в точке M ?

в) Куда сместится изображение точки O при перемещении человека из M в N ?

О т в е т. а) См. рис. 14, б.

б) Увидит, так как свет может проходить от O через P к M . Другой способ решения заключается в том, чтобы убедиться в возможности проведения прямой от M через P до O' через зеркало.

в) Этот вопрос является «ловушкой». Положение точки O' определяется исключительно положением точки O и зеркала. Точка O' не сместится.

Д. Может ли $A'B'$ быть изображением AB в каком-либо плоском зеркале (рис. 15, а)? Привести обоснование ответа.

О т в е т. Если A' есть изображение точки A , то зеркало должно лежать посередине между A и A' (рис. 15, б). Оно должно лежать также посередине между B и B' . Таким образом, зеркало должно располагаться на PQ . Но тогда AA' не является перпендикуляром к PQ и потому A' не может быть изображением точки A . И так, $A'B'$ не может быть изображением AB .

12.6. Параболические зеркала

Ц е л ь. Составить из плоских зеркал искривленную поверхность, способную фокусировать свет. Показать, что законы отражения применимы не только к плоским, но и к искривленным поверхностям. Этот раздел содержит также сведения

о том, что луч, параллельный оси зеркала, после отражения проходит через главный фокус. Это составляет одну из предпосылок для построения изображений в параболических зеркалах (см. разделы 12.8 и 12.9).

С о д е р ж а н и е. а) Можно составить такую совокупность малых плоских зеркал, чтобы каждое из них отражало узкий пучок лучей через одну и ту же узкую область пространства.

б) Эта область концентрации лучей может быть сокращена в размерах путем сокращения размеров всех должным образом ориентированных плоских зеркал.

в) Продолжая процесс последовательного деления и переориентации плоских зеркал до идеализированного предела, получаем идеальную непрерывную искривленную поверхность, способную наилучшим образом фокусировать параллельный пучок лучей. Сечение этой поверхности называется *параболой*.

г) Точка, в которой концентрируется после отражения параллельный пучок лучей, параллельный оси параболического зеркала, называется *главным фокусом* зеркала.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. При наличии плоских зеркалец подходящего размера можно иллюстрировать обсуждение текста Учебника показом комбинации этих зеркалец, составленной «на глаз» с расчетом на образование приблизительно параболического зеркала.

Зеркальца располагаются приблизительно по параболе вблизи от ее фокуса (рис. 16). Для облегчения этого процесса зеркальца можно укрепить резинками на гибкой алюминиевой полосе. Небольшой яркий источник света (вполне годится лампочка от карманного электрического фонаря) помещается в предполагаемый фокус. Один из учащихся становится у стола с зеркальцами для выполнения операций по юстировке, а другой располагается в 7 метрах перед системой зеркалец для инструктирования первого. Инструктирующий смотрит по очереди на каждое зеркальце и отдает распоряжения о его регулировке, добиваясь того, чтобы увидеть источник света в центре зеркальца. Таким способом можно построить параболу с неожиданно высокой точностью.

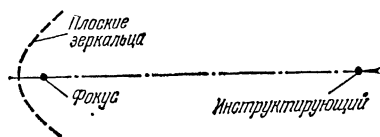


Рис. 16.

При всей простоте содержание этого раздела крайне важно для понимания действия неплоских зеркал. Знакомство с «двухмерными» параболическими цилиндрами (типа изображенного на рис. 12.15) перед исследованием трехмерных случаев (см. рис. 12.14) облегчает понимание геометрического аспекта отражения на параболической поверхности. Если учащимся не вполне ясен смысл этих рисунков, можно сделать на доске эскиз того, как выглядел бы рис. 12.15, если посмотреть на него сверху. Учащиеся могут рассмотреть этот рисунок с точки зрения законов отражения и обдумать, что должно произойти с областью пересечения лучей при изменении углов боковых зеркал.

По мере уменьшения размеров плоских зеркал область пересечения лучей будет сокращаться (рис. 17) и в случае идеальной параболической поверхности превратится в точку. Учащиеся должны помнить, что в случае параболического цилиндра отражающая поверхность искривлена только в одном направлении (подобно вогнутой поверхности прямого желоба). Поэтому параллельный пучок лучей фокусируется в пространстве не в точку, а на прямую.

Для того чтобы неплоское зеркало имело один точечный главный фокус, его поверхность должна представлять собой параболоид вращения, т. е. нечто вроде поверхности, изображенной на рис. 12.14. Хотя цилиндрические зеркала и линзы редко встречаются, все же учащимся полезно уметь различать цилиндрические и осесимметричные зеркала. Остановиться на этом различии есть смысл, так как на плоской схеме, изображающей разрез осесимметричного зеркала (поверхности вращения), некоторые учащиеся усматривают изображение цилиндрической поверхности.

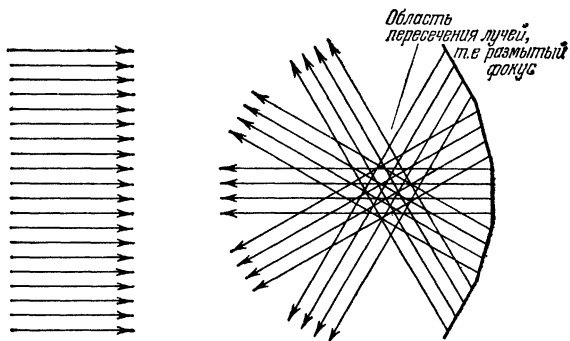


Рис. 17.

Для учащихся, никогда не видавших выпуклых и вогнутых зеркал, очень важно на ранней стадии изучения данного материала иметь возможность хотя бы один раз увидеть и пощупать их. После этого рисунки и фотоснимки, помещенные в тексте Учебника, будут им понятнее. Желательно, чтобы они рассмотрели как выпуклые и вогнутые, так и цилиндрические зеркала.

Некоторые учащиеся могут заинтересоваться, почему на рис. 12.14 и 12.15 не видно падающих лучей. На рис. 12.14 частицы дыма освещены не только отраженными, но и падающими лучами. Однако освещенность сконцентрированными лучами выше, а фотограф сообразил, что важно подобрать такую выдержку и такие фотоматериалы, чтобы контраст между падающими и сконцентрированными отраженными лучами был сильнее. В основном так же можно объяснить отсутствие «видимых» падающих лучей и на рис. 12.15. Для рис. 12.15 возможно, впрочем, и другое объяснение: поверхности частиц, делающих лучи видимыми, не только рассеивают свет, но частично и отражают его зеркально, т. е. главным образом вперед. Это может также объяснить то обстоятельство, что лучи, более близкие к направлению оси объектива фотоаппарата, кажутся более яркими, чем расходящиеся от этого направления под большими углами.

Надо полагать, что лишь немногие из ваших учащихся успели ознакомиться с уравнением параболы. Прибегать к нему, однако, нет надобности. Большинство учащихся удовлетворится принятием фокусирующего свойства параболы в качестве ее определения. В сущности это свойство является вполне адекватным определением параболы.

Некоторым учащимся, возможно, известно, что парабола может быть определена как геометрическое место точек, равноотстоящих от фиксированной точки (фокуса) и фиксированной прямой (директрисы) (рис. 18).

Другим учащимся парабола может быть знакома как коническое сечение (рис. 19). Фокусирующее свойство параболы является следствием каждого из этих двух определений, но математический вывод этого следствия слишком сложен для большинства учащихся.

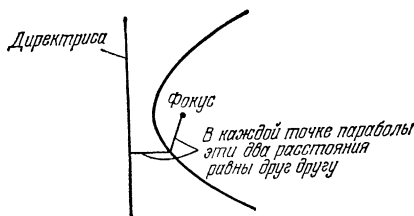


Рис. 18.



Рис. 19.

12.7. Проекторы

Ц е л ь. Учитывая обратимость хода лучей, показать, что луч, прошедший через главный фокус, после отражения параболическим зеркалом идет параллельно оси зеркала. Это — одно из исходных положений, используемых при построении изображений.

С о д е р ж а н и е. а) Поскольку параболическое зеркало собирает параллельные лучи в точечный фокус и поскольку ход лучей обратим, проходящие через главный фокус и затем падающие на параболическое зеркало лучи должны отражаться в виде параллельного пучка.

б) Определение понятия фокусного расстояния.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Данный и последующий разделы вводятся для того, чтобы учащиеся приобрели опыт анализа простых случаев отражения в параболических зеркалах. Вместе взятые, эти разделы служат иллюстрацией приближений, которые можно использовать при рассмотрении более сложных случаев. Приводимый в разделе важный материал не является для учащихся новым. Многие из них смогут сообразить до прочтения этого раздела, что расположенный в фокусе параболического зеркала источник света дает пучок параллельных лучей. Тем не менее, здесь стоит подчеркнуть это обстоятельство поскольку оно будет определяющим при построении изображений. Надо обеспечить, чтобы уже на данном этапе все учащиеся имели представление о том, что лучи, параллельные оптической оси, отражаясь, проходят через главный фокус. В свою очередь, лучи, выходящие из фокуса, отражаясь, идут параллельно оси зеркала. Будет достаточно, если учащиеся поймут лишь теоретические основы применения отражателя в прожекторах. Поскольку в реальных прожекторах источник света — не точечный, а также поскольку неэкономично изготовлять идеальные параболоиды и приходится, кроме того, обращать внимание на охлаждение прожектора, его защиту от непогоды и т. п., реальный расчет прожектора более сложен и мы им не будем интересоваться.

Возможно, наилучшим способом демонстрации принципа работы прожектора является опыт с хорошей лампочкой от карманного фонаря. Если нить лампочки находится вблизи главного фокуса, то получается узкий пучок параллельных лучей. Вы можете показать, как с помощью винта рефлектор перемещается относительно нити лампы. Большую часть лампочек от карманного фонаря можно фокусировать так, чтобы на близко расположенной поверхности получалось световое

пятно с диаметром, меньшим поперечных размеров отражателя. Вы могли бы начать именно с этого случая, изменяя затем фокусировку и получая пятно различного размера. Спросите учащихся, как можно установить момент, когда нить лампы находится в главном фокусе. Возможно, некоторые, руководствуясь принципом «четкий фокус — наилучший», ответят неправильно («когда пятно наименьшее»). Если вы получите такой ответ, выясните, не желает ли кто-либо возразить. Если нет, то спросите, с большими или меньшими размерами, чем диаметр рефлектора, должен давать пятно пучок параллельных лучей? Кое-кто тогда придет к выводу: «пятно должно быть того же размера». Теперь можно переходить к разделу 12.8.

Вы можете поддаться соблазну продемонстрировать принцип действия проектора на хорошем вогнутом зеркале. В таком случае воздержитесь от обсуждения построения изображений до того, как будет понято действие проектора.

12.8. Астрономические телескопы

Ц е л ь. Рассмотрение астрономического телескопа вводится для иллюстрации построения изображения точечного объекта в параболическом зеркале. Построение изображений точечных объектов, расположенных как на оси, так и вне оси зеркала, позволяет затем строить изображения протяженных предметов.

С о д е р ж а н и е. а) Параболические зеркала фокусируют параллельные пучки, даже если они падают под углом к оси.

б) Для построения изображения точки достаточно провести два любых луча. Удобнее всего пользоваться: 1) лучом, проходящим через главный фокус (отражающимся затем параллельно оси), и 2) лучом, падающим на полюс зеркала (который удобен, так как нормаль в этой точке уже проведена).

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Данный раздел особенно важен, поскольку в нем вводится понятие двух основных лучей.

В этом разделе учащиеся неявным образом подводятся вплотную к понятию действительного изображения. Быть может, целесообразно не ставить их об этом в известность до самого конца обсуждения темы, т. е. до момента, когда можно им сообщить, что точка, в которой сходятся лучи, идущие от далекой звезды, является *действительным изображением* удаленной точки. Оно «действительно» по той причине, что лучи, образующие изображение, *действительно* проходят через него. Светочувствительный приемник, будучи помещен в эту точку, зарегистрировал бы действие света. Помещенный в это место клочок папиросной бумаги показал бы это изображение.

Удобство использования луча, проходящего через главный фокус, для нахождения точки схождения параллельных лучей, наклоненных к оси, самоочевидно. Использование луча, падающего на полюс, также целесообразно. Предложите одному из учащихся объяснить, как бы он стал проводить какой-нибудь другой, произвольный луч. Можно будет удовлетвориться пониманием всего вопроса, если учащиеся согласятся с тем, что, если в какой-либо точке зеркала проведены касательная и нормаль, то использование луча, упавшего на эту точку, будет так же удобно, как и выбор луча, падающего на полюс зеркала.

Новое представление, выдвигаемое в этом разделе, заключается в том, что параллельные лучи, наклоненные к оси параболического зеркала, тоже собираются (почти) в одну точку. Если бы это фокусирование параллельных лучей происходило только для лучей, параллельных оси, то астрономический телескоп

не позволял бы фотографировать две звезды одновременно. Если бы лучи от одной звезды были параллельны оси, то лучи от другой не были бы ей параллельны. Для лучей, образующих весьма малый угол с осью, фокусировка является в высшей степени острой, хотя и менее совершенной, чем для осевых лучей.

Упоминание телескопа обычно действует как спусковой крючок, вызывающий поток вопросов о подробностях устройства и монтажа телескопов и т. п. Эти вопросы интересны, но вряд ли на них может хватить времени.

Проверкой усвоения материала учащимися может служить решение следующих задач в классе.

А. Постройте параболу по уравнению $y=kx^2$ (или скопируйте через копировальную бумагу), размножьте ее и предложите учащимся провести несколько параллельных лучей и их продолжений после отражения путем проведения касательных к кривой и использования законов отражения. Аккуратное выполнение этого задания приведет к весьма поучительным результатам.

а) Дайте им чертеж параболы AC с тремя проведенными стрелками 1, 2 и 3 (рис. 20) и предложите провести продолжения лучей, как показано на схеме.

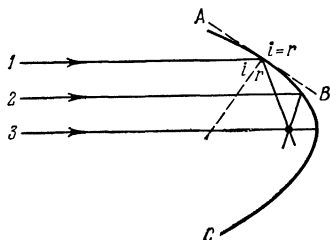


Рис. 20.

б) Пусть, далее, учащиеся проведут отраженные лучи через фокус. После вторичного отражения лучи должны пойти назад параллельным пучком. Это и является иллюстрацией действия прожектора.

Б. Предложите учащимся повторить предыдущую задачу, заменив параболу дугой окружности. Лучи не сойдутся точно в одной точке, но почти сойдутся, если они близки к оси.

В. Свет от лампочки для карманного фонаря падает на неплоское зеркало. Какова должна быть форма поверхности, чтобы лучи от лампочки после отражения сходились к ней обратно?

О т в е т. Сферическая поверхность с лампочкой в центре. Если учащимся понятен принцип действия вогнутых зеркал, ответ для них довольно очевиден. Подойти к этому ответу, однако, не так просто. С другой стороны, если ответ угадан, то проверить его легко.

Г. (Эта задача позволяет проверить понимание учащимися принципа действия неплоских зеркал.) Размножьте через копировальную бумагу чертеж параболы, как в задаче А, и наметьте параллельные лучи, падающие на выпуклую поверхность (рис. 21).

а) Предложите учащимся изобразить ход лучей.

б) Задайте вопрос: откуда (как должно казаться наблюдателю) расходятся отраженные лучи?

О т в е т. а) Луч A продолжается до точки падения на поверхность B . Из этой точки восстанавливается перпендикуляр BP . Проводится отраженный луч так, чтобы $\angle CBP = \angle ABP$. Операция повторяется для других лучей, намеченных преподавателем.

б) Свет кажется идущим из фокуса параболы. Рассмотрим луч MN и его отраженную часть NO . Рассмотрим также луч $M'N$ и его отраженную часть NF (где F — фокус), которая получилась бы, если бы параболоид был посеребрен изнутри.

По законам отражения $\angle M'NS = \angle FNS$, так как мы знаем, что параболоид сводит лучи, параллельные его оси, в фокус, $\angle MNT = \angle M'NS$. Поскольку к тому же $\angle ONT = \angle TNM = \angle SNF$, то можно утверждать, что FNO представляет собой прямую, и следовательно, отраженный луч NO кажется выходящим из фокуса. От учащихся, разумеется, следует ожидать ответа более интуитивного характера.

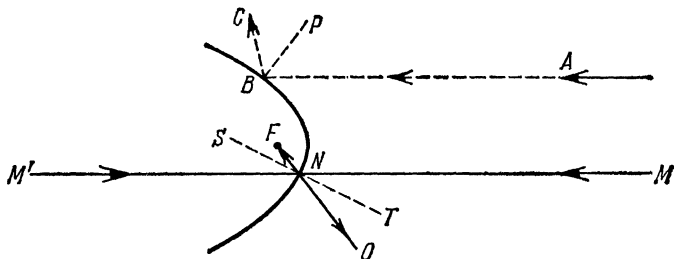


Рис. 21.

12.9. Изображения и оптические обманы

Ц е л ь. Развитие понимания деталей построения изображений в параболических (и сферических) зеркалах. Использование построения хода лучей и геометрических соображений, а не формул, для установления взаимосвязи между величиной и расстоянием предмета, а также величиной и расстоянием изображения.

С о д е р ж а н и е. а) Параболические зеркала создают изображения.

б) Положение изображений может быть найдено путем проведения луча, падающего параллельно оси зеркала и отражаемого через главный фокус, и луча, падающего через главный фокус и отражаемого параллельно оси.

в) Нетрудно найти подобные треугольники, позволяющие установить соотношения между: 1) расстоянием до изображения и расстоянием до предмета: $s_0 s_i = f^2$; 2) величиной изображения и величиной предмета: $H_i/H_0 = f/s_0 = s_i/f$.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Рассматриваемый материал имеет первостепенное значение для усвоения принципов построения изображений как в зеркалах, так и в линзах. Учащимся важно уметь строить ход лучей. Если они научились строить и объяснять ход лучей, значит, им понятны принципы построения изображений. Простое запоминание формул и подход к задачам на построение как к простым алгебраическим упражнениям не обеспечивает понимания вопроса. Задачи решать важно, но можно отбить у учащихся вкус к слепому пользованию формулами, прибегнув к варьированию обозначений в разных задачах. Поощряя использование третьего основного луча, т. е. луча, падающего на полюс параболоида, в тех случаях, когда он упрощает геометрическое построение, вы сильно облегчите учащимся решение некоторых задач на построение хода лучей. Если даже порицать слепое пользование формулами, большинство учащихся все равно их будет знать. Но если при этом ваш упор на геометрические построения хода лучей достигнет цели, учащиеся будут также знать, как строятся изображения и как вывести ту или иную формулу геометрической оптики, которая может понадобиться.

Полезно начать проработку этого раздела с постановки, при активном участии учащихся, демонстрации, показывающей образование действительного изображения с помощью вогнутого сферического или параболического зеркала. В ка-

честве такой демонстрации следует выполнить опыт II.2 прежде, чем переходить к сколько-нибудь подробному обсуждению содержания данного раздела. Если по какой-либо причине придется отложить выполнение опыта в целом, необходимо провести хотя бы часть опыта, позволяющую учащимся увидеть одно изображение и определить его положение.

Интересное введение к обсуждению этой темы в классе составит следующая демонстрация. Требуется вогнутое сферическое или параболическое зеркало. Установка собирается по приведенной на рис. 22 схеме. Букет из искусственных цветов подвешивается в перевернутом виде. Цветы, отгороженные от наблюдателя, освещаются лампочкой. Как цветы, так и находящаяся над ними ваза расположены

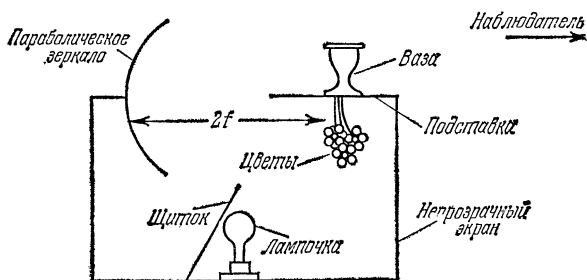


Рис. 22.

на удвоенном фокусном расстоянии от зеркала. Поскольку зеркало образует действительное обратное изображение, букет в данном случае кажется неперевернутым. В том, что это изображение является действительным, можно убедить учащихся, поместив над вазой лист папиросной бумаги или восковки.

Если проявить известную изобретательность в способах эффектного показа описанной демонстрации, то она может послужить действенным стимулом к изучению вопроса. Установку можно расположить так, чтобы она была правильно ориентирована относительно луча зрения учащихся при входе в класс. Цветы в физической аудитории — зрелище, достойное внимания и вполне заслуживающее того, чтобы бросить на него взгляд вторично. Настоящая сенсация ожидает вошедшего в класс в тот момент, когда он минует угловое поле изображения и букет вдруг исчезает. Можно придумать и другие интересные способы поднесения этой демонстрации. Для обеспечения «ошеломляющего» действия демонстрации нужно во всяком случае обставить ее так, чтобы при первом взгляде букет над вазой был виден. Затем можно убрать вазу, оставив «букет» висеть в воздухе, или попытаться выдернуть из вазы цветы, которых в ней нет, и т. п.

Весьма вероятно, что понадобится показать учащимся, как именно можно установить положение изображения с помощью построения хода лучей. Чтобы классу было легче следить за объяснениями, можно в качестве предмета воспользоваться стержнем с белым и красным концами. Ни один из этих концов не должен находиться на оси зеркала. Проведите от каждого конца лучи соответствующих цветов, чтобы их легче было различить. Рассматривая сначала белый конец предмета, проведите более двух лучей, но подчеркните, что два выбранных луча вполне пригодны и легче всего поддаются точному построению, поэтому можно стереть все лучи, кроме этих двух. Эти последние могут быть проведены без построения

касательных, нормалей и равных углов. (Для луча, проведенного в полюс, нелегко точно построить симметричный луч по другую сторону оси. Однако, этот луч весьма полезен и рекомендуется использовать его во всех тех нередких случаях, когда он упрощает геометрические построения в задачах. Например, он полезен в тех задачах, в которых требуется найти относительные размеры, если заданы расстояния предмета и изображения, но не дано фокусное расстояние.) После построения точечного изображения одного конца стержня нужно перейти к построению другого. Проведение лучей другим цветом предотвращает путаницу. Нужно обеспечить ясное понимание того, что изображение точки есть точка пересечения лучей, вышедших из данной точки объекта и отраженных зеркалом. Пока это не разъяснено, некоторые из учащихся могут думать, что точечное изображение получается везде, где есть пересечение каких бы то ни было лучей.

Прежде чем учащиеся займутся выводом формул, приведенных в тексте Учебника, они должны попрактиковаться в построении хода лучей с соблюдением масштаба предметов и изображений. Предложите им провести лучи от заданного предмета до цилиндрического зеркала и затем до изображения. У зеркала они должны строить нормали к его поверхности и как можно точнее соблюдать закон отражения о равенстве углов. Вообще учащихся нужно время от времени заставлять чертить с максимальной возможной точностью. Попробуйте предложить им проводить лучи с точностью до одной десятой миллиметра. Тогда им легко будет обнаружить эффект сферической аберрации (и вам придется напрягать внимание, чтобы отличить результаты сферической аберрации от неточностей чертежа). Упражнения такого рода помогают учащимся осознать важность законов отражения.

Формула $s_0 s_i = f^2$ выведена отчасти в качестве иллюстрации применения геометрических соображений к нахождению положения изображения. Равносильная ей формула $1/p + 1/q = 1/f$ выводится тоже просто, но обратные величины путают некоторых учащихся, а правило знаков для p , q и f сложнее, чем для первой формулы (во многих учебниках физики p обозначает расстояние от предмета до зеркала, а q — расстояние от изображения до зеркала). Каждая из двух формул имеет свои преимущества и недостатки. Нетрудно подобрать задачи, в которых одна из этих формул удобнее. Каждый физик отдает предпочтение той формуле, которая для него привычнее; преподаватель, естественно, склонен подбирать такие задачи и вопросы, к которым излюбленный им вид формулы лучше подходит.

Если формула с обратными величинами для вас привычнее, то после непродолжительной практики вы освоитесь и с другой формулой. Затруднения будут незначительны и вскоре отпадут. Учащиеся же, не имея предварительного знакомства ни с одной из этих формул, обычно считают формулу с квадратом фокусного расстояния более легкой для запоминания и более удобной в вычислениях.

Физики, часто сталкивающиеся с вопросами геометрической оптики, иногда пользуются обеими формулами на равных основаниях. В элементарных же курсах физики использование обеих формул может путать учащихся. Они отсчитывают расстояния от зеркала, когда нужно их отсчитывать от фокуса, и наоборот.

Поскольку вы будете стремиться к тому, чтобы учащиеся пользовались графическим методом и заново выводили формулы, когда в них возникает надобность, предупреждение о недопустимости приписывания символам p и q значения расстояний от зеркала может показаться излишним. Однако могут возникнуть случаи, когда от учащихся потребуется использование лучевых схем, в которых нужно

обозначить расстояние от изображения или от предмета до зеркала. В таких случаях предоставьте им выбор любых обозначений. Наиболее целесообразным может оказаться обозначение расстояний парой букв, относящихся к концам отрезка. Если же вы припишете определенному расстоянию одну определенную букву, то у некоторых учащихся появится соблазн запомнить выведенную формулу для последующего пользования. Вариант с $s_0 s_i$ будет также использован для линз в гл. 13.

Некоторые преподаватели могут удивиться тому, что в тексте Учебника применяется ньютоновская форма зависимости между расстоянием изображения, расстоянием предмета и фокусным расстоянием ($s_0 s_i = f^2$), тогда как гауссова форма ($1/p + 1/q = 1/f$) гораздо употребительнее.

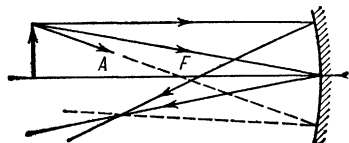


Рис. 23.

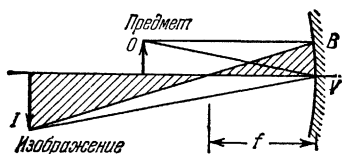


Рис. 24.

Для тонких линз гауссова форма действительно имеет кажущееся преимущество наличия лишь одной опорной точки (центра линзы), от которой отсчитываются расстояния предмета, изображения и фокусное. Для толстых линз однако, это преимущество не только исчезает, но возникает вопрос, что именно подразумевается под фокусным расстоянием толстой линзы. Ньютоновская же форма использует одну и ту же пару опорных точек (главные фокусы) как для тонких, так и для толстых линз (или для комбинации тонких линз, рассматриваемой как одна толстая линза).

Рассмотрим, например, опыт II.4. Он может быть проделан с совершенно одинаковым правом с помощью одной тонкой линзы или двух собирающих линз, укрепленных на концах картонной трубки длиной от 10 до 15 см. В этом опыте определяется положение главных фокусов системы линз и устанавливается постоянство величины $s_0 s_i$. Положительное значение корня из этой постоянной и называется фокусным расстоянием системы линз.

Гауссова форма тоже справедлива для подобной системы линз, но при условии, что расстояния предмета и изображения отсчитываются от двух разных точек, называемых главными. Каждая из них находится на расстоянии, равном фокусному расстоянию и отсчитывается по направлению к линзе от соответствующего главного фокуса. В большинстве случаев главные точки расположены внутри толстой линзы или системы линз и потому труднодоступны для экспериментального определения.

Для решения в классе можно использовать следующие задачи. (Эти задачи должны опираться скорее на схемы хода лучей, чем на использование формул. Полезны, однако, и некоторые задачи на использование формул.)

А. Дана схема, на которой показано все, кроме пунктирных линий и главного фокуса (рис. 23).

а) Показать и обозначить главный фокус.

б) Продолжить луч А.

О т в е т. а) Главный фокус находится в точке F . б) Продолжение луча A показано пунктиром.

Б. Предмет высотой 3 мм дает изображение высотой 5 мм на расстоянии 25 см от вогнутого зеркала (рис. 24).

а) Найти расстояние от зеркала до предмета.

б) Чему равно фокусное расстояние зеркала?

О т в е т. а) Луч, падающий на полюс зеркала, отражается под тем же углом к оси, под каким падает. Поэтому высоты предмета и изображения пропорциональны их расстояниям от полюса зеркала. б) Проведем прямые OB и BI , мы видим из подобия заштрихованных треугольников, что

$$\begin{aligned} BV/f &= 0,5 \text{ см}/(25-f), & BV &= 0,3 \text{ см}, \\ 0,3(25-f) &= 0,5f, & f &= 75/8 \text{ см} = 9,4 \text{ см}. \end{aligned}$$

12.10. Действительные и мнимые изображения

Ц е л ь. Распространение лучевого метода на построение мнимых изображений.

С о д е р ж а н и е. а) Если предмет находится между параболическим зеркалом и его главным фокусом, изображение является мнимым.

б) Для определения положения изображения можно пользоваться формулой Ньютона.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Не затрудняйте себя попытками добиться усвоения правила знаков. Если учащиеся будут считать s_i отрицательным, они получат отрицательное значение и для s_o , что можно интерпретировать как признак того, что предмет смещен от фокуса в сторону зеркала. Поскольку, однако, правило знаков может вызвать много ошибок, на его изложение не стоит тратить времени. Качественно правильные результаты дает геометрическое построение, числа же доставляет формула.

Наглядное различие между действительным и мнимым изображениями вытекает из представления ϕ прозрачном экране. Если изображение улавливается на небольшом экране (например на кальке), оно является действительным, если нет, — мнимым.

ДОМАШНИЕ, КЛАСНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам

В табл. 4 приведена классификация задач по степени трудности и по разделам. Выделены задачи, особенно подходящие для обсуждения в классе. Особо рекомендуемые задачи отмечены значком #.

ТАБЛИЦА 4

Разделы	Со звездочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
12.1, 12.2	1, 4	2#	3		2#, 3
12.3—12.5	5—8	9	11	10, 12, 13	11
12.6, 12.7	14, 15				
12.8, 12.9	16, 18	19, 22#, 23	17#, 20#, 24	21	17#, 20#
12.10	25, 26		28, 30	27, 29	28, 29

Краткие ответы

1*. Да; если отодвинуть экран достаточно далеко назад, на нем останется только полутень.

4*. Произошло бы его сужение.

5*. См. рис. 25.

6*. Угол 3 — угол падения, угол 2 — угол отражения.

7*. Бесконечное число лучей, совокупность которых образует полый конус с осью, перпендикулярной к поверхности зеркала.

8*. Один.

14*. $f = 12$ мм.

15*. Лучи отражались бы обратно к параболическому зеркалу, от которого они отражались бы параллельно оси.

16*. Достаточно двух лучей, так как остальные проходят почти через ту же самую точку.

18*. Нет, свет от изображения совсем не попадет в ваши глаза.

25*. Да, во всех случаях, когда $s_0 > f$.

26*. Нет.

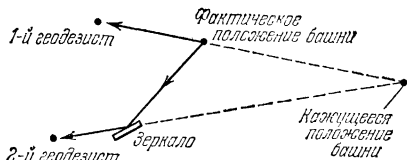


Рис. 25.

Ответы с указаниями и решениями

2. Эта задача хороша для обсуждения в классе. Ее можно решать всем классом, без вызова учащихся.

При заданном источнике света резкость тени можно увеличить как уменьшением расстояния от препятствия до экрана, так и удалением источника света от препятствия. Резкость тени увеличивается также при уменьшении размеров источника.

3. а) Полное солнечное затмение происходит, когда часть поверхности Земли находится в полной лунной тени, так как только из точек Земли, находящихся в полной тени, не видно солнечного диска. Соотношение между диаметрами Луны

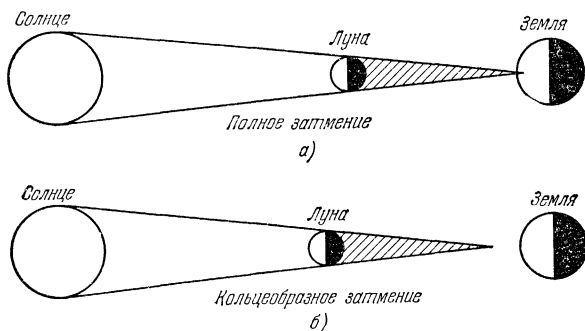


Рис. 26.

и Солнца и их расстояниями от Земли таково, что при некоторых солнечных затмениях вершина конуса полной тени Луны как раз касается земной поверхности (рис. 26, а). В других случаях Земля достаточно далека от Луны (или Луна достаточно близка к Солнцу), для того чтобы вершина конуса полной тени Луны достигала поверхности Земли. В таких случаях земной наблюдатель видит периферию солнечного диска. Такого рода затмения называются кольцеобразными (рис. 26, б).

Большую часть солнечных затмений составляют частные затмения, при которых не только нигде на Земле нет полного затмения, но продолжение линии центров Солнца и Луны (которое проходит через вершину конуса полной тени)

не задевает поверхности Земли. То обстоятельство, что бывают и кольцеобразные и полные затмения, указывает на то, что расстояния от Земли до Луны и от Земли до Солнца должны изменяться. Как то, так и другое действительно изменяются.

б) Поскольку при полном затмении вершина конуса лунной тени как раз доходит до поверхности Земли (рис. 27), можно рассмотреть треугольники ASE и BME . (Если бы тень распространялась на значительную площадь земной поверхности, геометрическое решение вопроса было бы неопределенным.) Таким образом, имеем

$$AS/BM = SE/ME$$

и

$$AS = BM \cdot SE/ME = (1,6 \cdot 10^3 \text{ км}) \cdot (1,5 \cdot 10^8 \text{ км}) / (4 \cdot 10^5 \text{ км}) = 0,6 \cdot 10^6 \text{ км.}$$

Диаметр же Солнца тогда равен $1,2 \cdot 10^6 \text{ км}$ (общепринятое значение диаметра Солнца составляет $(1,3920 \pm 0,002) \cdot 10^6 \text{ км}$).

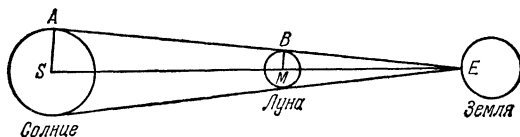


Рис. 27.

9. От глаз второго наблюдателя к вашим глазам свет должен идти по тому же пути, как и от ваших глаз к его глазам. Это объясняется тем, что угол падения равен углу отражения. Поэтому второй наблюдатель может видеть ваши глаза, но при условии, что они освещены (т. е. ваши глаза отражают лучи, идущие от какого-либо источника света).

10. Эту задачу следовало бы решать после изучения раздела 12.4, но лучше решать ее после прохождения материала раздела 12.5, когда учащиеся хорошо осведомлены с законами отражения и построениями хода лучей. Задача иллюстрирует практические применения законов отражения.

а) Когда зеркало поворачивается на $0,06^\circ$, угол падения луча, идущего от источника света, тоже изменяется на $0,06^\circ$. Поскольку же угол отражения должен оставаться равным углу падения, угол отражения должен измениться на ту же величину. Полное отклонение отраженного луча равно изменению угла отражения плюс отклонение нормали. Таким образом, отраженный луч отклоняется на $0,12^\circ$, что составляет $0,12/360 = 3,33 \cdot 10^{-4}$ от 360° .

б) Световой луч отклоняется на $0,12^\circ$, что составляет $0,12/360 = 3,33 \cdot 10^{-4}$ полной окружности. На расстоянии 2 м от зеркала световой луч переместится на $(3,33 \cdot 10^{-4}) \cdot 2 \cdot 2\pi \text{ м} = 0,004 \text{ м} = 4 \text{ мм}$. (Для столь малых углов между длинами дуги и хорды практически нет никакой разницы. Поэтому нет надобности вводить тангенс угла.)

в) Положение источника света не оказывает никакого влияния на чувствительность.

11. а) и б) Видимая длина вертикальной линейки в точности равна удвоенной высоте зеркала независимо от расстояния между линейкой и зеркалом.

Для доказательства этого правила проводим два луча FCE и GDE , падающие на верхний и нижний края зеркала (рис. 28). По второму закону отражения $\angle FCP = \angle ECP$, $\angle EDQ = \angle GDQ$, и, таким образом, треугольники FPC , EPC , EQD и GQD равны, откуда $FP = PE$ и $EQ = QG$. Но $PQ = CD = 40 \text{ см}$, и поскольку точка E расположена против середины зеркала, $PE = EQ$. Отсюда длина FG отрезка линейки, видимого в зеркале, вдвое превышает высоту зеркала и составляет 80 см. Тот же самый результат получился бы, если бы мы построили изображение $A'B'$ всей линейки и затем выяснили, какая его часть видна через «окно» CD .

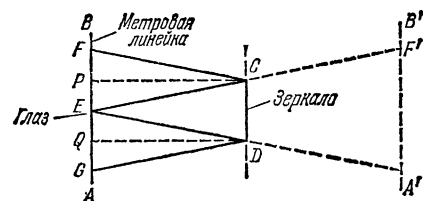


Рис. 28.

калом. Для доказательства этого правила проводим два луча FCE и GDE , падающие на верхний и нижний края зеркала (рис. 28). По второму закону отражения $\angle FCP = \angle ECP$, $\angle EDQ = \angle GDQ$, и, таким образом, треугольники FPC , EPC , EQD и GQD равны, откуда $FP = PE$ и $EQ = QG$. Но $PQ = CD = 40 \text{ см}$, и поскольку точка E расположена против середины зеркала, $PE = EQ$. Отсюда длина FG отрезка линейки, видимого в зеркале, вдвое превышает высоту зеркала и составляет 80 см. Тот же самый результат получился бы, если бы мы построили изображение $A'B'$ всей линейки и затем выяснили, какая его часть видна через «окно» CD .

в) Нет. Предельно допустимое положение нижнего края зеркала всецело определяется ходом лучей от ступней до зеркала и затем к глазам.

г) Наибольшая допустимая высота нижнего края зеркала от пола магазина равна 75 см, что составляет половину роста самого низкорослого покупателя.

Так как изображение всегда вдвое дальше от глаза, чем зеркало, величина видимой части изображения, в силу пропорциональности, всегда вдвое превышает соответствующий размер зеркала.

12. Хотя эту задачу можно решить тригонометрически, ее проще решать графически, сделав точный чертеж с соблюдением масштаба.

Когда плоскость зеркала образует с прямой, соединяющей центры окна и зеркала, угол в 75° , луч, идущий от центра окна в глаз водителя, отражается именно в центре зеркала. При такой ориентации зеркала предполагается, что для обзора по всей ширине окна требуется наименьшая ширина зеркала. (В действительности наимыгоднейший угол чуть больше 75° .) Этому случаю соответствует схема, изображенная на рис. 29.

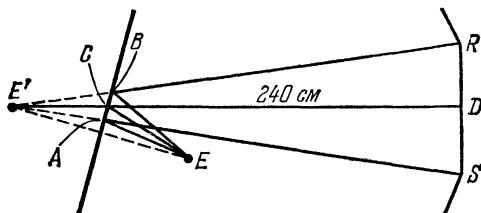


Рис. 29.

Строится изображение E' точки E и к краям заднего окна проводятся прямые $E'S$ и $E'R$. Водитель увидит окно во всю ширину при условии, что ширина зеркала вдвое превышает AC или BC , где A и B — точки пересечения прямых $E'S$ и $E'R$ с плоскостью зеркала. Измерение по схеме, сделанной в масштабе, дает для ширины зеркала 20 см.

Следует заметить, что при решении этой задачи было использовано изображение глаза водителя, хотя, в действительности, речь шла об изображении заднего окна в зеркале. То, что оба метода дают одинаковый результат, обусловлено обратимостью хода лучей и независимостью законов отражения от направления лучей. Эта равноценность методов на первый взгляд не вполне очевидна и потому можно предпочесть более громоздкий метод построения изображения заднего окна в плоском зеркале.

13. Задача может решаться после усвоения раздела 12.5.

а) Для нахождения наименьшей допустимой вертикальной ширины верхнего отверстия нужно построить изображение человека в нижнем зеркале с целью

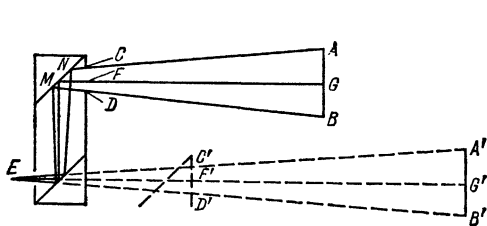


Рис. 30.

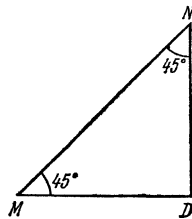


Рис. 31.

получения необходимых подобных треугольников. На схеме рис. 30 вертикальная ширина отверстия изображена в виде отрезка CD , выражающего диаметр конуса лучей, идущих от человека (AB) к глазу (E). В пучке мнимых лучей $C'D'=CD$ и $A'B'=AB$. Поскольку отрезки $C'D'$ и $A'B'$ вертикальны и, следовательно,

параллельны, треугольники $EC'D'$ и $EA'B'$ подобны, откуда $C'D'/A'B' = EF'/EG'$. Дано, что $AB = 180$ см; EF' приблизительно равно длине перископа, т. е. 120 см; EG' равно длине перископа плюс расстояние до человека, т. е. всего 1620 см. Таким образом,

$$CD = C'D' = 180 \cdot 120 / 1620 = 13,3 \text{ см.}$$

б) Ввиду того, что вертикальный диаметр конуса лучей при падении на зеркало приблизительно равен CD , минимальная ширина верхнего зеркала может быть найдена из приведенного на рис. 31 треугольника. Как нам теперь известно, $ND = 13,3$ см $= MD$, так как треугольник равнобедренный. Минимальная ширина зеркала MN определяется по теореме Пифагора:

$$MN^2 = ND^2 + MD^2, \quad MN = 13,3 \cdot \sqrt{2} = 18,8 \text{ см.}$$

17. а) Если переместить лампочку в положение ее изображения (см. рис. 12.23), свет будет распространяться по тем же самым лучам, показанным на схеме, но в обратном направлении. Второй закон отражения справедлив вне зависимости от направления распространения света. Поэтому действительное изображение лампочки появится в том месте, где раньше была сама лампочка.

б) Вообще, если предмет перемещен в положение его прежнего действительного изображения, это последнее образуется в прежнем положении предмета. (Этого бы не произошло, если бы предмет был перемещен в положение его мнимого изображения.)

$$19. H_i/H_0 = f/s_0, \quad H_i/4 \text{ см} = 20 \text{ см}/15 \text{ см}, \quad H_i = 16/3 = 5,3 \text{ см.}$$

Хотя числовой ответ и однозначен, здесь имеется неоднозначность в отношении расположения изображения. Если гвоздь сдвинут на 15 см относительно главного фокуса в направлении от зеркала, изображение будет действительным и обратным. Если же он сдвинут на 15 см по направлению к зеркалу, т. е. находится в 5 см от зеркала, изображение будет мнимым и прямым.

20. Эта задача хороша для иллюстрации легкости вывода конкретных формул из геометрических соображений.

В данном случае известно, что 5-сантиметровое изображение находится в 30 см от полюса зеркала (рис. 32). Известно также, что луч, идущий к концу изображения через фокус, падает на зеркало параллельно его оси, в 10 см от нее, так как

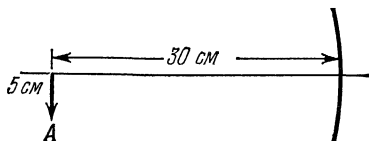


Рис. 32.

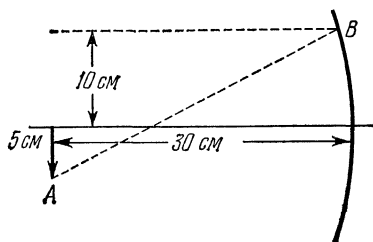


Рис. 33.

предмет имеет высоту 10 см (рис. 33). Таким образом, можно найти положение точки падения B .

Прямая AB пересекает ось на расстоянии f от зеркала. Из подобия треугольников f равно 20 см:

$$10/f = 5/(30-f), \quad 60-2f=f, \quad f=20 \text{ см.}$$

Эту задачу можно было бы решать и по готовой формуле. Поскольку $H_i/H_0 = s_i/f$ и $s_i+f=30$, имеем $(H_i/H_0)f+f=30$ см, откуда $f=30 \text{ см}/(1+H_i/H_0) = 30 \text{ см}/1,5 = 20 \text{ см.}$

Геометрические рассуждения более поучительны и легче, чем алгебраические. Если учащийся решает задачу у доски, необходимо обеспечить, чтобы последнее утверждение стало понятным и всему классу.

21. а) Сначала многие из учащихся поместят изображение параллельно оси зеркала. Положение изображения, полученное построением по вопросу п. б), будет для них неожиданностью.

б) См. рис. 34.

в) При удалении хвостового конца стрелки от оси вверх хвостовой конец изображения сместится вниз при фиксированном острей; в общем случае углы поворота стрелки и ее изображения не будут одинаковыми.

г) Когда стрелка указывает на главный фокус, ее изображение направлено параллельно оси зеркала.

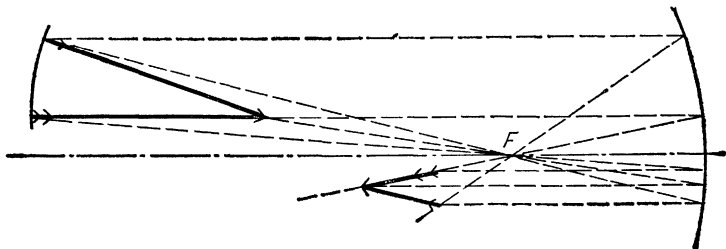


Рис. 34.

д) Если предмет находится на главной оси, то и изображение находится на ней же. Расстояние изображения от фокуса может быть определено по формуле $s_0 s_i = f^2$ или путем проведения лучей, не параллельных оси и не проходящих через главный фокус. Изображением будет проекция на главную ось того изображения, которое рассматривалось в ответе п. б). Длина этой проекции 2,1 см.

22. $H_i/H_0 = f/s_0$, $H_i = H_0 f/s_0$, $H_i = (1,4 \cdot 10^9 \text{ м}) \cdot 18 \text{ м} / (1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}) = 0,17 \text{ м} = 17 \text{ см}$.

23. Эту задачу не следует решать до того, как будет понятно содержание раздела 12.6. Лучше всего ее решение обсудить в классе. Можно спросить учащихся, что происходит с фокусным расстоянием по мере приближения параболоида к плоскости. В конце концов параболоид настолько приблизится к плоскости, что различие между параболическим и плоским зеркалами исчезнет. Отсюда следует, что фокусное расстояние плоского зеркала бесконечно. Строго говоря, фокусное расстояние плоского зеркала неопределенно. Его можно выразить только как предел, к которому стремится фокусное расстояние параболического зеркала, когда параболоид приближается к плоскости.

24. Решение этой задачи показывает, что гауссова форма уравнения тонкой линзы вытекает непосредственно из формулы Ньютона, применяемой в этом курсе:

$$s_0 s_i = f^2, (D_0 - f)(D_i - f) = f^2, D_0 D_i - f D_i - f D_0 = 0.$$

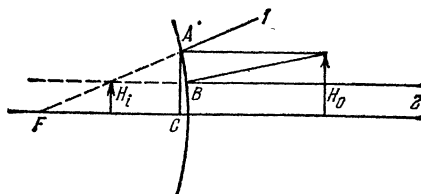
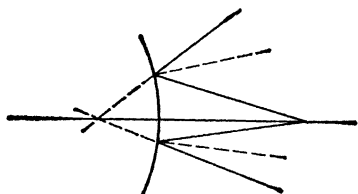
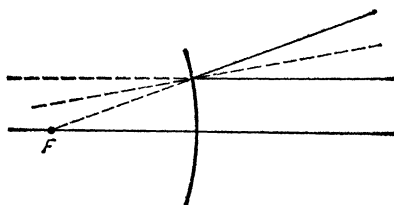
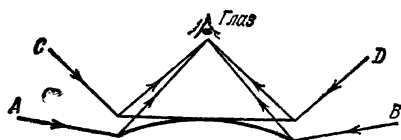
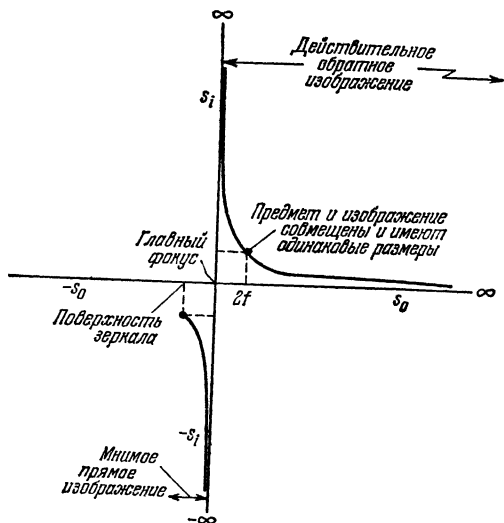
Разделив все члены на $D_0 D_i f$, получаем

$$1/f - 1/D_0 - 1/D_i = 0, \quad 1/D_0 + 1/D_i = 1/f.$$

27. Решение этой задачи, связанное с понятием мнимого изображения, заставляет учащихся поразмыслить над свойствами вогнутого зеркала.

Можно сразу написать $s_0 s_i = f^2$. Если предмет и его изображение совмещены, то, очевидно, $s_0 = s_i$, откуда $s_i = s_0 = f$. Однако для учащихся, разбирающихся в алгебре, должно быть ясно, что уравнение $s_0 s_i = f^2$ имеет и другое решение, а именно $s_i = s_0 = -f$. Не прибегая к правилу знаков при решении этой задачи, следует просто указать, что предмет может быть помещен на фокусном расстоянии от главного фокуса со стороны зеркала, т. е. на самом зеркале. Тогда изображение будет мнимым и расположится тоже на самом зеркале. Полезно иметь вогнутое зеркало, чтобы подтвердить этот вывод экспериментально.

28. Когда предмет находится в бесконечности, его изображение расположено в главном фокусе. По мере приближения предмета изображение удаляется от главного фокуса навстречу предмету, постепенно увеличиваясь в размерах. Оно действительное и обратное. Предмет и изображение встречаются на расстоянии f от главного фокуса (т. е. на расстоянии $2f$ от зеркала), где они принимают одинаковый



размер. По мере того как предмет продолжает двигаться дальше к главному фокусу, изображение продолжает свое движение от зеркала за двойным фокусным расстоянием, непрерывно увеличиваясь в размерах. Когда предмет достигает главного фокуса, изображение уходит в бесконечность. Когда предмет продолжает приближаться к зеркалу, двигаясь от главного фокуса, изображение приближается к зеркалу сзади. Оно при этом мнимое и прямое. Когда предмет достигает зеркала, изображение тоже его достигает и сравнивается в размерах с предметом.

График на рис. 35 показывает положение изображения в зависимости от положения предмета. За начало координат принят главный фокус. Положительные расстояния предмета отсчитываются от главного фокуса наружу, а отрицательные — от главного фокуса в сторону зеркала.

29. Эта задача требует от учащихся воспроизведения для выпуклого зеркала значительной части выводов, сделанных в тексте Учебника для вогнутого зеркала. Она может быть задана лишь после усвоения материала всей главы. В последующей части курса выпуклые зеркала не рассматриваются вовсе, так что при нехватке времени нет никакой надобности давать эту задачу. С другой стороны, она может служить критерием понимания материала. Если учащийся способен решить эту задачу, можно быть уверенным, что им поняты основы всей главы.

Ни в коем случае не следует вводить здесь правило знаков.

а) Как это ясно из схемы на рис. 36, выпуклое зеркало посылает в глаз лучи, падающие в пределах конуса AB , тогда как плоское зеркало отражает в глаз лучи, падающие лишь в пределах конуса CD . Таким образом, выпуклое зеркало дает обзор большей площади, чем плоское.

б) Практически единственный способ выполнить построение рис. 37 заключается в том, чтобы рассмотреть лучи, падающие на зеркало параллельно оси с *вогнутой* стороны. С этой стороны углы, образуемые с нормалью падающим и отраженным лучами, — те же самые, что и с выпуклой стороны. Это позволяет использовать главный фокус вогнутой поверхности для построения хода лучей, отражаемых выпуклой стороной. Точка, из которой они кажутся выходящими, называется мнимым фокусом, так как лучи в действительности через него не проходят.

в) Чтобы показать расхождение лучей как бы из мнимого изображения, расположенного на продолжении оси за зеркалом, достаточно построения с приближенным соблюдением закона отражения (рис. 38).

г) Построив главные лучи (рис. 39), мы убеждаемся, что вершина изображения должна во всех случаях лежать на прямой FA , так что H_i всегда меньше отрезка AC . Но, поскольку $AC = H_0$, величина изображения всегда меньше величины предмета. Изображение является прямым, так как луч 2 (параллельный оси) проходит всегда выше оси, если предмет находится выше нее.

д) Из схемы на рис. 39 видно, что при приближении предмета к зеркалу точка B , в которой луч 2 падает на зеркало, приближается к точке A . Поскольку же расстояние от точки B до оси равно высоте изображения, эта высота растет. Но для этого изображение должно приближаться к зеркалу, так как вершина изображения должна оставаться на прямой AF .

е) По мере приближения предмета к зеркалу изображение тоже к нему приближается. Поэтому расстояние изображения от зеркала должно быть наибольшим, когда предмет максимально удален. Но тогда лучи, падающие от предмета на зеркало, почти параллельны оси, и изображение должно находиться почти в главном фокусе. Таким образом, изображение не может находиться дальше главного фокуса.

30. Назначение этой задачи — подвести учащихся к качественному представлению о сферической aberrации. Задаче можно придать и количественный характер, если включить в нее построение схемы хода лучей.

Сферическая поверхность загибается к главной оси сильнее, чем параболическая. Это увеличивает угол падения и, следовательно, угол отражения, так что отраженные лучи пересекают главную ось между фокусом F и зеркалом.

Краткое содержание главы 13

Описываются экспериментальные поиски простых законов, способных охарактеризовать поведение света при переходе из воздуха в другие среды. Первый из установленных при этом законов совпадает с первым законом отражения: преломленный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к поверхности, восстановленной в точке падения. Второй закон представляет собой замечательное обобщение всего того, что для своего описания потребовало бы целых томов, заполненных графиками, если бы этот закон не был найден. Этот закон заключается в том, что отношение синусов углов падения и преломления есть постоянная величина, имеющая для каждого вещества определенное значение и называемая показателем преломления этого вещества. Все данные, необходимые для установления этого закона, были налицо еще за 1000 лет до его открытия. При изменении направления распространения света на обратное он распространяется назад по тем же лучам; иными словами, ход лучей обратим. Когда свет распространяется из одного вещества в другое, причем ни одно из них не является воздухом, преломление зависит от отношения показателей преломления обоих веществ. Рассматривается также полное внутреннее отражение и разложение белого света на его цветные составляющие. Показано, что последние два явления легче всего наблюдать с помощью призм.

Подобно тому как зеркалам может быть придана форма, позволяющая собирать лучи посредством отражения, большинство прозрачных веществ способно при соответствующей форме тела собирать лучи посредством преломления. После использования представления о наборе усеченных призм как средства достижения этой цели, делается переход сначала к плавно искривленной поверхности цилиндрической линзы, а затем к сферическим линзам. Используется понятие фокусного расстояния как средства построения изображений и определения увеличения.

Открытие Снеллиусом второго закона преломления служит отличным примером того, как поведение чего-либо (в данном случае света) может быть резюмировано в виде эмпирического закона, согласующегося с опытными данными об этом поведении. Примечательно, что закон Снеллиуса не основывается ни на какой модели света. Никто не ставил вопроса: «Что такое свет?». Ставился лишь вопрос: «Какому закону подчиняется поведение света?». Позже в этом курсе будут рассмотрены две различные модели и будет обсуждена их пригодность в качестве моделей света. Обе эти модели согласуются с законом, открытым Снеллиусом. Вообще, одно из обязательных испытаний всякой модели света должно заключаться в выяснении ее согласия с законом Снеллиуса.

Для иллюстрации тех трудностей, с которыми сталкиваются инженеры и ученые, когда огромное количество накопленных данных о поведении чего-либо не может быть сведено к простому закону, достаньте и продемонстрируйте классу справочник по радиолампам или транзисторам. Разъясните классу, что закон Снеллиуса с приложением нескольких страниц, содержащих таблицы показателей преломления различных веществ, равноценен толстому справочнику по радиолампам.

Закон Снеллиуса, полное внутреннее отражение и дисперсия света являются ключевыми вопросами для дальнейшего развития курса. Решение задач и лабораторные работы должны закреплять и углублять знакомство с этими вопросами.

План изучения главы 13

Табл. 5 содержит возможные варианты распределения времени при изучении данной главы, согласованные с общим планом проработки части II, приведенным во Введении на стр. 194.

ТАБЛИЦА 5

Глава 13	9-недельный план изучения части II			14-недельный план изучения части II		
Разделы	В классе, часы	В лабораторий, часы	Опыты	В классе, часы	В лабораторий, часы	Опыты
13.1—13.3	1	1	II.3	2	2	II.3
13.4—13.6	1	0	—	2	0	—
13.7, 13.8	1	0	—	1	0	—
13.9—13.11	1	1	II.4	2	2	II.4

Дополнительные материалы к главе 13

Лаборатория. Опыт II.3 (*Преломление*) должен выполняться до обсуждения содержания раздела 13.3.

Опыт II.4 (*Изображения, образованные с помощью собирающей линзы*) сам по себе представляет интерес, но он довольно близок к опыту II.2 и при нехватке времени может быть безболезненно пропущен, если учащиеся выполняли опыт II.2.

Домашние, классные и лабораторные задания. Многие из задач, которые, на первый взгляд, требуют тригонометрических выкладок, могут решаться графически. Графические решения поучительны, но, поскольку они трудоемки, следует остерегаться задавать сразу много таких задач. Ответы, решения и таблица классификации задач по трудности приведены на стр. 258.

13.1. Преломление

Ц е л ь. Дать общее представление о преломлении света и первом законе преломления.

С о д е р ж а н и е. Падающий и преломленный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к поверхности, восстановленной в точке преломления.

Методические указания. При всей своей важности первый закон преломления не требует большой затраты классного времени. Есть смысл затратить несколько секунд на указание, что подход к изучению преломления света будет аналогичен подходу к вопросам отражения.

Прежде чем приступать к первому закону преломления, нужно разъяснить, что будет сделана попытка резюмировать явления преломления в виде немногих законов, совершенно так же, как явления отражения были резюмированы в виде двух законов отражения. Следует повторно подчеркнуть при этом, что два закона отражения полностью выражают все поведение света при отражении. Образование, положение и величина изображения в любом зеркале могут быть полностью объяснены с помощью двух законов отражения. Нужно напомнить учащимся, что, как бы сложна ни была задача, посвященная зеркалам, никогда не возникает никаких сомнений относительно направления любого луча после отражения. Аналогичным образом, если имеется возможность установить законы, описывающие преломление отдельного луча, мы приобретаем средство сводить к простейшим элементам действие сложных преломляющих систем (таких, как линзы и призмы), в которых имеет место преломление многих лучей.



Рис. 40.

Необходимо добиться того, чтобы учащиеся с самого начала отсчитывали углы падения и преломления от нормали. Это можно проверить, изобразив на доске схему, аналогичную рис. 40, и предложив учащимся приблизительно оценить величину угла падения. Если последуют ответы вроде «около 80° », то соответствующим учащимся придется пересмотреть свои взгляды.

Не следует упоминать об исключениях из правила, выражаемого первым законом преломления.

Если учащийся спросит об «особых» преломляющих веществах, можно пояснить, что лишь немногие вещества нарушают первый закон преломления; наша цель здесь — начать изучение явлений преломления в том виде, в каком они происходят почти во всех веществах. Исключения слишком редки и сложны, чтобы приводить их как примеры в начальной стадии изучения вопросов преломления.

На данном этапе даже наиболее активным учащимся, обращающимся к преподавателю после занятий, достаточно указать, что кристаллы, составляющие исключение из первого закона преломления, имеют особую «оптическую» ось. При прохождении света через такие кристаллы преломление определяется не только направлением относительно нормали, но и направлением относительно оптической оси.

Учащиеся, слышавшие кое-что о поляризации света, могли прослышать и о том, что падающий луч иногда разделяется на два преломленных луча. Хотя это и верно, но мы опять-таки интересуемся здесь типичными случаями.

13.2. Измерение углов при преломлении

Ц е л ь. Показать характер и объем экспериментальных данных, которыми необходимо было бы располагать, чтобы иметь возможность предсказывать результаты преломления, если бы законы преломления не были известны. Заложить тем самым основы для достойной оценки огромного интеллектуального достижения, заключающегося в открытии «закона», объединяющего эти данные.

Содержание. а) Наши данные о преломлении почерпнуты из опыта.

б) Совокупность данных о преломлении носит явно закономерный характер, но не описывается никакой алгебраической функцией.

Методические указания. При прохождении материала этого раздела не следует спешить. Учащимся легче достигнуть необходимого качественного понимания сущности преломления до того, как они ознакомятся с законом Снеллиуса. Они должны изучать экспериментальные данные до тех пор, пока не научатся резюмировать их в виде нескольких простых фактов, находящих объяснение в законах преломления. Это даст им ценные навыки в обработке данных с помощью графиков и таблиц.

Затрата времени на этот раздел должна зависеть от того, насколько быстро учащиеся осваивают технику обработки данных: обобщение данных, представление их в виде графиков, экстраполяция и т. д. Рассматриваемый материал очень подходит для этой цели. Позже подобные возможности уже не представятся, так как после ознакомления с законом Снеллиуса интересы учащихся будут поглощены оптическими приборами, а не просто вопросами преломления.

Полезно начинать изучение вопросов преломления с лабораторной работы. Предварительное наблюдение преломления, измерение углов и построение графиков необходимы для сознательного чтения данного раздела. До обсуждения раздела 13.3 учащимся должен быть проделан опыт II.3.

Далее, прежде чем переходить к подробностям, необходимо удостовериться, что учащиеся получили общие представления о преломлении света. В тексте Учебника имеются три утверждения описательного характера, относящихся к рис. 13.2. После разбора этих утверждений следует дополнить их вопросами. Например, какой получился бы результат, если бы угол падения был меньше показанных на рисунке? В частности, если бы он был равен нулю?

Предположим, что четыре фотоснимка на рис. 13.2 представляют собой четыре кадра кинофильма, снятого при равномерном вращении падающего луча от нулевого угла падения до угла падения в 90° . Какой луч вращался быстрее: падающий или преломленный? При распространении света из воздуха (или вакуума) в стекло какой угол больше: угол падения или угол преломления?

Следующий важный этап в развитии темы заключается в исследовании (с помощью графиков и таблиц) изменений угла преломления при изменении угла падения света при переходе из воздуха в стекло. Чтобы учащиеся приобрели практические навыки в интерполяции и экстраполяции в нужном, по вашему мнению, объеме, можно воспользоваться конкретными экспериментальными данными, полученными в опыте II.3. Можно спросить учащихся, имеет ли смысл экстраполировать кривую дальше угла падения в 90° .

Если остается время на углубление сведений о преломлении и накопление навыков в построении графиков, предложите учащимся построить график зависимости угла отклонения (наименьшего угла, на который должно было бы отклониться продолжение падающего луча, чтобы совпасть с преломленным лучом) от угла падения (рис. 41).

Следующий вопрос, на котором надо заострить внимание в этом разделе, заключается в том, что каждый раз, когда меняется хотя бы одна из сред, участвующих в преломлении света, требуется совершенно новая таблица (или новый график). Более того, на первый взгляд можно было бы предполагать необходимость двух таблиц (на каждую пару сред: соответственно тому, какая из них содержит

падающий луч). (Разумеется, это предположение сразу отпадает, как только вспоминают об обратимости хода лучей, устраняющей надобность во второй таблице.)

Следует избегать обсуждения вопроса о зависимости преломления от цвета. Если кто-либо из учащихся поднимет этот вопрос, нужно ответить, что лучи различных цветов ведут себя в качественном отношении одинаково; существуют лишь незначительные количественные различия, зависящие от цвета, которые будут рассмотрены позже.

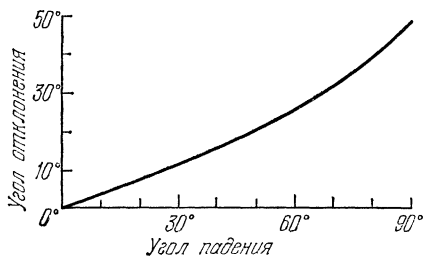


Рис. 41.

Кажущаяся относительная яркость отраженных лучей на рис. 13.2 непригодна даже для полук количественного суждения о коэффициентах отражения. Сравнение фотоснимков не дает представления об относительных яркостях, поскольку отдельные снимки были, вероятно, проявлены по-разному с целью обеспечения наибольшей отчет-

ливости в каждом случае. Коэффициент отражения (т. е. отражаемая доля интенсивности падающего света) довольно мал вплоть до значительных углов падения (около 50°) и достигает единицы лишь при 90° . При угле падения, равном нулю, т. е. при нормальном падении, коэффициент отражения равен $[(n-1)/(n+1)]^2$. Для стекла это составляет 0,04, а для воды 0,02.



Рис. 42.

Полезно продемонстрировать учащимся следующий эффект. Монета, лежащая на дне выпарной чашки, невидима для сидящих учеников (рис. 42, а). Однако после наполнения чашки водой монета становится видимой (рис. 42, б).

13.3. Показатель преломления. Закон Снеллиуса

13.4. Абсолютный показатель преломления

Цель. Знакомство с законом преломления Снеллиуса.

Содержание. Угол преломления r не является линейной функцией угла падения i , но для света, проходящего из воздуха в данную среду, существует все же простая зависимость: отношение полухорд, стягивающих угол падения и угол преломления, есть величина постоянная. На языке тригонометрии это означает, что для света, идущего из воздуха в данную среду, отношение $\sin i / \sin r$ постоянно. Эта постоянная величина называется показателем преломления данной среды относительно воздуха. Абсолютным показателем преломления называется отношение $\sin i / \sin r$ для света, идущего в данную среду из вакуума.

Методические указания. Рассматриваемый материал важен главным образом потому, что он вводит закон Снеллиуса. Его значение, однако, заключается также в том, что он иллюстрирует обычные в науке поиски закономерностей, способных обобщать экспериментальные данные. При выполнении опыта II.3, включая графическую обработку данных, до задания на дом раздела 13.3 учащиеся подойдут к самостоятельному открытию закона Снеллиуса настолько близко, насколько это позволит отведенное время. Тогда изучение этого раздела окажет организующее влияние на ход их мыслей и укажет соотношения, которые они могли просмотреть в ходе опыта.

Даже если учащиеся хорошо знакомы с синусами, закон Снеллиуса лучше сначала вводить с помощью полухорд. Тот факт, что полухорда AC при любом угле падения в полтора раза больше полухорды FD (рис. 43, а), запоминается учащимися гораздо лучше, чем простое утверждение, что для воздуха и стекла $\sin i/\sin r=1,5$.

Если показатели преломления известны, ход любого преломленного луча может быть установлен с помощью рисунка, выполненного в масштабе (рис. 43, а). Ни транспортиров, ни тригонометрических таблиц не требуется. Некоторые учащиеся, однако, могут не догадаться, как можно легко построить FD , если известно, что $FD=AC/1,5$. Требуется, чтобы они поняли следующий способ построения (рис. 43, б): на диаметре окружности, проходящем по границе раздела «стекло — воздух», откладывается отрезок, равный FD ; в конце этого отрезка восставляется перпендикуляр к поверхности; точка пересечения этого перпендикуляра с окружностью и определяет положение точки D .

С самого начала надо удостовериться (и проверять позже по мере надобности), что учащиеся ясно, какое именно отношение полухорд входит в расчет. Путаницы можно избежать, если сначала затратить некоторое время на доказательство (с помощью подобия треугольников) того, что отношение полухорд не зависит от радиуса окружности. (Точность результата графического метода возрастает с ростом радиуса!). После того как будет понято, что отношение полухорд равно показателю преломления, некоторые учащиеся будут ошибочно отклонять преломленный луч в неверном направлении (т. е. они будут умножать, а не делить полухорду угла падения на показатель преломления). Следует рекомендовать учащимся прежде всего решить, в какую именно сторону луч должен отклоняться.

Учащимся следует задать несколько задач для графического решения дома, за партами и в порядке ответа на вопросы в классе. Задачи нужно формулировать так, чтобы учащиеся решали их без таблицы синусов и без транспортира. (Подготовьте циркули или миллиметровую бумагу с заранее начерченными окружностями.)

Хотя и полезно делать упор на формулировку закона Снеллиуса через отношение полухорд, однако не следует игнорировать и его выражение через синусы.

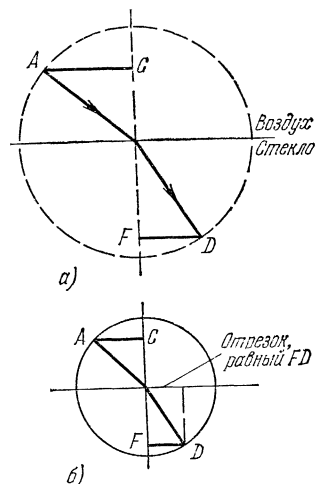


Рис. 43.

Необходимо повторить определение понятия синуса угла и удостовериться, что всем учащимся ясен смысл рис. 13.6. Однако нет надобности натаскивать учащихся как в этом определении, так и в пользовании таблицей синусов, в дальнейшем у них не будет недостатка в пользовании синусами углов.

13.5. Прохождение света из стекла (или воды) в воздух. Обратимость хода лучей

Ц е л ь. Показать, что путь распространения света в любом направлении через поверхность раздела «стекло — воздух» определяется общей формой уравнения, выражающего закон Снеллиуса:

$$\sin \theta_{\text{возд}} = n_{\text{стек}} \sin \theta_{\text{стек}}.$$

Методические указания. Основанием для этого заключения служит опыт, подобный изображенному на рис. 13.7. Обсуждение в классе можно начать с этого рисунка, сопроводив его вопросом об обратимости хода лучей в связи с опытом 11.3, где используется зеркало для отражения преломленного луча назад по его собственному пути. Вывод уравнения в общем виде должен вытекать из экспериментального наблюдения обратимости хода лучей при переходе через поверхность раздела двух веществ. Учащиеся должны понять две стороны вопроса об обратимости лучей: свет, распространяющийся назад, идет по своему прежнему пути, и луч, прошедший через плоскопараллельную стеклянную пластинку, выходит по направлению, параллельному падающему лучу.

Почти наверняка учащиеся поднимут следующий вопрос: если рассмотреть последний преломленный луч на рис. 13.7 и направить его назад, то получим прежние преломленные лучи, но отраженные лучи будут другими. Можно ответить,

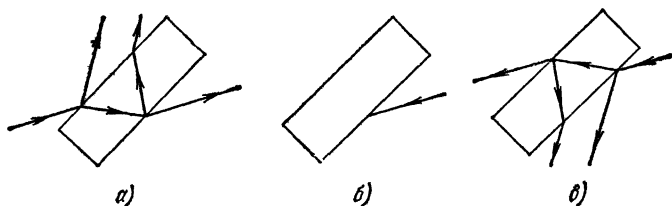


Рис. 44.

что, говоря об обратимости хода лучей, мы не имеем в виду, что *весь* распространяющийся назад свет должен идти по прежнему пути. Мы имеем в виду только то, что при обращении проходящего света *часть* его пойдет по пути падающего света; никакие лучи не пойдут в непосредственной близости от падающего луча или под весьма малым углом к нему.

Хорошим пояснением обратимости хода лучей будет прослеживание обратного хода лучей на рис. 13.7. Начинаем с падающего справа луча и прослеживаем его ход по пути прежнего проходящего луча. Учащимся предлагается вычертить все образующиеся при этом лучи. Они обнаружат, что имеется четыре луча (рис. 44). В дополнение к падающему и прошедшему лучам образуется еще два отраженных луча: по одному на каждой отражающей поверхности. (Обратите внимание, что рис. 44, в выглядит как перевернутый рис. 44, а.) Необходимо удостовериться, что учащимся ясно то обстоятельство, что весь результат, вытекающий в данном

случае из обратимости хода лучей, сводится к тому, что преломленный и прошедший лучи на рис. 44, в совпадают с преломленным и падающим лучами на рис. 44, г. Рассмотренная здесь ограниченная обратимость ничего не говорит ни об относительной яркости лучей, ни об отраженных лучах.

13.6. Прохождение света из стекла в воду

Ц е л ь. Показать, каким образом можно предсказать преломление света при его переходе из одного вещества в другое, если ни одно из них не является воздухом.

С о д е р ж а н и е. а) Если свет падает из среды 1 под углом θ_1 и преломляется в среде 2 под углом (к нормали) θ_2 , то

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2.$$

б) Отношение n_2/n_1 называется относительным показателем преломления и обозначается n_{12} .

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. При всей важности материал этого раздела не требует пространного объяснения в классе за исключением приво-димого обсуждения задач 16, 17 и 18, основанных на выводах этого раздела.

Довод о применимости относительного показателя преломления, основанный на представлении о воображаемом слое воздуха, разделяющем две среды (см. рис. 13.10) базируется лишь на правдоподобности и не претендует на строгость. (Впрочем, такого рода выводы, основанные на соображениях правдоподобности, весьма характерны для физики. Это — обычный путь подхода к предположениям, которые затем подлежат проверке.) Насколько мы можем судить до экспериментальной проверки, устранение слоя воздуха в случае, изображенном на рис. 13.10, могло бы привести к значительным изменениям. Например, нам известны случаи глубокого взаимодействия соприкасающихся веществ (спирта и пластмассы). Поэтому вполне можно себе представить появление тончайшего поверхностного слоя, исключающего применимость понятия относительного показателя преломления. Разумеется, появление тончайшего слоя не должно вызвать существенных изменений, но учащиеся должны отдавать себе отчет в том, что приведенные рассуждения лишь подсказывают заключение, но не устанавливают факта.

Очень часто учащиеся недооценивают тех упрощений, которые достигаются благодаря использованию относительного показателя преломления, если даже им известно, что именно он собой представляет и как им пользоваться. Необходимо добиться понимания того, что без этого полезного понятия потребовалась бы длиннейшая таблица, содержащая отношения синусов углов падения и преломления для всех мыслимых комбинаций соприкасающихся веществ. По установившейся традиции мы пользуемся относительными показателями преломления, превышающими единицу. Если показатель преломления среды 2 относительно среды 1 n_{12} оказывается меньше единицы, то мы обычно пользуемся обратной величиной n_{21} , т. е. показателем преломления среды 1 относительно среды 2, имея в виду, что $n_{21} = n_1/n_2 = 1/n_{12}$. Не следует тренировать учащихся в употреблении обозначений n_{12} и n_{21} . Вполне достаточно, чтобы они помнили, что луч света всегда приближается к нормали в той среде, показатель преломления которой больше.

Запоминание смысла относительного показателя преломления с помощью формулы $\sin r = n_{12} \sin i$ почти всегда приводит учащихся к путанице. Следует подчеркивать удобство симметричной формулы $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$. Надо добиваться,

чтобы учащиеся исходили из этой формулы для решения вопроса о том, какой из величин, $n_1 \sin \theta_1$ или $n_2 \sin \theta_2$, надлежит пользоваться в той или иной задаче.

Не исключена возможность, что класс проявит интерес к ходу лучей в стопе плоскопараллельных слоев материалов с различными показателями преломления, как показано на рис. 45. Необходимо отметить следующее.

1. Падающий и выходящий из системы лучи остаются параллельными.

2. При заданном угле падения на систему θ угол, под которым свет проходит, скажем, в алмазе, не зависит от предшествующих материалов. Если бы падающий

свет попадал из воздуха прямо в алмаз, луч в алмазе был бы параллелен лучу, показанному в этой среде на рис. 45.

3. Если изменить порядок расположения пластин в стопе, угол прохождения луча в каждой среде останется прежним.

Представив себе совокупность многих тонких слоев со слабо изменяющимися показателями преломления, мы получим хорошую модель изменения показателя преломления земной атмосферы (см. задачу 14).

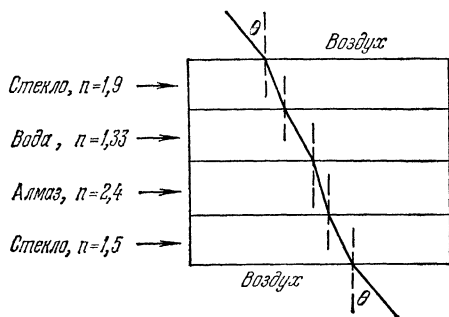


Рис. 45.

Поскольку для любой пары сред справедливо равенство $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, постольку и для трех сред имеет место соотношение $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 = n_3 \sin \theta_3$; аналогичная цепь равенств справедлива и для любого числа сред. Величина $n \sin \theta$ постоянна (инвариантна) для всех соприкасающихся плоскопараллельных слоев. Если известны угол и показатель преломления для одного слоя (в приведенном примере — для воздуха), то тем самым известно произведение $n \sin \theta$ и для всех остальных слоев. Если для какого-либо слоя известен показатель преломления n , то можно найти и угол прохождения света в этом слое. (При этом надо помнить, что все сказанное справедливо, когда границы раздела слоев являются параллельными плоскостями.)

13.7. Полное внутреннее отражение

Ц е л ь. Показать, при каких условиях свет полностью отражается.

С о д е р ж а н и е. Свет, падающий из среды с большим показателем преломления на среду с меньшим значением этой величины, полностью отражается, если угол падения превышает определенную величину.

Полное внутреннее отражение происходит при всех углах падения, превышающих «предельный угол полного внутреннего отражения», или «критический угол», определяемый равенством

$$\sin \theta_{\text{пр}} = n_2/n_1.$$

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Данной темой заканчивается обсуждение того, что происходит со светом на границе раздела двух сред. Учащиеся, вероятно, уже раньше успели поднять вопрос о внутреннем отражении. Предлагаемая ниже разработка темы содержит «полное» рассмотрение, которое можно использовать целиком или сократить в зависимости от того, насколько класс углублялся в рассмотрение данного вопроса.

Изображая последовательно все большие и большие углы падения света, например, из воздуха на стекло (рис. 46), естественно воспользоваться принципом обратимости и поставить вопрос о случае 5 на рис. 47, не изображенном на рис. 46.

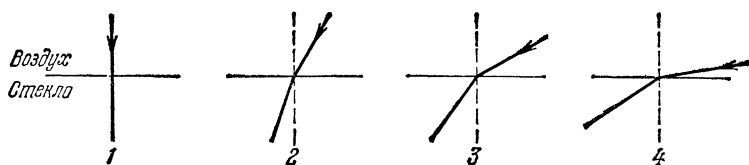


Рис. 46.

При виде схем изображенного здесь типа учащиеся обычно сами делают большинство нужных заключений о полном внутреннем отражении. В частности, им должно быть ясно, что если бы свет все же преломлялся в воздух в случае 5, закон преломления был бы нарушен. (В воздухе лучу некуда больше идти!) Из этого учащиеся заключают, что единственная возможность полного внутреннего отражения

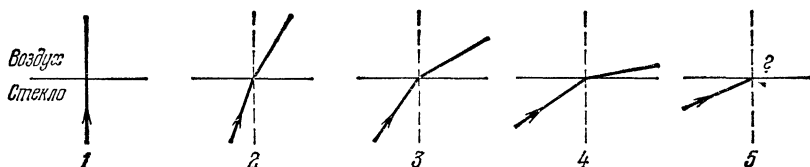


Рис. 47.

появляется тогда, когда свет «пытается» выйти из среды с большим в среду с меньшим показателем преломления.

Выполняя масштабные построения для нахождения угла преломления, учащиеся испытывают затруднение при попытке определить таким способом графически предельный угол. В этом случае применяются представленные на рис. 48 этапы построений.

Если все же кто-либо будет поставлен в тупик или если имеются опасения на этот счет, предложите учащимся определить графически угол преломления в стекле при угле падения в воздухе, скажем, в 88° .

Для объяснения понятия предельного угла полного внутреннего отражения можно воспользоваться принципом обратимости хода лучей. Предыдущие рассуждения уже показали (или могут показать), что для луча, падающего из воздуха на стекло ($n=1,5$), угол преломления не может превышать $41,8^\circ$. Таким образом, в любой точке поверхности стекла любой падающий луч может преломиться в стекле только внутри конуса с углом при вершине в $83,6^\circ$. Основываясь на принципе обратимости, учащиеся должны понять: чтобы выйти из стекла в воздух через ту же точку, луч должен проходить в стекле внутри того же конуса.

В качестве «ловушки» можно потребовать от класса быстрого ответа на вопрос: «Чему равен угол преломления в воздухе при угле падения в стекле, превышающем предельный угол (рис. 49)?». Если значительная часть учащихся будет обдумывать ответ более одной минуты, значит, суть дела не понята.

У учащихся не должно создаться впечатления, что весь падающий свет преломляется до тех пор, пока вдруг весь он не начинает отражаться, как только

достигнут предельный угол. При падении света на стекло из воздуха (рис. 50) доля отраженного света зависит от угла падения в воздухе $\theta_{\text{возд}}$. При $\theta_{\text{возд}}=0^\circ$ доля отраженного света составляет

$$[(n-1)/(n+1)]^2.$$

По мере того как $\theta_{\text{возд}}$ растет, эта доля остается приблизительно постоянной до значений $\theta_{\text{возд}}$ около 50° , а затем быстро растет и достигает 1, т. е. 100%.

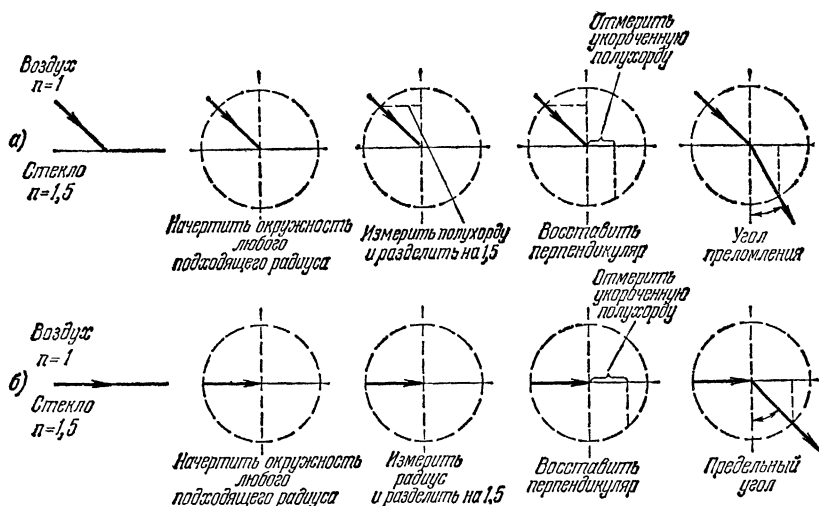


Рис. 48.

При рассмотрении хода лучей, идущих из стекла в воздух (рис. 51) и образующих в стекле угол $\theta_{\text{стек}}$ с нормалью, оказывается, что доля отраженного света при падении под углом $\theta_{\text{стек}}$ — такая же, как при падении из воздуха под соответствующим углом $\theta_{\text{возд}}$. По мере того как $\sin \theta_{\text{стек}}$ приближается к $1/n$ ($\sin \theta_{\text{возд}}$ приближается к 1), отражение приближается к полному, т. е. к 100%.

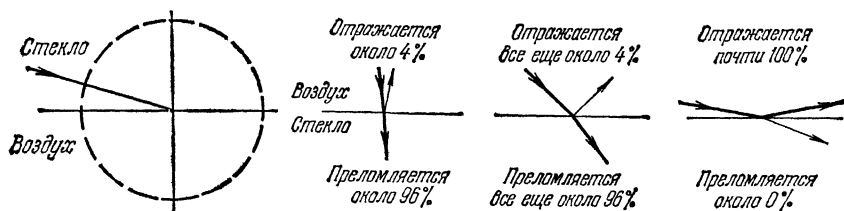


Рис. 49.

Рис. 50.

Полезно поставить демонстрацию, подобную изображенной на рис. 13.11. При демонстрации такого рода постепенное изменение яркости отраженного и преломленного света получается более отчетливым, чем на рисунке. У учащихся не должно остаться впечатления, что при $\theta=\theta_{\text{пр}}$ яркий луч света скользит по поверхности.

После ознакомления с качественной стороной вопроса о полном внутреннем отражении потребуется очень немного классного времени для вывода формулы предельного угла полного внутреннего отражения: $\theta_{\text{пр}}$ есть угол, для которого

$$\sin \theta_{\text{пр}} = n_2/n_1.$$

При ссылках на вещества с большим или меньшим значением показателя преломления вполне допустимо использование соответственных терминов «оптически более плотная» или «оптически менее плотная» среда. Эти термины в тексте

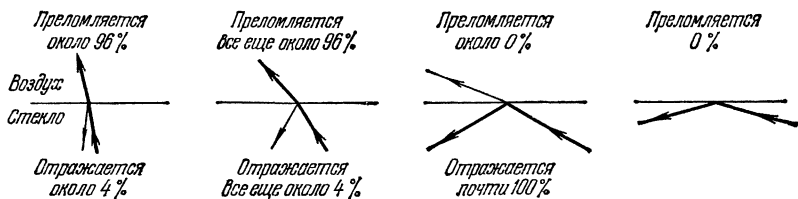


Рис. 51.

Учебника отсутствуют, но учащиеся сразу признают их как удобный способ качественной оценки соотношения показателей преломления сред. «Оптическая плотность» не имеет ничего общего с обычной плотностью. Многие вещества с меньшими показателями преломления оказываются гораздо плотнее алмаза.

Некоторые учащиеся, страдающие склонностью к мелочному педантизму, могут придаться к термину «скользящее падение». В таком случае надо предложить им подумать о последовательности 89° , $89,9^\circ$, $89,99^\circ$ и т. д. Тогда им не потребуется напрягать свое воображение, чтобы представить себе понятие луча, скользящего по поверхности в математическом смысле.

Полезно продемонстрировать учащимся следующий эффект. Монета, подложенная в выпарной чашке под лабораторный стакан, видна через стенки стакана (рис. 52). Но если наполнить стакан водой и закрыть крышкой, монета исчезает.

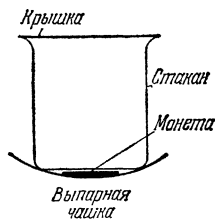


Рис. 52.

13.8. Преломление в призмах. Дисперсия

Ц е л ь. Разъяснить, что показатель преломления зависит (хотя и очень слабо) от цвета и что свет отклоняется призмами.

С о д е р ж а н и е. а) Белый свет складывается из лучей различных цветов.

б) Почти во всех веществах показатель преломления для фиолетовых лучей больше, чем для красных (т. е. фиолетовые лучи преломляются сильнее).

в) На основании закона Снеллиуса можно предсказывать ход лучей в призмах.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Дисперсия играет важную роль, с одной стороны, как средство наблюдения цветных составляющих света и, с другой стороны, как ключ к пониманию связи между цветом и частотой (см. гл. 16). На данном этапе дисперсия может быть рассмотрена весьма быстро.

На данной стадии дисперсия определяется просто как разложение белого света на его цветные составляющие, осуществляемое благодаря некоторому небольшому различию между показателями преломления для различных цветов. Позже, после того как учащиеся узнают (в гл. 16) о связи между показателем пре-

ломления и скоростью света, термин «дисперсия» будет использоваться в его более общем, техническом смысле, т. е. как зависимость скорости распространения от частоты. Здесь пока не следует вводить в рассмотрение ни скорости, ни частоты.

Учащимся нужно теперь разъяснить, что для белого света закон Снеллиуса (при постоянном n) является лишь приближением. Но при этом необходимо подчеркнуть, что для одноцветного луча закон Снеллиуса оправдывается точно.

Требуется хотя бы кратко обсудить путь одноцветного луча в призме. Учащиеся должны рассматривать построение хода лучей в призме как распространение построения для плоскопараллельных слоев на случай непараллельных плоских граней. На каждой грани придется решать задачу о преломлении. Тщательное выполнение построений служит хорошим упражнением, способствующим пониманию вопроса (рис. 53).

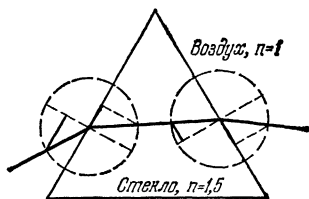


Рис. 53.

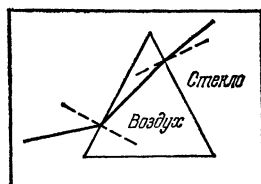


Рис. 54.

Можно развлечь учащихся абстрактным представлением о «воздушной призме», вложенной в воду или стекло (рис. 54).

Классу можно предложить следующую задачу: не справляясь в таблицах, выяснить, имеет ли лед меньший, больший или такой же показатель преломления, как вода. В наиболее благоприятном случае кто-нибудь ответит, что показатель преломления льда должен отличаться от показателя преломления воды, так как погруженный в воду кусок льда виден. Учащийся, которому известно, что вода при замерзании расширяется, может правильно (хотя и без всяких логических оснований) ответить, что показатель преломления льда меньше.

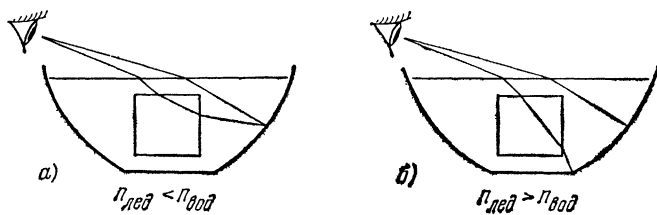


Рис. 55.

Демонстрирование на опыте, что показатель преломления льда меньше, чем воды, представляет собой тонкую задачу. Можно сообщить учащимся, что для этого не требуется ничего, кроме кофейной чашки, воды и кубика льда (достаточно прозрачного). Кубик льда помещается в чашке под поверхностью воды (рис. 55). Наблюдатель смотрит сбоку поверх края кубика на какое-нибудь пятнышко на внутренней поверхности стенки чашки. Если показатель преломления льда меньше, чем воды, то будет видно два одинаковых пятнышка (рис. 55, а), в противном случае второго изображения пятнышка не появится (рис. 55, б).

Нижеследующие задачи можно распределять в различных комбинациях как материал для обсуждения в классе и как вопросы, обращенные к классу. Их можно также использовать в качестве дополнительных задач для наиболее способных учащихся.

А. Показатель преломления стекла равнобедренной призмы равен 1,5. Найти угол падения луча, проходящего в призме параллельно ее основанию (рис. 56, а).

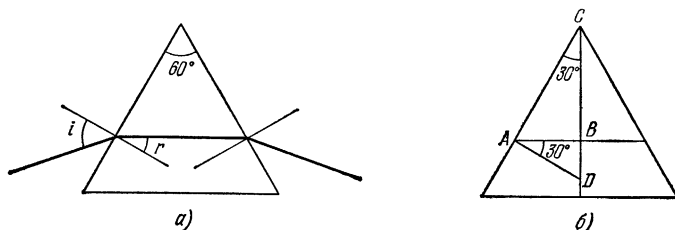


Рис. 56.

О т в е т. Если есть возможность найти угол преломления в призме, то закон Снеллиуса позволит сразу найти и угол падения. Поскольку луч в призме параллелен ее основанию, он перпендикулярен биссектрисе угла при вершине (рис. 56, б). Треугольники ABC и ABD подобны, откуда $r=30^\circ$. Таким образом, $\sin r=0,5$. По закону Снеллиуса находим $\sin i=0,75$ и $i=49^\circ$.

Б. Найти угол отклонения выходящего луча от падающего в предыдущей задаче.

О т в е т. Вследствие симметрии луч, проходящий в стекле, образует с нормалью ко второй грани призмы угол, равный углу преломления у первой грани (рис. 57). Отсюда угол между выходящим лучом и нормалью равен углу падения на первой грани. Угол отклонения d есть угол между пунктирными продолжениями падающего и выходящего лучей. Простой способ найти его значение заключается в том, чтобы провести показанную на рисунке прямую, параллельную ходу луча в призме, и учесть, что эта прямая делит угол отклонения на два равных угла, каждый из которых по геометрическим соображениям равен $i-r$. Отсюда имеем $d=2(i-r)=2(49^\circ-30^\circ)=38^\circ$.

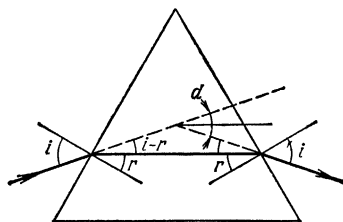


Рис. 57.

В. Выбрав любой другой угол падения, показать, что отклонение будет больше, чем в задаче Б.

О т в е т. Получившие эту задачу могут выбрать углы падения несколько бóльшие и меньшие, чем в задаче А, и построить ход лучей, чтобы найти угол отклонения. Он будет больше, чем в задаче Б.

Полезно учесть следующие замечания. Нетрудно показать в общем виде, что углы r_1 и r_2 на рис. 58, а должны удовлетворять равенству $r_1+r_2=60^\circ$. Это следует из того факта, что нормали к двум боковым граням призмы должны образовывать угол, равный углу при вершине. Таким образом, задача может быть решена аналитически. Задаваясь значением i_1 , из соотношения $\sin i_1 = n \sin r_1$ получаем значение

r_1 . Далее имеем

$$r_2 = 60^\circ - r_1, \quad \sin i_2 = n \sin r_2.$$

Чтобы найти угол отклонения d , снова проводим прямую CD , параллельную AB (рис. 58, б), и замечаем, что

$$d = i_1 - r_1 + i_2 - r_2.$$

Сходство призматического спектра со спектром радуги подсказывает учащемуся, что радуга образуется вследствие преломления и дисперсии света. Это

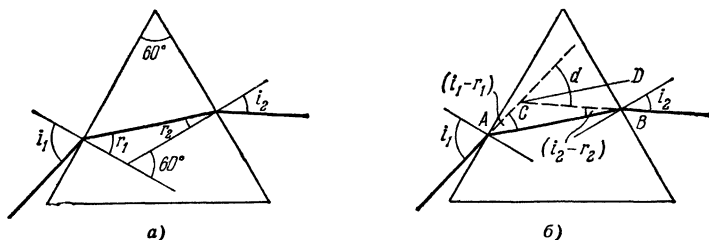


Рис. 58.

правильно, но подробное объяснение, если добросовестно придерживаться истины, достаточно трудоемко и далеко не просто. Для сведения преподавателей в Приложение 2 на стр. 380 включено как объяснение происхождения радуги, так и ответы на вопросы, которые нередко задают по этой теме учащиеся.

13.9. Собирающее действие системы призм на лучи света

Ц е л ь. Показать, каким образом параллельный пучок лучей может быть собран на линейном отрезке.

С о д е р ж а н и е. а) Можно составить систему призм, оказывающую собирающее действие на параллельный пучок лучей.

б) Размеры области схождения лучей могут быть уменьшены заменой каждой призмы системы рядом усеченных призм меньшего размера с постепенно уменьшающимися преломляющими углами.

в) Неограниченным увеличением числа мелких призм достигается приближение к гладким искривленным поверхностям. Линзы с такого рода поверхностями собирают параллельные лучи в линию.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Для усвоения учащимися содержания этого раздела не потребуются большие затраты времени благодаря уже имеющемуся знакомству как с преломлением, так и с приближением к параболическому зеркалу в виде набора плоских зеркал.

Ко времени изучения этого раздела большинство учащихся уже способно строить ход лучей в призме с помощью закона Снеллиуса. Однако некоторые из них еще не приобрели интуитивного ощущения того, отклоняется ли свет призмой «вверх» или «вниз». В таком случае требуется прямое разъяснение, что *луч света отклоняется в ту сторону, где стекло толще*. Это разъяснение нужно многократно повторять. Но даже и после ознакомления с этим mnemonicическим правилом учащимся полезно изредка применять закон Снеллиуса на каждой преломляющей грани призмы.

О волнах и волновых фронтах здесь лучше не упоминать. На более поздней стадии прохождения курса учащиеся узнают, что отклонение света в сторону

большей толщины стекла вытекает из поведения ряда последовательных волновых фронтов при переходе в область, где скорость распространения принимает другое значение. Введение здесь в рассмотрение волновых фронтов не вызывается необходимостью и означало бы резкий скачок в более поздний этап развития содержания Учебника. На данном этапе мы не объясняем природу света, а лишь описываем его поведение. Некоторым учащимся может остаться не вполне понятным, каким образом с помощью комбинации призм можно добиться схождения лучей. Разъяснить этот вопрос и вместе с тем завязать обсуждение в классе можно путем постановки ряда вопросов, подобных следующим.

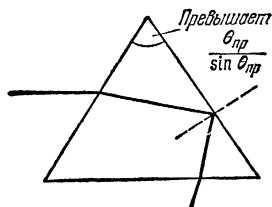


Рис. 59.

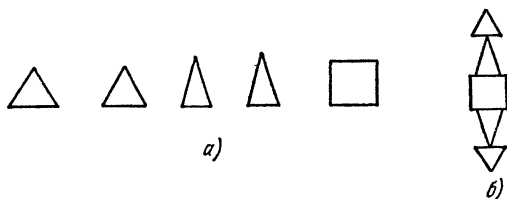


Рис. 60.

1. Как влияет изменение преломляющего угла призмы на отклонение лучей? Какая призма отклоняет лучи сильнее: «толстая» или «тонкая»? (Нельзя допускать излишней «толщины» призмы. При преломляющем угле, превышающем $\theta_{\text{пр}}/\sin \theta_{\text{пр}}$, луч, направленный параллельно основанию призмы, испытывает в призме полное внутреннее отражение (рис. 59)).

2. Как расположить стекла изображенного на рис. 60, а набора, чтобы сфокусировать лучи как можно ближе к одной линии пересечения? Большинство учащихся сразу поймет, что наилучшим будет расположение, показанное на рис. 60, б. Здесь мы имеем подходящий вопрос для вызова менее сообразительных учащихся.

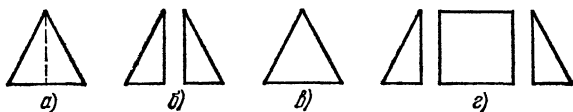


Рис. 61.

3. Что произойдет с направлением выходящего луча, если разрезать призму, изображенную на рис. 61, а, и заменить ее парой призм, как показано на рис. 61, б?

4. Что произойдет, если призму, представленную на рис. 61, в, заменить системой стекол, как показано на рис. 61, г?

5. Что нужно сделать, чтобы система вида, изображенного на рис. 62, а, приобрела более гладкую наружную поверхность? Учащиеся должны понять, что эту систему нужно заменить системой, представленной на рис. 62, б, и далее системой, показанной на рис. 62, в.

Если кто-либо из учащихся поднимет вопрос о поведении лучей различного цвета (о дисперсии), можно дать двоякий ответ: во-первых, влияние цвета мало и, во-вторых, на данном этапе целесообразно ограничиться рассмотрением одноцветных лучей.

Утверждение, что линза есть устройство, способное изменять направление лучей благодаря преломлению (см. начало раздела 13.9), нужно рассматривать не

как техническое определение, а как предварительную приближенную характеристику. Более точного определения пока не требуется.

Задача 28 является неожиданностью. Она напугает учащихся, что призмы не всегда преломляют лучи (рис. 63). После решения учащимися этой задачи необходимо указать, что в изучаемых ими линзах полное внутреннее отражение не будет участвовать.

В задаче 27 предлагается определить «фокусное расстояние» «линзы», построенной из трех призм, это — хорошее упражнение для заключения данного

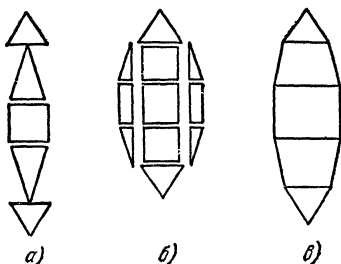


Рис. 62.

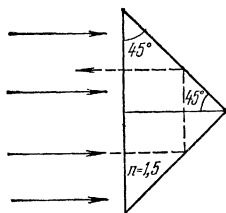


Рис. 63.

раздела. Хотя в задаче спрашивается ответ с точностью до одной значащей цифры, может потребоваться подчеркнуть, что точная математическая обработка приближения, сделанного в физическом смысле, здесь не была бы оправдана.

13.10. Линзы

Ц е л ь. Описать физические характеристики линз и указать некоторые из связанных с ними оптических свойств.

С о д е р ж а н и е. а) «Идеальная» поверхность, обеспечивающая фокусировку света цилиндрическими линзами до пересечения лучей на одной прямой, очень близка к поверхности цилиндра круглого сечения.

б) Линзы, ограниченные двумя *сферическими* поверхностями (утолщенные в середине и более тонкие у краев), сводят лучи в одну точку. Если падающий пучок лучей параллелен *оси линзы*, то лучи собираются в точке на оси, называемой *главным фокусом*. Расстояние от главного фокуса до центра линзы называется *фокусным расстоянием* линзы.

в) Для тонких линз фокусное расстояние одинаково, независимо от того, с какой стороны свет входит в линзу. Уменьшение радиуса обеих или хотя бы одной из поверхностей линзы укорачивает ее фокусное расстояние. Соотношение между формой линзы и ее фокусным расстоянием определяется формулой тонкой линзы:

$$1/f = (n-1) (1/R_1 + 1/R_2),$$

где n — относительный показатель преломления линзы, а R_1 и R_2 — радиусы ее двух поверхностей. (Хотя это и не оговорено в тексте Учебника, может понадобиться отметить, что для линзы, погруженной в некую среду, $n = n_{\text{стек}} / n_{\text{среды}}$.)

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Необходимо тщательно изложить качественную сторону вопроса. Не следует заставлять учащихся запоминать формулу тонкой линзы. Достаточно, чтобы они представляли себе ее смысл в качественном виде. Не нужно также вводить правила знаков для распространения формулы на рассеивающие линзы.

Многие преподаватели пришли к заключению, что краткое знакомство с линзами в процессе предварительных лабораторных занятий чрезвычайно полезно в качестве введения к изучению сферических и цилиндрических линз, ознакомления с фокусным расстоянием и т. п. Без этого некоторые учащиеся не получают должного представления о форме линз на основании их схем в разрезе. Нужно, чтобы учащиеся *трогали* линзы и видели в натуре как точечные фокусы, так и изображения. После лабораторного знакомства с линзами многие из учащихся более сознательно знакомятся с текстом Учебника. Этот этап вполне подходит для выполнения опыта II.4. Он носит несколько более количественный характер и подводит к математическим результатам раздела 13.11.

Если за недостатком времени, а также в виду сходства с опытом II.2, упомянутый опыт будет пропущен, то предоставление нескольких минут для осознательного знакомства учащихся с линзами и призмами в лаборатории или в классе приобретает особую актуальность.

Успевающим учащимся, вероятно, доставит удовлетворение усвоение формулы $1/p + 1/q = 1/f$ наряду с соотношением $s; s_0 = f^2$, но, имея дело даже со способными учащимися, безопаснее придерживаться второй из этих формул, пока она не будет вполне усвоена.

Следует подчеркнуть сходство между переходом от цилиндрических линз к сферическим и переходом от цилиндрических к сферическим зеркалам.

Учащимся может показаться непонятным, почему различию между сферическими и идеальными поверхностями линз не уделяется столько же внимания, сколько было уделено этому вопросу в отношении зеркал. Можно разъяснить, что сферические поверхности используются только по причине легкости их изготовления и что для большинства случаев реального применения линз высококачественными считаются лишь сложные линзы, составленные из нескольких линзовых элементов различной формы и с различными показателями преломления. Сорта стекла и форма элементов такого рода сложных линз подбираются с расчетом на устранение главных затруднений, характерных для того или иного конкретного применения линз. Несферические поверхности преднамеренно применяются в некоторых прецизионных оптических системах, а также, как это ни удивительно, в некоторых весьма грубых системах, для которых линзы не шлифуются, а отливаются (как, например, конденсорные линзы в некоторых проекционных аппаратах и фотоувеличителях).

Необходимо подчеркнуть качественную сторону формулы тонкой линзы. Для большего преломления света требуются более короткие фокусные расстояния; таким образом, более выпуклые линзы, т. е. линзы с меньшими радиусами кривизны поверхностей, имеют меньшие фокусные расстояния. Более высокие значения относительного показателя преломления также уменьшают фокусное расстояние. Хороший способ иллюстрации этих качественных закономерностей заключается в постановке перед классом вопросов о том, что именно происходит в предельных случаях (например в случае плоских поверхностей линзы, т. е. когда радиус кривизны становится все больше и больше; в случае приближения показателя преломления к единице и т. п.).

Не рекомендуется предлагать учащимся много задач, в которых требуется простая подстановка значений в формулу тонкой линзы. Если следовать этой практике, то учащиеся, механически запоминая формулу, утратят ощущение ее качественных аспектов, которые для них как раз и важны.

Нет надобности сообщать учащимся правило знаков, которое применяется к вогнутым поверхностям и отрицательным (рассеивающим) линзам. Даже в более серьезных курсах правило знаков нередко ведет к путанице. В отношении знаков не возникает никаких затруднений, пока формула применяется для одних собирающих линз.

Может оказаться целесообразным все же предложить успевающим учащимся рассмотреть отрицательные (рассеивающие) линзы; подобное рассмотрение, однако, допустимо лишь после изучения раздела 13.11. Формулу тонкой линзы можно также применять, когда обе поверхности вогнуты. В таком случае обратные величины радиусов кривизны складываются. Тот факт, что такого рода линза рассеивает свет, известен учащимся из того, что линза тоньше в середине. Разумеется, точное построение хода лучей позволяет учащемуся исследовать поведение любой линзы, а в некоторых случаях даже делать заключения о применимости формулы.

В задаче 31 рассматривается тот случай, когда n в формуле тонкой линзы означает не абсолютный показатель преломления, а относительный: показатель преломления стекла относительно воды. В этом случае в формуле вместо n должно быть написано $n_{\text{стек}}/n_{\text{вод}}$ (см. раздел 13.6).

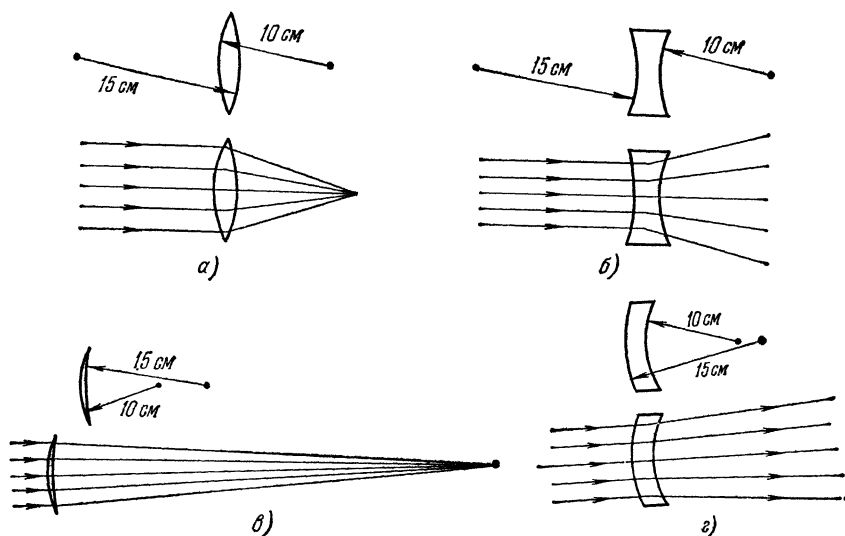


Рис. 64.

Линзы, одна поверхность которых выпукла, а другая вогнута, называются менисковыми. Поскольку здесь две поверхности оказывают противоположные действия, $1/R_2$ должно вычитаться из $1/R_1$ (или наоборот). Если такая линза толще в середине, она является собирающей, или «положительной». Если края толще, чем середина, имеем рассеивающую линзу (которую можно называть «отрицательной»).

Приступая к решению задачи, учащийся должен выяснить два качественных вопроса до применения формулы: 1) является ли линза собирающей или рассеивающей; 2) «помогают» ли ее поверхности друг другу? Затем он должен решить,

на что следует умножить величину $(n-1)$: на $1/R_1+1/R_2$, на $1/R_1-1/R_2$ или на $1/R_2-1/R_1$.

Ниже приводятся несколько примеров для случая $n=1,5$:

1. $1/f=(1,5-1)(1/10+1/15)$, $f=12$ см — линза толще в середине, собирающая (рис. 64, а).

2. $1/f=(1,5-1)(1/10-1/15)$, $f=12$ см — линза толще у краев, рассеивающая (рис. 64, б).

3. $1/f=(1,5-1)(1/10-1/15)$, $f=60$ см — линза толще в середине, собирающая (рис. 64, в).

4. $1/f=(1,5-1)(1/10-1/15)$, $f=60$ см — линза толще у краев, рассеивающая (рис. 64, г).

Если некоторые из учащихся будут настаивать на ознакомлении с выводом формулы тонкой линзы, можно дать им (но не в классе) вывод, аналогичный приведенному в Приложении 3 на стр. 386. Этот вывод базируется на законе Снеллиуса, геометрии и понятии радианной меры углов.

13.11 Действительные изображения, образуемые линзами

Ц е л ь. Показать, каким образом построение хода лучей позволяет находить изображения, образуемые собирающими линзами.

С о д е р ж а н и е. а) Для нахождения действительного изображения, образуемого собирающей линзой, можно пользоваться двумя главными лучами. Один из главных лучей проводится из точки предмета параллельно оси линзы. В линзе он преломляется так, чтобы пройти через задний главный фокус. Второй главный луч проводится из той же точки предмета, но направляется через передний главный фокус. Он преломляется в линзе так, чтобы следовать дальше параллельно оси.

б) Изображением рассматриваемой точки предмета является точка пересечения двух главных лучей. Все остальные лучи, исходящие из той же точки предмета и прошедшие через идеальную тонкую линзу, должны также пройти через ту же точку изображения.

в) Чтобы связать положения и величины изображения и предмета в виде формулы $s_i s_0 = f^2$, достаточно построить ход лучей и воспользоваться простыми геометрическими соображениями.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Требуется тщательная проработка этого раздела, чтобы учащиеся научились легко справляться с задачами. Необходимо делать упор на построение хода лучей и не допускать бездумного механического употребления формулы $s_i s_0 = f^2$. Следует ограничиваться собирающими линзами, пока учащиеся не приобретут прочного знакомства с ними. Прочное усвоение и, следовательно, запоминание этого раздела важнее знакомства с его приложениями.

Главная цель этого раздела не будет достигнута, если слишком поспешно перейти к задачам. Для сознательного подхода к их решению большинство учащихся нуждается в обсуждении построений хода лучей в классе. Это обсуждение может быть начато с вопросов следующего типа.

1. Почему лучевые схемы строятся так, как будто лучи не преломляются, пока не достигнут центра линзы? Действительно ли луч резко преломляется в одной точке или он постепенно отклоняется на всем своем пути в стекле? Если он отклоняется не постепенно, то где в действительности происходит отклонение?

Хотя учащиеся уже должны знать, что лучи преломляются только на границах раздела сред, а также несмотря на то, что приближение, связанное с идеа-

лизированным понятием тонкой линзы, разъясняется в конце этого раздела, найдется несколько учащихся, которые не смогут ответить на эти вопросы. Некоторые учащиеся не замечают замены «поверхностного преломления» преломлением в центре линзы при переходе от рис. 13.20, 13.21 и 13.22 к рис. 13.23.

2. Как найти изображение показанного на рис. 65 предмета, размеры которого превышают размеры линзы?

Учащиеся могут сначала недоумевать, каким образом можно пользоваться для построения изображения главными лучами, если они не проходят через линзу. Один из путей разъяснения этого парадокса заключается в том, чтобы показать

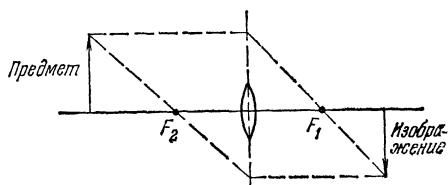


Рис. 65.

(возможно, путем наводящих вопросов), что замена линзы малого диаметра более крупной линзой с таким же фокусным расстоянием не изменяет ни расстояния, ни величины изображения. Изображение лишь становится ярче. Таким образом, если мы располагаем линзой слишком малого диаметра, чтобы через

нее проходили главные лучи, можно представить себе (для нахождения положения изображения), что малая линза заменена достаточно крупной, имеющей такое же фокусное расстояние.

Другой подход — начать с линзы достаточного диаметра и построить изображение обычным способом. Затем предложить учащимся провести несколько других лучей, проходящих ближе к центру линзы. После этого можно указать, что если края линзы загорожены или сошлифованы, центральные лучи все же будут фокусировать свет в прежнюю точку.

Можно поставить демонстрацию с экранированием части линзы или даже почти всей линзы, непрозрачной бумагой или картоном. При этом, если не считать изменения яркости, изображение не изменит ни своего расстояния, ни величины.

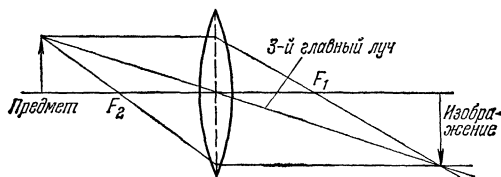


Рис. 66.

3. Какой из лучей не отклоняется? Весь класс должен понимать, что, поскольку есть лучи, отклоняющиеся вниз, и лучи, отклоняющиеся вверх, какой-то промежуточный луч должен выходить из линзы по тому же направлению, по которому он в нее вошел. Возможно, что некоторые учащиеся, исходя из соображений симметрии, подскажут, что не отклоняется тот луч, который проходит через центр линзы. Надо также выяснить, понимают ли они, что сказанное справедливо только для центральных лучей, близких к оси *тонкой* линзы, так как в этом случае противоположные участки поверхностей линзы почти параллельны и потому действуют как поверхности плоскопараллельной пластинки. Неотклоняемый луч, проходящий через центр линзы, очень удобен для построения изображений и нередко именуется третьим главным лучом (рис. 66).

4. Определяется ли положение всего изображения положением одной его точки (например показанной на рис. 13.23)?

Некоторые учащиеся могут этого не понять, так как не отдают себе отчета в том, что для определения положения прямолинейного изображения требуется по меньшей мере две точки (рис. 67). Нетрудно проверить понимание этого вопроса, предложив построить изображение наклонного предмета.

5. Как найти отношение величины изображения к величине предмета (H_i/H_0), если известны их расстояния от линзы?

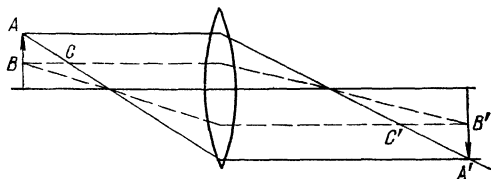


Рис. 67.

Надо попытаться получить от учащихся ответ на основании геометрических соображений, связанных со схемой хода лучей. Если учащиеся знакомы с главным лучом, проходящим через центр, они смогут сразу написать ответ, исходя из подобия треугольников: $H_i/H_0 = s_i/s_0$.

Разумеется, отношение H_i/H_0 может быть легко выведено из уже известных формул: $H_i/H_0 = f/s_0 = s_i/f$. Например, учащиеся могут получить более удобное выражение для f/s_0 , прибавив 1 к каждой части равенства $f/s_0 = s_i/f$. Тогда получится $f/s_0 + s_0/s_0 = s_i/f + f/f$, что дает $(f + s_0)/s_0 = (s_i + f)/f$, или

$$f/s_0 = (s_i + f) / (f + s_0),$$

где $s_i + f$ — расстояние изображения от линзы, а $f + s_0$ — расстояние предмета от линзы.

Для получения этого результата учащиеся обычно проделывают гораздо больше алгебраических преобразований и потому простой геометрический вывод с использованием центрального главного луча производит на них сильное впечатление.

Положим, что имеются некоторый предмет и тонкая линза, изготовленная из обыкновенного оконного стекла, но с более правильными плоскими поверхностями

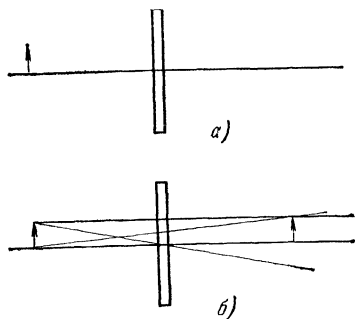


Рис. 68.

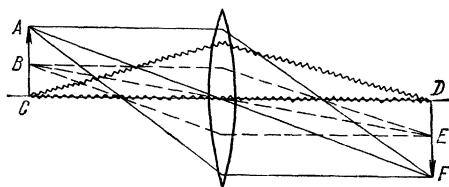


Рис. 69.

но с более правильными плоскими поверхностями (рис. 68, а).

В чем состоит ошибка в построении изображения на рис. 68, б? Если учащиеся быстро выясняют этот вопрос — очень хорошо. Если нет, то нужно им напомнить, что для нахождения положения изображения точки годятся только лучи,

выходящие из *одной и той же* точки предмета. Можно это иллюстрировать на доске с помощью схемы, изображенной на рис. 69. Полезно проводить все лучи, выходящие из точки *A*, например, красным мелом, из точки *B* — желтым и из точки *C* — белым. Для построения изображения находятся соответствующие точки *D*, *E* и *F*. Хотя в черно-белом варианте рисунок выглядит запутанным, при использовании цветного мела построение становится вполне ясным. Затем можно убедиться, что некоторые учащиеся надолго запоминают тот результат, что изображения точек получаются там, где пересекаются «лучи» одного и того же цвета.

Второй главный фокус (F_2 на рис. 13.23) вводится в этом разделе впервые. Некоторые учащиеся могут не вполне ясно себе представлять, что это такое. По определению, F_2 есть точка, в которой сходятся лучи, падающие на линзу параллельно оси справа (и распространяющиеся влево).

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам

Многие из задач, которые на первый взгляд требуют применения тригонометрии, в действительности могут решаться графически. Графические решения бывают поучительны, но, поскольку они трудоемки, не следует включать их в большом количестве в одно задание.

В табл. 6 задачи классифицируются по степени трудности и по разделам, к которым они относятся. Указываются задачи, особенно подходящие для обсуждения в классе. Особо рекомендуемые задачи обозначены значком #.

ТАБЛИЦА 6

Разделы	Со звездочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
13.1	1, 2		3#		3#
13.2	4, 5				
13.3	7—9	6	10#		10#
13.4					
13.5	12	13	11, 15	14	11, 15
13.6	16	17, 18			17
13.7	21	19	22	20#, 23	19, 20#, 23
13.8	24		25, 26		26
13.9			27#, 28		27#
13.10	29, 30		31		31
13.11	32		34	33	34

Краткие ответы

1*. Угол падения 2, угол преломления 4.

2*. На фотоснимке б) рис. 13.2.

4*. Слева.

5*. $r = \frac{3}{4} i$.

7*. $n = \sqrt{3}/\sqrt{2} = 1,2$.

8*. Да, так как измеренное значение n заключено в пределах от 1,3 до 1,4. Среда не обязательно водная.

9*. Алмаз.

12*. См. рис. 70.

16*. $n = \sin \theta_A / \sin \theta_B < 1$.

21*. 63°.

24*. Да, призма развертывает свет в спектр, так что можно видеть, какие цвета задержаны светофильтром.

29*. Очень большое фокусное расстояние.

30*. $1/f = (n-1)/R$, где R — радиус кривизны поверхности.

32*. 0,25 см.

Ответы с указаниями и решениями

3. а) Эту задачу можно трактовать как глубокий или как шуточный вопрос. В шуточном варианте задача требует от учащихся ответа, основанного на здравом смысле, об уже известном им факте, относящемся к падающему, преломленному и нормальному лучам.

Однако чтобы *доказать*, что в обычных оптических средах два указанных луча и нормаль лежат в одной плоскости, следует исходить из уравнений Максвелла или эквивалентных им соображений. Учащиеся, разумеется, не дадут подобного ответа! Необходимо удостовериться, что они не считают свой ответ *доказанным*. Ответы учащихся на поставленный вопрос нельзя предугадать. Не следует допускать, чтобы они считали свои ответы глубокомысленными. Наилучший и наиболее часто встречающийся аргумент заключается в том, что если бы упомянутые три луча не лежали в одной плоскости, преломленный луч должен был бы отходить в ту или иную сторону от плоскости, определяемой падающим лучом и нормалью. На каком основании преломленный луч мог бы принять решение о том, в какую сторону ему отклониться? Он не мог бы этого решить! Поэтому он должен оставаться в прежней плоскости.

Ответы, подобные приведенному, служат хорошим упражнением для развития интеллекта учащихся. В связи с приведенным ответом, однако, они должны отдавать себе отчет в том, что он молчаливо основывается на независимости реакции прозрачной среды от направления входящего в нее луча. Это — разумное предположение для большинства прозрачных веществ. Однако двоякопреломляющие вещества, подобные кристаллам кальцита, доставляют пример другого поведения. Таким образом, учащиеся не в состоянии привести довода, охватывающего все случаи. (Здесь не следует вдаваться в подробности по вопросу о двойном лучепреломлении.)

б) На этот вопрос можно ожидать как положительного, так и отрицательного ответа, так как некоторые учащиеся проявляют поразительную бедность воображения во всех вопросах, касающихся учебы. Независимо от того, могут ли они это себе представить или нет, существуют прозрачные вещества, в которых преломленный луч не остается в плоскости падения. Такие вещества немногочисленны, и в данном курсе они не рассматриваются.

В веществах, подобных кальциту, отсутствует симметрия в кристаллической структуре, что и заставляет преломленные лучи отклоняться в определенную сторону.

Рассмотренный вопрос служит приятным упражнением, если его не углублять (и не допускать его углубления по инициативе учащихся). Подробностей, относящихся к двойному лучепреломлению, необходимо избегать. В виде заключения нужно указать, что убеждение о распространении падающего и преломленного лучей в обычных средах в одной плоскости с нормалью основано на том, что именно такое поведение обнаруживается в этих средах в лаборатории.

6. а)	Угол	Синус	Угол	Синус
	4°	0,0698	73°	0,9563
	30°	0,5000	17,8°	0,3057
	45°	0,7071	37,3°	0,6060
	60°	0,8660	90°	1,0000
б)	Синус	Угол	Синус	Угол
	0,1045	6°	1,000	90°
	0,0000	0°	0,5000	30°
	0,3090	18°	0,5225	31,5°
	0,8660	60°	0,9636	74,5°
в)	См. рис. 71.			

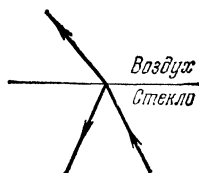


Рис. 70.

Встречаются случаи своеобразного понимания этой задачи. Некоторые учащиеся, имеющие пристрастие к тригонометрии, считают, что по п. б) нужно приводить все углы или во всяком случае формулу всех углов, имеющих данный синус. Задача требует привести лишь углы в интервале от 0 до 90°. Отдельные учащиеся иногда предполагают, что в приведенных углах и синусах есть что-то особенное,

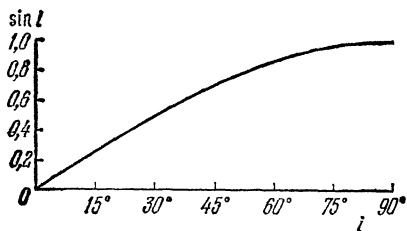


Рис. 71.

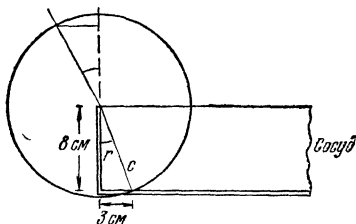


Рис. 72.

вследствие чего их полезно запомнить. Нужно обеспечить понимание того, что в приведенных значениях нет ничего «особенного» кроме того, что с углами в 30°, 45°, 60° и т. д. приходится часто встречаться. Однако в этом курсе запоминания соответствующих величин не требуется.

10. Учащиеся могут решить эту задачу с помощью схемы на рис. 72, выполненной в масштабе, или же они могут использовать таблицы для нахождения r . Второй метод требует использования соотношения $c^2 = 8^2 + 3^2$, откуда $c = \sqrt{73}$.

а) $\sin r = 3/\sqrt{73} = 0,3511$. Угол преломления $r = 20,6^\circ$.

б) $\sin i = 1,33 \sin r = 0,4670$, откуда $i = 27,8^\circ$.

в) $n = \sin i / \sin r = \sin 31^\circ / (3/\sqrt{73}) = 1,47$.

11. а) Успевающие учащиеся, ознакомившись с задачей, могут заявить: «Здесь ход лучей совершенно симметричен (рис. 73). Поэтому угол между входящим и выходящим лучами равен удвоенному углу падения, т. е. 80° ».

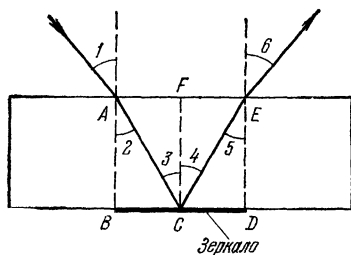


Рис. 73.

Другие учащиеся могут подойти к решению задачи более прозаически: с помощью геометрического построения или расчетным путем. Нам известно, что $\angle 1 = 40^\circ$. По закону Снеллиуса $n \sin \angle 2 = \sin \angle 1$. Из геометрических соображений $\angle 2 = \angle 3$. По второму закону отражения $\angle 3 = \angle 4$. Из геометрических соображений $\angle 4 = \angle 5$. Наконец, по закону Снеллиуса, учитывая обратимость хода лучей, имеем $n \sin \angle 5 = \sin \angle 6$. Но, поскольку $\angle 2 = \angle 5$, $\sin \angle 1 = \sin \angle 6$ и $\angle 1 = \angle 6 = 40^\circ$. Таким образом, угол между падающим и выходящим из воды лучами равен $\angle 1 + \angle 6 = 80^\circ$.

Рассмотренный здесь случай напоминает ход лучей в стеклянном зеркале, посеребренном сзади, для которого остается в силе равенство углов падения и отражения.

б) Поскольку $\angle 3$ и $\angle 4$ равны, расстояние AE , отсчитываемое по поверхности воды между точками входа и выхода лучей, равно в точности $2AF$. Нам также известно, что $CF = 10$ см и

$$\sin \angle 3 = AF/AC = \sin \angle 2 = \sin 40^\circ / 1,33 = 0,4833.$$

По теореме Пифагора имеем

$$AC = \sqrt{AF^2 + FC^2}, \quad AF/\sqrt{AF^2 + 10^2} = 0,4833, \quad AF = 5,52.$$

Таким образом, $AE \approx 11$ см. Мы избежали применения тангенсов. Использование

их упростило бы задачу. Однако если учащиеся еще не знакомы с тригонометрией, лучше не смущать их применением тригонометрических функций, кроме синуса.

Решение задачи путем графического построения одинаково допустимо и может даже оказаться быстрее аналитических расчетов.

13. Параллельность двух отраженных лучей будет всегда сохраняться, поскольку два преломления, испытываемые лучом, претерпевшим полное внутреннее отражение, противоположны друг другу.

14. Эта задача, связанная с искривлением лучей в среде с изменяющимся показателем преломления, может служить интересной темой для обсуждения в классе.

Так как показатели преломления воздуха и вакуума различны, показатель преломления разреженного воздуха должен иметь промежуточное значение между показателями преломления воздуха на уровне моря и вакуума. Давление воздуха падает с высотой, а вместе с ним падает и показатель преломления. Для простоты предположим, что атмосфера состоит из множества параллельных слоев, каждый из которых имеет показатель преломления, несколько меньший, чем в нижележащем слое, но постоянный по всей толщине данного слоя. Тогда получим схему, подобную рис. 74, на которой, впрочем, преломление сильно преувеличено.

Таким образом, заходящее Солнце находится фактически уже за горизонтом, и только благодаря преломлению (атмосферной рефракции) мы все еще его видим. Многие из миражей также обусловлены рефракцией между слоями горячего разреженного и холодного плотного воздуха. (Количественное рассмотрение задачи о преломлении в плоскопараллельных слоях содержится в разделе 13.6.)

15. Если бы Луна имела атмосферу на пути света между звездами и Землей, то свет от звезды испытывал бы преломление, как показано на рис. 75, и звезда казалась бы смещенной из S в S' .

Таким образом, при приближении Луны к звезде нам казалось бы, что звезда движется перед Луной относительно неподвижных звезд и при этом краснеет и уменьшает свою яркость перед тем, как скрыться за Луной.

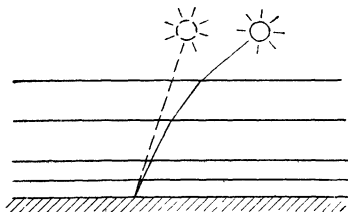


Рис. 74.

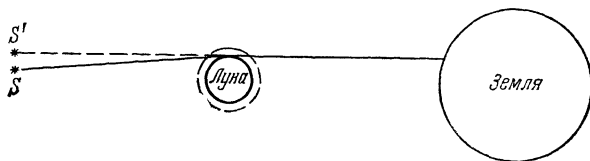


Рис. 75.

17. Если $n_{\text{алм}}/n_{\text{стек}}=1,61$ и $n_{\text{стек}}=1,50$, то $n_{\text{алм}}=n_{\text{стек}}(n_{\text{алм}}/n_{\text{стек}})$, $n_{\text{алм}}=1,50 \cdot 1,61=2,42$.

18. Если $n_{\text{вод}}/n_{\text{кисл}}=0,91$ и $n_{\text{вод}}=1,33$, то $n_{\text{кисл}}=n_{\text{вод}}/n_{\text{кисл,вод}}$, $n_{\text{кисл}}=1,33/0,91=1,46$.

19. Плавленный кварц и олеиновая кислота имеют одинаковый показатель преломления и оба бесцветны. Поскольку свет проходит через их границу раздела без преломления и отражения, отсутствуют какие бы то ни было средства, позволяющие вообще «видеть» кусок кварца, если только он не содержит внутренних дефектов.

Можно к этому добавить, что на самом деле человек-невидимка должен был бы быть бесцветным и прозрачным, имея притом такой же показатель преломления, как у воздуха.

Доступными в обычных условиях материалами с почти одинаковым показателем преломления являются обычное минеральное масло и люцит или плексиглас. Смесь бензола со спиртом в надлежащей пропорции имеет такой же показатель преломления, как у стекла пирекс. Некоторые из учащихся, изучавших биологию,

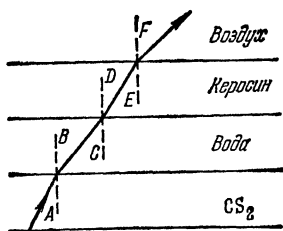


Рис. 76.

могли видеть образцы ткани, погруженные в канадский бальзам, имеющий такой же показатель преломления, как стекло, используемое для предметных и покровных стекол.

20. Эта задача на относительный показатель преломления побуждает к алгебраическим вычислениям, так как один из показателей преломления не задан (он оказывается и ненужным). Если вы предложите эту задачу без пояснений, некоторым учащимся сразу придет в голову разыскивать показатель преломления керосина. Но если вы вначале дадите разъяснения, вы их приятно удивите.

а) Нам неизвестен показатель преломления керосина, но мы обнаруживаем, что конечный угол преломления F луча, выходящего из керосина, может быть определен и без этого (рис. 76). Согласно закону Снеллиуса

$$n_{CS_2} \sin 5^\circ = n_{\text{вод}} \sin \theta_{\text{вод}} = n_{\text{кер}} \sin \theta_{\text{кер}} = \sin \theta_{\text{возд}}.$$

Следовательно,

$$\sin \theta_{\text{возд}} = 1,63 \sin 5^\circ, \text{ т. е. } \theta_{\text{возд}} = 8,2^\circ.$$

б) Да, но необходимо принять, что обратимость есть эмпирический закон.

в) Угол выходящего луча в этом случае должен быть меньше, чем в п. а), и может быть вычислен из закона Снеллиуса:

$$1,33 \sin 5^\circ = 1 \cdot \sin \theta_{\text{возд}}, \\ \sin \theta_{\text{возд}} = 0,1160, \text{ т. е. } \theta_{\text{возд}} = 6,7^\circ.$$

22. Можно сразу видеть, что первоначальный луч не в состоянии выйти в воздух, так как предельный угол $\theta_{\text{пр}}$ полного внутреннего отражения в воде на границе с воздухом меньше 60° (рис. 77).

Присутствие стекла не меняет дела, так как в стекле луч подойдет к поверхности

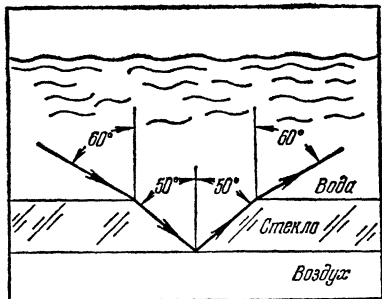


Рис. 77.

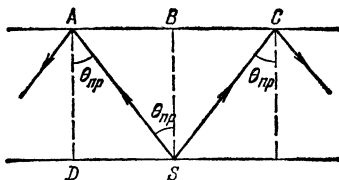


Рис. 78.

воздуха под углом падения, превышающим предельный угол полного внутреннего отражения, присущий этой границе раздела:

$$n_{\text{стек}} \sin \theta_{\text{стек}} = n_{\text{вод}} \sin \theta_{\text{вод}} > 1, \quad \sin \theta_{\text{стек}} > \sin \theta_{\text{пр}}, \\ \sin \theta_{\text{стек}} = \sin 60^\circ (1,33/1,5) = 0,87 \cdot 1,33/1,5 = 0,77, \\ \theta_{\text{стек}} = 50^\circ.$$

23. Свет будет проходить снизу через поверхность сероуглерода только под углами падения, меньшими угла полного внутреннего отражения; иными словами,

Площадь же составляет $\pi (AB)^2 = 60,3 \pi \text{ см}^2 = 189 \text{ см}^2$.

Рис. 79.

27. Учащиеся могут решать эту задачу на основании закона Снеллиуса с последующим нахождением «фокусного расстояния» с помощью тригонометрических функций или путем измерения на лучевой схеме, начерченной с наблюдением масштаба (рис. 80). Результат зависит от того, падает ли свет с выпуклой или плоской стороны, но с точностью до одной значащей цифры направление не влияет на результат.

$1.5 \sin 30^\circ = \sin r$
 $r = 48.6^\circ$
 $48.6^\circ - 30^\circ = 18.6^\circ$

Рис. 80.

б) Подобная «линза» не даст четкого изображения, так как параллельный пучок лучей не фокусируется в одну точку, а лишь концентрируется около некоторой точки.

28. Две изображенные призмы не будут оказывать собирающего действия на падающие лучи, так как лучи, прошедшие в одну из призм, дважды претерпевают полное внутреннее отражение и выходят назад параллельно первоначальному направлению (рис. 81). После решения этой задачи следует добиться понимания того, что полное внутреннее отражение почти нигде не проявляется в линзах. Оно препятствует изготовлению лишь наиболее искривленных типов выпуклых линз.

31. а) Формула тонкой линзы имеет вид $1/f = (n-1)(1/R_1 + 1/R_2)$, где n — показатель преломления материала линзы относительно окружающей ее среды. Таким образом, если линза погружена в воду, выражение $(n-1)$ должно быть заменено выражением $(n_{\text{стек}}/n_{\text{вод}}-1)$.

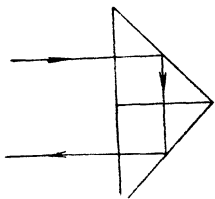
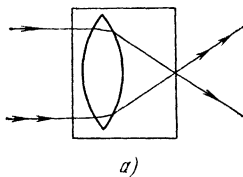
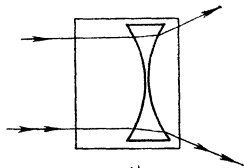


Рис. 81.



а)



б)

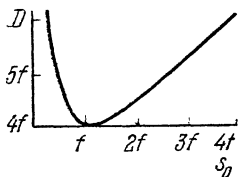
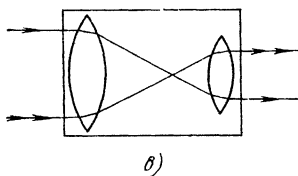
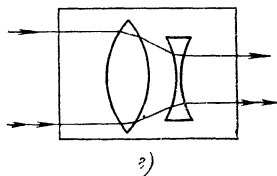


Рис. 82.



в)



г)

Рис. 83.

Так как величина $(n-1)$ для линзы, погруженной в воду, меньше, чем для той же линзы в воздухе, фокусное расстояние линзы в воде будет больше.

б) Приняв $n_{\text{стек}} = 1,50$ и $n_{\text{вод}} = 1,33$, получим

$$\frac{1/f_{\text{вод}}}{1/f_{\text{возд}}} = \frac{(n_{\text{стек}} - 1)(1/R_1 + 1/R_2)}{(n_{\text{стек}}/n_{\text{вод}} - 1)(1/R_1 + 1/R_2)} = \frac{n_{\text{стек}} - 1}{n_{\text{стек}}/n_{\text{вод}} - 1}.$$

Множители, содержащие R_1 и R_2 , сокращаются, так как кривизна поверхностей не изменяется. Таким образом, имеем

$$\frac{f_{\text{вод}}}{f_{\text{возд}}} = \frac{n_{\text{вод}}(n_{\text{стек}} - 1)}{n_{\text{стек}} - n_{\text{вод}}} = \frac{1,33(1,50 - 1)}{1,50 - 1,33} = 4.$$

Следовательно, фокусное расстояние в воде составит $4 \cdot 20 = 80$ см.

33. Данная задача представляет собой отличное введение к ознакомлению с понятием минимума функции. Полное расстояние от предмета до изображения $D = s_0 + s_i + 2f$. Исключая s_i с помощью равенства $s_0 s_i = f^2$, получим $D = s_0 + f^2/s_0 + 2f$. При использовании f в качестве единицы длины получаем график, показанный на рис. 82. Если учащиеся знакомы с дифференциальным исчислением, они смогут решить эту задачу аналитически.

Дифференцируя функцию $D = s_0 + f^2/s_0 + 2f$ по s_0 , имеем $dD/ds_0 = 1 - f^2/s_0^2$. Условие минимума функции заключается в том, чтобы соблюдалось равенство $dD/ds_0 = 0$, откуда $f^2/s_0^2 = 1$. Таким образом, $s_0 = f$ и $D = f + f^2/f + 2f = 4f$.

34. Следует разъяснить учащимся, что каждая из схем соответствует реальному случаю. В задаче отсутствуют ловушки. На рис. 83 приведены схемы возможных решений.

14 КОРПУСКУЛЯРНАЯ МОДЕЛЬ СВЕТА

Основной целью этой главы является формирование у учащихся понятия физической модели, указание методов ее проверки и рассмотрение как пользы, так и ограниченности модельных представлений. Пожалуй, еще более важным (но и более трудным для осознания учащимися) является сам дух поисков более глубокого понимания природы физических явлений, а также раскрытие элементов поиска и дерзания, сопутствующих развитию физической теории.

До сих пор в части II мы занимались изучением световых явлений, отмечая их закономерности, применимость определенных законов и вытекающую отсюда предсказуемость некоторых световых явлений. В гл. 14 мы попытаемся определенным образом сгруппировать эти явления, создав более понятную «картину» света. Кроме исследования корпускулярной модели света (и обнаружения того, что она не всегда применима), эта глава призвана служить своеобразным мостом между геометрической (отражение и преломление) и волновой оптикой (главы 15—18).

Материал, касающийся волновых явлений, неизбежно содержит в некоторых местах элементы физической оптики и, кроме того, трактует физические процессы (интерференция, дифракция), которые наиболее характерны для волн.

Краткое содержание главы 14

При поисках теории света простая корпускулярная модель оказывается способной объяснить законы отражения и преломления, а также обратную пропорциональность освещенности поверхности квадрату расстояния от источника. Модель предсказывает давление света на освещаемую им поверхность. Она предсказывает также, что нагревание тел следует связать с поглощением света их поверхностями. Эксперименты подтверждают как существование светового давления, так и связь нагревания с поглощением света. Затем обнаруживаются некоторые изъяны модели. Довольно неуклюже выглядит в рамках корпускулярной теории объяснение частичного отражения и частичного преломления света у поверхности преломляющих тел; правда, такое объяснение все же возможно.

Создается впечатление, что не существует простого корпускулярного объяснения природы дифракции. И, наконец, корпускулярная модель требует, чтобы в преломляющей среде скорость света была выше, чем в воздухе или в пустоте. Однако это противоречит экспериментальным данным о скорости распространения света в различных средах. В то время как корпускулярная модель может объяснить ряд световых явлений, она встречает затруднения, а иногда и оказывается несостоятельной при рассмотрении явлений другого рода. Корпускулярная модель света должна быть изменена или заменена другой моделью.

Ввиду того, что модели придают связность и направленность физическому мышлению, вы должны попытаться создать у учащихся представление о том, что такое

физическая модель. Вам, очевидно, захочется развернуть дискуссию и обсудить догадки, но в этом случае нужно быть настороже, ввиду возможности несурзных предположений. Однако, опираясь на вашу помощь, учащиеся проявят изобретательность и получат удовлетворение от обсуждения различных механизмов действия света. Необходимо помнить, что учащиеся еще не проходили курса механики и потому могут иметь неверные представления о взаимодействии частиц. Исправляя ошибки, вы не должны в то же время отпугивать учащихся, подвергая критике (слишком резко или неожиданно) неверные предположения.

Если это необходимо, вся глава может быть вынесена на самостоятельное чтение. В данном случае важно не то, что учащийся усвоит определенные факты или методы анализа; главное внимание должно быть уделено в классном обсуждении общему содержанию главы. Для этого необходимо сделать некоторые вопросы темой классной дискуссии.

Как вы ни пытались в свое время этого избежать, в вашем классе, по всей вероятности, уже когда-то прежде обсуждался вопрос о природе света. Некоторые учащиеся «знают», что свет представляет собой волны, либо «знают», что свет есть одновременно и волны, и частицы. Другие учащиеся (со скудными предварительными знаниями о свете) могут быть совершенно непредубеждены и готовы согласиться со всем, что они прочитают в гл. 14. Оба типа учащихся должны несколько «освоиться на местности», прежде чем приступать к изучению гл. 14.

Допустим, что один из учащихся, изучая данный курс физики средней школы, еще до окончания этой главы поспорил с учащимся, проходящим другой курс физики, что скорость света в стекле выше, чем в вакууме. Используя корпускулярную модель света и механическую модель преломления, учащийся, проходящий данный курс, показал, что его гипотеза правильна, и выиграл пари. Позднее, в ходе изучения курса, он понял, что выигрыш придется вернуть.

Конечно, приятно, что учащийся настолько отчетливо усвоил аргументацию начала главы, что смог убедить «сомневающегося». Однако учащиеся должны следовать рассуждениям и проследживать «подъем» и «закат» модели, не приходя к убеждению, что корпускулярная модель света является последним словом науки.

Как отчасти показывает вышеприведенный пример, учащиеся могут отнестись к большей части изложенного в главе материала как к «фактам», доказывающим полную справедливость корпускулярной теории света. В этом случае развенчание корпускулярной модели вызовет у части учащихся впечатление, что вся эта глава совершенно несерьезна. Она начинается со смехотворной идеи, будто свет похож на бейсбольный мяч, а потом детально исследует эту идею лишь для того, чтобы доказать ее несостоятельность.

Главное, чтобы учащиеся поняли *цель* данной главы, которая состоит не в том, чтобы одним махом подтвердить или опровергнуть определенную модель или теорию света; эта глава лишь начинает развитие модели световых явлений.

Мы начинаем с модели, которая кажется разумной (как исторически и было с корпускулярной моделью), и рассматриваем процесс сравнения модели с экспериментальными данными — процесс проверки теории. В заключение главы мы не придем к выводу, что корпускулярная модель не обладает никакой ценностью. Хотя в простейшем виде она и не вполне пригодна, мы вовсе не должны бесповоротно от нее отказаться. (И действительно, в части IV мы покажем, как корпускулярная модель вносит свой вклад в понимание нами природы света.) В данной главе мы делаем лишь *первый шаг* в этом направлении.

Поэтому самой лучшей «ориентировкой на местности», независимо от того, как вы будете излагать эту главу в деталях, является разъяснение, что цель ваша состоит не в том лишь, чтобы подробно изучить все доводы «за» и «против» определенной теории; она и — в том, чтобы проанализировать, как проходит теория испытание опытом. Вам нужно будет подталкивать учащихся, чтобы они не задерживались на деталях, а думали о модели в целом.

Зачем нам нужна модель? (Заставьте учащихся осознать, что если свет ведет себя в некотором отношении подобно частицам, то мы можем ожидать в нем и других корпускулярных характеристик и надеяться, таким образом, обнаружить в свойствах света нечто новое.) Даже построение пробной модели приводит в будущем и к дальнейшим исследованиям, и к переоценке известных данных.

Желательно смягчить впечатление, что свет должен быть либо частицей, либо чем-то (в неопределенном пока смысле) отличным от нее. Вы можете помочь учащимся, заменив вопросы типа: «Состоит ли свет из частиц?» или «Какие свидетельства есть у нас, что свет состоит из частиц?» вопросами другого типа: «Ведет ли себя свет как поток частиц?», «Какие свидетельства есть у нас, что свет ведет себя как поток частиц?».

Мы все знаем, что свет не является ни частицей, ни волной. Свет есть свет. В одних случаях он ведет себя подобно частицам (или, как мы говорим, его поведение согласуется с корпускулярной моделью). В других случаях он ведет себя как волны (т. е. соответствует волновой модели). Когда мы говорим, что свет — это поток «фотонов», то мы, разумеется, никоим образом не отказываемся от дуализма. Мы просто изобретаем новое слово, чтобы описать нечто, обладающее как корпускулярными, так и волновыми характеристиками.

В гл. 14 не делается попытки разместить в стройном порядке все аргументы в пользу корпускулярной модели. Основные доводы в пользу корпускулярной теории света (фотоэффект и излучение света атомами) переносятся в часть IV, где их трактовка будет более содержательной. В этой главе мы задаемся лишь вопросом, будет ли работать определенная, очень *простая* корпускулярная модель. Когда эта простая модель терпит неудачу, мы начинаем поиски другой простой модели. Это приводит нас к рассмотрению волн.

Некоторые преподаватели считают, что для успешного проведения вводного занятия по теме «Волны» в гл. 15 стоит затратить время и приложить усилия, чтобы повесить на нитях длинную медную спираль. Это особенно необходимо, если

ТАБЛИЦА 7

Глава 14	9-недельный план изучения части II			14-недельный план изучения части II		
Разделы	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты
14.1, 14.2	1	1	II.5	1	2	II.5
14.3—14.5	1	0	—	1	0	—
14.6—14.8	1	0	—	2	0	—

пол в аудитории не гладкий (см. опыт II.7 и указания к нему в разделе ЛР Руководства). Если вы решили подвешивать спираль, то нужно начать подготовку заранее, так как это занимает определенное время и, кроме того, нужно попрактиковаться самому, прежде чем начинать работу с учащимися.

План изучения главы 14

В табл. 7 даются возможные варианты распределения времени при изучении данной главы, согласованные с общим планом проработки части II (см. Введение, стр. 194).

Дополнительные материалы к главе 14

Лаборатория. Опыт II.5 (*Преломление частиц*) должен предшествовать обсуждению в классе раздела 14. 2 (см. указания на стр. 563).

Домашние, классные и лабораторные задания. Ответы, решения и таблица классификации задач по степени их трудности приведены на стр. 274.

Введение

Цель. Ввести понятие модели.

Содержание. Прямолинейность распространения света и отсутствие взаимодействия пересекающихся пучков не противоречит той мысли, что свет представляет собой поток частиц. Если частицы движутся достаточно быстро и размеры их достаточно малы, то они *могут* вести себя подобно свету.

Методические указания. Изложение должно быть кратким. Не останавливайтесь на вопросе, *почему* частица, летящая с большой скоростью, не отклоняется заметным образом от прямолинейного пути. Учащиеся незнакомы с величиной силы земного тяготения, но они знают, например, что пуля движется практически прямолинейно.

Некоторые учащиеся могут представлять себе пучок небольших частиц, пользуясь «обычными» масштабами, — например представлять себе пучок ружейных пуль. Чтобы подстегнуть их воображение, сообщите, что они должны представить себе пучок света таким образом, чтобы среднее расстояние между частицами (имеющими размеры пуль) было порядка расстояния от Земли до Солнца.

Мы здесь не должны описывать истинное положение дел. Если же кто-либо из учащихся настаивает на точном указании размера частицы света, вы можете сказать, что на данной стадии изучения единственной оценкой размеров частицы света может быть отсутствие взаимодействия пересекающихся пучков. Правильное утверждение о размерах частицы света требует глубокого знакомства с передовыми идеями физики.

Фотоны, описываемые в гл. 33 части IV, имеют такое же эффективное поперечное сечение, как и пучок, составными частями которого они являются.

14.1. Отражение

Цель. Изложить законы отражения как простое следствие модели.

Содержание. а) Все явления отражения, включая отражение в неплоских зеркалах, описываются двумя законами отражения.

б) Идеальный шарик из подшипника при отражении от упругой поверхности подчиняется двум законам отражения (реальные подшипниковые шарики очень близки в этом случае к идеальным, если не учитывать силы тяготения).

в) Корпускулярная модель света может объяснить как зеркальное, так и диффузное отражение.

Методические указания. Изложение должно быть кратким. Теперь мы можем дать верхний и нижний пределы размеров частиц света. Частицы должны быть достаточно малы, чтобы не сталкиваться в пересекающихся пучках, но должны быть больше размеров неоднородностей на поверхности хорошего зеркала.

Биллиардный шар или кольцо из пластика (на которое обычно наматывается липкая лента), пущенные щелчком по гладкой поверхности на отражающий борт, достаточно хорошо демонстрируют равенство углов падения и отражения.

14.2. Преломление

Ц е л ь. Показать, как модели иногда ведут к постановке новых экспериментов; показать также, что при определенных предположениях корпускулярная модель света может объяснить преломление.

С о д е р ж а н и е. а) Все явления преломления (включая преломление в линзах и призмах) могут быть подытожены в виде двух законов преломления.

б) Может быть построена корпускулярная модель, в которой частицы подчиняются закону Снеллиуса. Эта модель требует, однако, чтобы скорость частиц увеличивалась при попадании их в область, где траектория движения отклоняется в сторону нормали.

в) Построенная модель, таким образом, приводит к мысли о постановке эксперимента по измерению скорости света в различных средах, с тем чтобы убедиться, ведет ли себя свет подобно частицам в корпускулярной модели.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Изложение должно быть кратким, но учащимся должно быть предоставлено достаточно времени, чтобы познакомиться с преломлением катящегося шара либо в процессе демонстрации, либо при выполнении лабораторных работ. Опыт II. 5 должен быть проделан до того, как начнется рассмотрение материала в классе.

Ввиду того что учащиеся не знакомы с механикой в таком объеме, чтобы предвычислить результат, важно добиться, чтобы им был интуитивно понятен результат опыта II. 5, изображенный на рис. 14. 4. Учащимся будет совершенно не очевидно, что скорость на нижнем уровне v_n не зависит от угла падения, как это утверждается в тексте Учебника. Поэтому проведение опыта особенно важно.

Вы можете вернуться к этому вопросу в части III, когда будет обсуждаться закон сохранения энергии. На этой стадии, однако, вы можете лишь указать качественную зависимость n увеличивается с ростом разности высот горизонтальных плоскостей и уменьшается с ростом v_b . Некоторые учащиеся могут потребовать более детальных объяснений, но тут вам придется ответить, что более подробные объяснения могут быть даны лишь после того, как будет изучена механика.

14.3. Сила света источника и освещенность поверхности

Ц е л ь. Изложить закон обратных квадратов и рассмотреть вопрос о том, может ли он быть объяснен с помощью корпускулярной модели.

С о д е р ж а н и е. а) Общее количество видимого света; поступающего от источника (силу света), определяют путем сравнения с произвольно выбранным эталоном, называемым *свечой* (св). Сила света 100-ваттной лампы — около 120 св.

б) Освещенность поверхности есть количество видимого света, приходящееся на единицу ее площади. Освещенность может выражаться числом свечей источника, находящегося на расстоянии 1 метра от предмета и создающего такую же освещен-

ность предмета, как и данная. Соответствующая единица освещенности называется люксом (лк).

в) Освещенность E обратно пропорциональна квадрату расстояния.

г) Корпускулярная модель объясняет обратную зависимость освещенности от квадрата расстояния.

Методические указания. Основная идея состоит в том, что простая корпускулярная модель совместима с законом обратных квадратов. Если вы располагаете временем, то можете рассмотреть этот вопрос более полно. Чтобы учащиеся овладели понятиями силы света и освещенности, дайте им короткие определения, подобные вышеприведенным. (В части II нет определения освещенности; оно было дано в разделе 4.3 части I.) Затем приведите простые примеры, используя реальные значения величин.

Нижеследующий демонстрационный опыт может быть легко осуществлен, причем все данные, необходимые для проверки закона обратных квадратов и его связи с корпускулярной моделью, могут быть получены непосредственно в аудитории. Эта демонстрация с соответствующим вступлением может предшествовать обсуждению содержания данного раздела.

Установка представляет собой теневой фотометр (рис. 84). Расположите прибор так, чтобы класс мог видеть и сравнивать две тени от карандаша (закрепленного в держателе в виде резиновой пробки с просверленным отверстием).

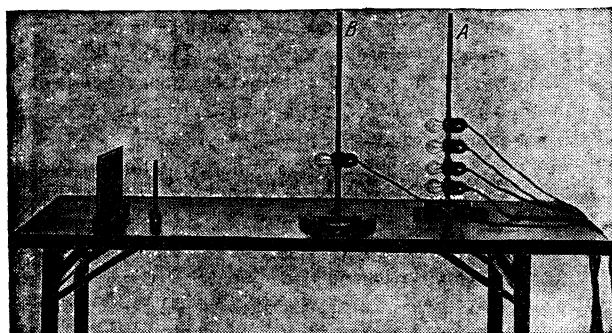


Рис. 84.

Удобно воспользоваться метровой линейкой, помещенной между экраном и штативом A с четырьмя лампами. Тогда, передвигая вдоль линейки штатив B с одиночной лампой, можно прямо отсчитывать положения, соответствующие одинаковой густоте теней.

Перед началом опыта убедитесь, что каждая из пяти 15-ваттных ламп создает на экране одинаковую освещенность. Сравните освещенность экрана лампой B и каждой из ламп A , когда штативы A и B находятся на одинаковом расстоянии от экрана.

Проанализируйте результаты для четырех различных положений B , соответствующих четырем различным комбинациям ламп, включенных в A . Вы можете либо вычислять произведения $E r^2$, либо отложить E в зависимости от $1/r^2$ аналогично тому, как это делалось в гл. 4 Учебника. Используя изложенную методику,

при тщательном выполнении опыта вы должны получить вытекающий из корпускулярной модели закон обратных квадратов с точностью 6—8%.

Интересным продолжением опыта является проверка того, имеет ли 60-ваттная лампа вчетверо большую силу света, чем 15-ваттная.

Приборы и принадлежности: 5 ламп по 15 Вт, 127 В; 5 патронов с проводами и штепселями; 2 штатива; 5 зажимов от бюреток; 1 картонный экран размером $12,5 \times 12,5$ см; 1 крепление экрана (2 надрезанные пробки около 4 см в диаметре или две бельевые защипки); 1 карандаш; 1 держатель в виде резиновой пробки с отверстием; 1 метровая линейка; 1 удлинительный шнур с тройником.

Если вы не дадите учащимся попрактиковаться и не окажете им помощи, то многие из них, решая соответствующие задачи, будут слепо применять формулу обратных квадратов. Они будут делать неоправданно длинные и сложные подсчеты, так как не понимают основной зависимости.

Если, к примеру, вы дадите задачу: «Какова освещенность объекта, находящегося в 1,2 м от источника света K , если она составляет 220 лк на расстоянии 60 см?», то многие учащиеся сначала рассчитают силу света источника K . Они найдут, что сила света составляет 80 св и потому освещенность на расстоянии 1,2 м будет 55 лк. Если вы дадите ту же самую задачу, выразив лишь расстояние в см или км, то некоторые учащиеся начнут пересчитывать, не сознавая того, что ответ им уже известен. Некоторые из них начнут даже переводить расстояния в метры, чтобы рассчитать силу света источника в свечах, вместо того чтобы просто поделить освещенность на отношение квадратов расстояний.

Приведите учащимся несколько примеров и убедитесь, что они теперь знают, что при увеличении расстояния в m раз освещенность падает в m^2 раз.

Начните с числовых задач следующего типа: 1) Если освещенность на расстоянии 1,5 м 200 лк, то какова она на расстоянии 4,5 м? 2) Если освещенность составляет 32 лк на расстоянии 3 м, то какой она будет на расстоянии 60 см?

Затем переходите к более отвлеченным примерам вида: 3) Если освещенность составляет 20 лк на расстоянии d , то какова она будет на расстоянии $\frac{2}{3}d$?

В качестве наглядного примера можно привести следующую задачу:

4) Если на расстоянии d освещенность x лк, то какова она на расстоянии r ? Найдутся учащиеся, которые будут полагать, будто ответ зависит от того, что больше: d или r .

Некоторые учащиеся могут спросить, чем вызван разброс точек на рис. 14.6. Наиболее естественный ответ состоит в том, что, по-видимому, были допущены экспериментальные ошибки при измерении освещенностей или расстояний. Кто-то может предположить, что отклонения возникают из-за несферичности источников света (при сферической симметрии нет отклонений), но такого рода источники ошибок должны приводить к росту отклонений с убывью расстояния. Так как часть точек лежит над прямой, а часть — под прямой, то это, скорее всего, погрешности измерений. (Более проницательные учащиеся могут догадаться, что так как отклонения достигают наибольшей абсолютной величины при самых малых расстояниях, то по-видимому, ошибки происходят именно при измерении расстояний.)

14.4. Давление света

Ц е л ь. Показать, что модели могут использоваться для предсказаний.

С о д е р ж а н и е. Корпускулярная модель предсказывает или подразумевает, что свет производит давление. Эксперименты показывают, что это верно.

Давление света, излучаемого обычными источниками, исключительно мало, но световое давление в звездах может быть громадным. (Учащиеся еще не знакомы с количественным выражением давления, но они сознают, что частицы, ударяющиеся о поверхность, толкают ее.)

Методические указания. Излагайте этот раздел кратко. Преподавателю полезна следующая дополнительная информация.

Для типичного источника света освещенность в 1000 лк на площади в $0,1 \text{ м}^2$ соответствует примерно 6 Вт, т. е. $6 \text{ Дж} / \text{с} = 6 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{с}$.

Сила есть быстрота изменения количества движения (импульса). Так как импульс света равен его энергии, деленной на скорость света $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м} / \text{с}$, то сила равна $(6 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{с}) : (3 \cdot 10^8 \text{ м} / \text{с}) = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$.

Итак, механическая сила, соответствующая освещенности в 1 000 лк, составляет $2 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$. Если такова освещенность на площади в $0,1 \text{ м}^2$, то давление в случае полного поглощения равно $2 \cdot 10^{-8} \text{ Н} / \text{м}^2$. *Если же свет полностью отражается, то давление вдвое больше: $4 \cdot 10^{-8} \text{ Н} / \text{м}^2$.*

14.5. Поглощение света и нагревание

Ц е л ь. Вновь показать, что модель позволяет делать предсказания.

С о д е р ж а н и е. Корпускулярная теория предсказывает, что среда, поглощающая свет, должна нагреваться. Это обнаруживается экспериментально.

Методические указания. Этот раздел по возможности нужно излагать кратко, пользуясь аналогией, которая приводит к выводу, что частицы должны объяснить процесс поглощения и нагревания. Учащиеся немного знают о теплоте. Большинство из них не знает, что при ковке свинец нагревается сильнее олова; впрочем, это простой эксперимент, который можно проделать в классе или дома. Если вы начнете обсуждать его подробно, то учащиеся захотят побольше узнать о свинце, стали и теплоте, о том, почему при ковке металл нагревается и т. п. Однако нагревание прозрачного тела не так-то легко продемонстрировать.

14.6. Некоторые трудности корпускулярной теории

Ц е л ь. Показать, что простая корпускулярная теория не может объяснить всех световых явлений и что модели часто приходится либо усложнять, либо отбрасывать.

С о д е р ж а н и е. а) Существование частичного преломления и частичного отражения на одной и той же поверхности трудно объяснить, используя простую корпускулярную модель.

б) Дифракция не может быть объяснена с помощью одной лишь корпускулярной модели.

в) Если модель становится слишком сложной — от этого пользы мало; если каждый экспериментальный факт требует новых, непредвиденных изменений в модели, то модель имеет ограниченную область применения.

Методические указания. Не пытайтесь здесь совершенно развенчать корпускулярную модель; оставьте ее в состоянии временного бездействия. Вам нужно лишь отметить, что для того чтобы она вновь «заработала», ее нужно усложнить. И действительно, физиками были даны объяснения частичного преломления света именно тогда, когда впервые возникли трудности с применением простой корпускулярной модели. Как теперь знают учащиеся, дифракцию тоже можно объяснить путем рассмотрения взаимодействия между частицами света и краями отверстия или щели.

Дифракция и интерференция — самые трудные явления для объяснения их в рамках корпускулярной теории, и здесь лучше на них не останавливаться. В главах 17 и 18 учащиеся больше узнают о дифракции и поймут, что сравнительно простая волновая модель способна легко объяснить эти явления. Раз существует простая волновая модель, вряд ли стоит заниматься сложной корпускулярной моделью, способной объяснить тот же круг явлений.

14.7. Скорость света и теория преломления

Ц е л ь. Показать, как была измерена скорость света и как физическое изменение может опровергнуть или изменить теорию.

С о д е р ж а н и е. а) Скорость света была измерена на основе использования стробоскопического принципа.

б) Скорость света меньше в той среде, показатель преломления в которой выше.

в) Скорость света в среде равна скорости света в вакууме, деленной на показатель преломления.

г) *Простая* корпускулярная модель света неадекватна.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Этот раздел может излагаться очень кратко в тех местах, где идет речь о корпускулярной модели. Если у вас есть время, вы, разумеется, захотите кратко обсудить вопрос о том, как измеряется скорость света.

После того как завершено изложение основных идей, представляется уместным обсудить устройство стробоскопа и некоторые простые вопросы кинематики установки.

Учащиеся обычно с интересом размышляют об измерении столь большой скорости, как скорость света. Чтобы удостовериться в их понимании, спросите, как быстро должно вращаться колесо Корню, чтобы первый максимум успел отразиться от дальнего зеркала. Если расстояние $d=23$ км, то путь света составит 46 км, и, полагая скорость света равной $3 \cdot 10^5$ км/с, можно прийти к выводу, что световой сигнал пройдет путь за $15,33 \cdot 10^{-5}$ с. Если имеется 200 щелей, то один оборот должен занимать время в 200 раз больше, т. е. $3,066 \cdot 10^{-2}$ с. Колесо должно делать 32,6 об/с (как мотор мощностью в несколько лошадиных сил). Но Корню наблюдал 28 максимумов, и его колесо вращалось в 28 раз быстрее.

Прибор Майкельсона имел только 8 граней, что эквивалентно 8 щелям (рис. 14. 9), но он мог вращать его еще быстрее и, кроме того, он использовал узкие щели для выделения светового пучка и установления направления. Поэтому он смог добиться очень высокой точности.

Вы можете спросить у учащихся, какой была минимальная скорость вращения зеркала Майкельсона. Путь света составляет 70,4 км. Следовательно, для прохождения этого пути свету требуется $2,35 \cdot 10^{-4}$ с. Так как это максимальное время одной восьмой оборота, то один оборот будет совершаться не более чем за $1,83 \cdot 10^{-3}$ с. Это соответствует минимальной скорости вращения зеркала 32 000 об/мин.

14.8. Роль корпускулярной модели

Ц е л ь. Обсудить вопрос об использовании моделей.

С о д е р ж а н и е. а) *Простая* корпускулярная модель оказалась несостоятельной.

б) Ее можно либо видоизменить, либо отбросить.

в) На очереди стоит корпускулярная модель, более сложная, чем наша.

Методические указания. Не следует рассуждать о неправильности нашей корпускулярной модели. Следует, очевидно, прямо указать, что это слишком простая модель. Вы можете добавить, что учащимся нужно хорошо изучить механику и поведение частиц, прежде чем они попытаются выдвинуть более сложную модель по сравнению с теми, с которыми они имеют дело на опыте. Не вводите в рассмотрение фотоэффекта и других явлений, требующих тех или иных корпускулярных моделей. Лучше приступайте к гл. 15, начав с вопроса: «Что еще движется, кроме частиц?»

ДОМАШНИЕ, КЛАСНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам

Имеется ряд задач, в которых учащимся предлагается спроектировать лабораторные опыты или обсудить предположения, связанные с описанными опытами. К задачам такого типа относятся задачи 19, 24, 25 и 27. Есть также задачи, в которых предлагается обсудить предсказания различных теорий света. К этой категории относятся задачи 7, 10, 12, 18, 26 и 28. Те из них, которые будут задаваться на дом, целесообразно обсуждать в классе.

В табл. 8 приведена классификация задач по степени трудности и по разделам, к которым они относятся, выделены задачи, подходящие для обсуждения в классе, а особо рекомендуемые задачи отмечены значком #.

ТАБЛИЦА 8

Разделы	Со звездочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
14.1	1		2		
14.2	3, 4	5#	6, 7		
14.3	8, 9, 14	13	10, #, 11, 12#, 16	15	10#, 12#
14.4		17			
14.5		19#	18	20	19#
14.6					
14.7	21, 29	27#, 28#	22#, 23—25	26	23, 27#, 28#

Краткие ответы

1*. Мяч для пинг-понга, имея меньший размер, отклоняется небольшими бугорками и ямками, которые не оказывают влияния на баскетбольный мяч.

3*. Скорость движения по нижней плоскости одинакова при всех углах падения.

4*. Скорость света в преломляющей среде должна быть больше, чем в вакууме.

8*. Нужно изолировать каждый в затемненной комнате, где нет отражений, и выяснить, дает ли каждый одинаковое показание при установке на заданном расстоянии от фотометра.

9*. При $r/\sqrt{2} = 0,71r$.

14*. 2 м.

21*. Свет успевает пройти через отверстие до удаленного зеркала и обратно через отверстие прежде, чем диск успеет повернуться на угол, достаточный, чтобы сместить отверстие.

29*. Корпускулярная теория предсказывает, что скорость света в воде должна быть больше, чем в воздухе, тогда как произведенные измерения показывают обратный результат.

Ответы с указаниями и решениями

2. Привлекая корпускулярную модель света, следует ограничиваться ее существенными чертами, не прибегая к точным аналогиям, скажем, со стальными

шариками или молекулами. Представим себе, что мы «стреляем» частицами в ящик, в котором вначале отсутствуют другие частицы (см. рис. 14.10). Так как частицы многократно отражаются от стенок, их число в ящике будет неуклонно расти. Однако по мере их накопления все большее их число будет случайно вылетать через отверстие наружу. После накопления достаточного числа частиц в ящике число вылетающих частиц сравняется с числом влетающих. Таким образом, мы предсказываем, что после накопления в ящике достаточного количества света из ящика будет выходить такое же количество света, какое в него входит, хотя и в виде менее концентрированного пучка.

Необходимо иметь в виду, что мы здесь имеем дело с крайне идеализированным случаем, в котором предполагается отсутствие поглощения света. Ввиду большого числа последовательных отражений света даже ничтожный процент света, поглощаемого при каждом отражении, резко снижает количество выпускаемого света.

Если стенки изготовлены из полированного серебра, они отражают 93% падающего света. Если длина ребра кубического ящика составляет 0,5 м, средняя длина пробега света может быть около 0,5 м. После 100 отражений (т. е. поглощений $0,93^{100}$ начальной энергии) интенсивность света ослабевает до величины порядка 10^{-4} от первоначальной, а после 1000 отражений она ослабевает до 10^{-42} . Одна тысяча отражений потребует прохождения светом пути около 500 м, на что свет тратит около 10^{-6} с. В общем реальный ящик выпустит через отверстие очень мало света.

5. Согласно корпускулярной теории скорость света в среде с показателем преломления n равна

$$v = nc = 1,63 \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с}) = 4,89 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Во время обсуждения задачи следует напомнить учащимся, что формула $v = nc$ вытекает из корпускулярного аналога опыта П.5. В зависимости от последовательности изложения корпускулярной модели света может понадобиться подчеркнуть, что полученный ответ неверен.

6. Цель этой задачи — показать непоследовательность корпускулярной модели в вопросе соотношения между скоростями распространения света и показателями преломления.

а) $n = (2 \cdot 10^8) / (3 \cdot 10^8) = 0,67.$

б) $\frac{2}{3} \sin r = \sin 30^\circ = \frac{1}{2}, \sin r = \frac{3}{4}, r = 49^\circ.$

7. Задача ставит вопрос ребром; учащемуся предлагается проанализировать простой факт, касающийся поведения света, с точки зрения модели.

а) Поскольку взрыв воспринимается как белый свет, а не последовательность разноцветных вспышек, то, предполагая одновременность послышки разноцветных сигналов, можно заключить, что скорость распространения света различных цветов в вакууме одинакова (с точностью, соответствующей временной разрешающей способности газа).

б) Корпускулярная модель дисперсии, согласующаяся с постоянством скорости для всех цветов в вакууме, могла бы основываться на существовании некоей неодинаковой для разных цветов силы, возникающей на границе среды, обладающей дисперсией. Эта сила должна по-разному ускорять частицы, соответствующие разным цветам.

10. Цель этой задачи — развить у учащихся навыки проверки моделей путем сравнения их с экспериментальными фактами.

В задаче предлагается принять, что, например, 200-ваттная лампочка испускает более крупные частицы, чем, скажем, 100-ваттная. Тогда придется принять одно из следующих предположений:

1. Снижение интенсивности после прохождения через поглощающие материалы и ее уменьшение, пропорциональное квадрату расстояния, обусловлены уменьшением числа частиц на квадратный метр в секунду и (или) уменьшением их размеров, т. е. освещенность определяется двумя факторами: размером и числом частиц.

2. Освещенность определяется только размером частиц и не имеет никакого отношения к числу частиц, падающих на квадратный метр в секунду. В таком

случае закон обратной пропорциональности квадрату расстояния следует приписывать лишь уменьшению размера частиц.

В первом предположении трудно усмотреть какую-либо логическую непоследовательность, хотя весьма странным представляется то, что две свечи, расположенные вдалеке друг от друга и излучающие частицы определенного размера, начинают вдруг излучать более крупные частицы, как только их сближают настолько, чтобы они образовали один, более сильный источник. В сущности это было бы настолько странно, что первое предположение следует отбросить.

Второе предположение должно быть сразу отброшено, так как если частицы уменьшаются в размере *со временем*, т. е. с удалением от источника, то почему при фокусировке лучей линзой пучок не только не уменьшает свою яркость, но, наоборот, становится ярче?

11. Основные предположения, допускающие применение закона обратных квадратов для определения расстояний до звезд, заключаются в следующем.

1. Закон обратных квадратов остается в силе и для больших расстояний, для которых он не может быть проверен экспериментально.

2. Между звездами и Землей отсутствует поглощение вещества (хотя в действительности некоторое количество «космической пыли» имеется).

3. Наименее правдоподобное предположение состоит в том, что звезды одинакового цвета имеют одинаковую силу света и что Солнце обладает такой же силой света, как и большинство других звезд.

4. В космосе справедлива евклидова геометрия.

12. Корпускулярная теория предсказывает, что самые слабые источники испускают настолько мало частиц, что свет воспринимается в виде отдельных импульсов. Этот аспект корпускулярной теории можно проверить, заставив свет от весьма слабого источника падать на чрезвычайно чувствительный фотометр и наблюдая значительные флуктуации показаний. Разумеется, и при отсутствии заметных флуктуаций мы не можем отрицать корпускулярную природу света. Подобный результат означал бы лишь то, что частицы света мельче ожидавшихся при постановке опыта. (Одним из интересных фактов, связанных с упомянутым «воображаемым» опытом, является то обстоятельство, что при визуальном наблюдении достаточно слабого источника света мы действительно можем считать отдельные «частицы» света *). Трудно согласовать это с волновой моделью света.

13. Это — легкая задача, основанная на применении закона обратной пропорциональности квадрату расстояния. Знание фотометрических единиц не требуется в вопросе п. а), но требуется в вопросе п. б).

а) $E = 40 \text{ св}/(0,9 \text{ м})^2 = K/(0,36 \text{ м})^2$, $K = (0,36/0,9)^2 \cdot 40 \text{ св} = 16 \text{ св}$,

б) $E = 40 \text{ св}/(0,9 \text{ м})^2 \approx 50 \text{ лк}$.

При обсуждении в классе важно упомянуть, что ответ по вопросу п. а) можно было бы с таким же успехом получить, если бы источник имел силу света не в 40 св, а в 40 «гизмов», причем никто не знает, что такое «гизм», кроме того, что «гизм» есть некая единица силы света.

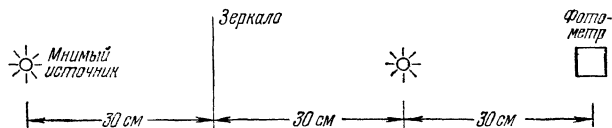


Рис. 85.

15. а) Плоское зеркало можно заменить мнимым источником, помещенным в 30 см за зеркалом (рис. 85). Тогда имеем для освещенности на фотометре:

$$E = 25 \text{ св}/(0,3 \text{ м})^2 + 25 \text{ св}/(0,9 \text{ м})^2 = 310 \text{ лк}.$$

б) Поскольку источник света находится в главном фокусе вогнутого зеркала (рис. 86), лучи после отражения идут параллельным пучком и образуют световой цилиндр диаметром в 15 см, причем освещенность от этого пучка не меняется с рас-

*) Такие наблюдения были впервые осуществлены в СССР академиком С. И. Вавиловым. (Прим. перев.)

стоянием, если пренебречь рассеянием и поглощением. При коротких расстояниях, фигурирующих в данной задаче, рассеяние и поглощение в чистом воздухе пренебрежимо малы. Таким образом, освещенность на пути этого цилиндрического пучка света равна освещенности на самом зеркале, т. е.

$$E = 25 \text{ св}/(0,3 \text{ м})^2 + 25 \text{ св}/(0,3 \text{ м})^2 = 550 \text{ лк.}$$

16. Интенсивность «света», падающего на удаленный предмет, пропорциональна $1/r^2$, т. е. $I = K/r^2$. Количество отражаемого им «света» пропорционально

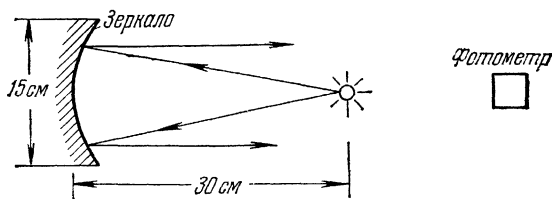


Рис. 86.

интенсивности падающего излучения. Таким образом, отражающий предмет становится источником с силой CK/r^2 . Но интенсивность «света», возвращающегося на радарную станцию, равна

$$I = (CK/r^2)/r^2 = CK/r^4,$$

что и следовало доказать.

17. Свет должен оказывать большее давление на зеркало, так как после отражения частицы света изменяют свое количество движения на обратное, а не просто увеличивают или уменьшают его в незначительной степени.

18. Корпускулярная теория объясняет это тем, что существуют частицы света, не обнаруживаемые глазом, которые преломляются призмой и нагревают термометр, помещенный за пределами видимого спектра.

19. а) Данный опыт показывает, что оконное стекло поглощает часть света. Тщательные опыты показали бы, что видимый свет поглощается или отражается этим стеклом слабее, откуда следует, что лампа излучает также некоторое количество «невидимого» света.

б) Поскольку известно, что стекло корекс пропускает некоторое излучение, задерживаемое оконным стеклом, следовало бы ожидать повышения температуры, начиная с 23°C . Поскольку, однако, стекло корекс должно все же в какой-то степени поглощать излучение, температура должна была бы быть ниже 26°C .

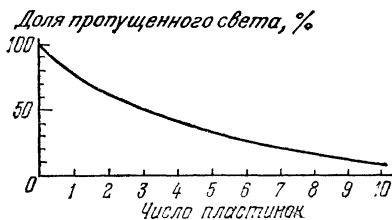


Рис. 87.

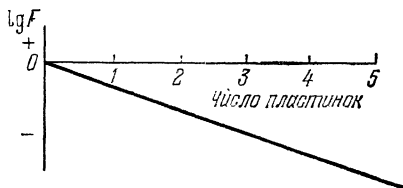


Рис. 88.

в) В правильности второго ответа в п. б) можно не сомневаться. Что же касается первого ответа в п. б), то относительно него нет полной уверенности, пока мы не знаем всех свойств стекла корекс. Хотя оно пропускает больше ультрафиолетового света, чем оконное, оно могло бы поглощать инфракрасный свет сильнее, чем оконное, но этого мы не знаем.

20. а) Если одна пластинка пропускает 80% света, то две пропустят $0,8 \cdot 0,8 = 0,64$ или 64%, а n пластинок пропустят $0,8^n$ света.

б) См. рис. 87.

в) $F = 0,8^n$, $\lg F = n \lg 0,8$ (рис. 88).

г) $0,1=0,8^n$, $-1=n(-1,0000+0,9031)$, $n=1/0,0969 \approx 10$ пластинок.

д) Отражение может сказываться по-разному.

1) Если 80% приведено с учетом потерь на отражение, то при устранении отражения все значения интенсивности пропущенного света увеличились бы, хотя качественная картина не изменилась бы.

2) Если 80% приведено с учетом потерь на отражение, но пластинки были бы прижаты друг к другу настолько плотно, что их соприкасающиеся поверхности претерпели бы слияние до оптической сплошности (что осуществимо), то потери на отражение от промежуточных поверхностей исчезли бы и интенсивность пропускаемого света возросла бы по сравнению со случаем обычного складывания пластин.

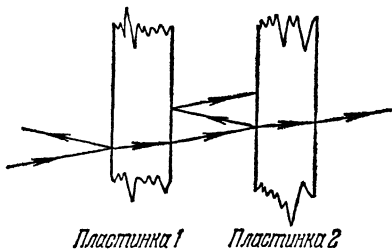


Рис. 89.

3) Если 80% приведено с учетом потерь на отражение, то все же возможен и другой эффект отражения. Положим, что от поверхности раздела «воздух — стекло» отражается 10%. Тогда из 80% света, пропущенного первой пластинкой, 10% отражается второй пластинкой обратно (рис. 89). Из этого количества 10% отражается первой пластинкой вперед, т. е. дополнительный свет, падающий на

вторую пластинку, составляет 1% от 80%. Вторая пластинка пропускает 80% этого дополнительного света. Таким образом, в дополнение к 0,8·0,8 света, пропускаемого двумя пластинками, благодаря двукратному отражению пропускается еще $0,1 \cdot 0,1 \cdot 0,8 \cdot 0,8$, так что поправка составляет 0,01 от 64% или около 1%. В результате этого при откладывании логарифма пропускаемой интенсивности в функции числа пластинок не получится прямой линии.

22. В разделе 14.7 указывается, что стробоскоп Корню имел 200 отверстий и вращался с угловой скоростью 54 000 об/мин. Время одного оборота равно

$$1/(5,4 \cdot 10^4) \text{ мин} = (6/5,4) \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Время 1/200 оборота равно $(6/1,08) \cdot 10^{-6} \text{ с.}$ Расстояние, проходимое за это время светом, составляет

$$(1,8 \cdot 10^8)/1,08 \text{ м} = 1,67 \cdot 10^3 \text{ м.}$$

Расстояние до зеркала равно

$$(1,67 \cdot 10^3)/2 = 8,33 \cdot 10^2 \text{ м} = 833 \text{ м.}$$

23. $t=d/v=(2 \cdot 10^4 \text{ м})/(3 \cdot 10^8 \text{ м/с})=2/3 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$ Угол поворота зеркала за это время составляет

$$500 \text{ об/с} \cdot 360^\circ/\text{об} \cdot (2/3 \cdot 10^{-4} \text{ с}) = 12^\circ.$$

Когда зеркало поворачивается на 12° , на такой же угол поворачивается и нормаль. Поэтому как угол отражения, так и угол падения изменяется каждый на 12° . Таким образом, угол между начальным и конечным отраженными лучами равен 24° (рис. 90).

24. Вместо использования одного неподвижного зеркала, можно было бы заставить луч света претерпеть 100 отражений от зеркал до возвращения к зубчатому колесу. Это позволило бы выяснить, уменьшается ли скорость света в результате отражений. Существует много вариантов (некоторые из них весьма остроумны), позволяющих усовершенствовать этот метод, но затрата классного времени на их обсуждение нецелесообразна.

25. Для проверки гипотезы о независимости скорости света в вакууме от предшествующих преломлений можно заставить свет претерпеть ряд актов преломления прежде, чем он *впервые* пройдет через зубчатое колесо.

26. Звук не может состоять из частиц, испускаемых источником и воспринимаемых ухом. Это следует из того, что звук не распространяется в вакууме.

Другой путь опровержения корпускулярной модели звука мог бы состоять в изготовлении ящика и экрана из воображаемого материала, полностью поглощающего звук. Подобный ящик не пропускал бы наружу звук от заключенного в нем источника, но экран позволял бы звуку огибать себя. Если бы звук состоял из частиц, последний результат мог бы иметь место только при условии, что эти частицы рассеиваются воздухом. Но если бы это было так, то звук быстро поглощался бы воздухом.

Дополнительная проверка могла бы заключаться в выяснении, подчиняется ли звук закону обратных квадратов, отражается ли и преломляется ли он в соответствии с корпускулярной теорией и оказывает ли он давление.

В действительности звук способен огибать препятствия. Например, шум от грузовика слышен за домом. Это опровергает корпускулярную модель. Учащимся, возможно, известно, что репродуктор для верхних частот в приемнике с высокой точностью воспроизведения расположен так, что он обращен к слушателю, тогда как репродуктор для нижних частот может иметь любую ориентацию. Это доказывает, что по крайней мере низкие тона не всегда распространяются прямолинейно.

27. Карманный электрический фонарик, положенный на чашку чувствительных весов, не обнаруживает непрерывной потери веса во время горения лампочки.

Кроме того, если бы световые частицы обладали значительной массой, они обладали бы большой инерцией, и свет, падающий на предметы, толкал бы их.

28. Если бы это замедление обуславливалось трением *внутри* среды, то скорость света в воздухе или стекле не была бы постоянной. Например, скорость в стекле зависела бы от того, какой путь в стекле свет уже прошел.

Если же предположить существование некоего трения, проявляющегося только на поверхности вещества, но не внутри него, то следовало бы признать существование некоего отрицательного трения, подгоняющего свет при переходе в менее плотную среду. Иначе, при возвращении из какой-либо среды в вакуум, свет замедлялся бы еще больше и преломлялся бы по направлению к нормали, а не от нее. Мы знаем, что скорость света в вакууме постоянна и не зависит от того, где он до этого распространялся. Мы знаем также, что при выходе в вакуум из другой прозрачной среды свет преломляется по направлению от нормали.

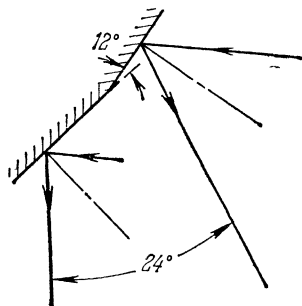


Рис. 90.

В первой половине части II курса рассматривались некоторые главные особенности поведения света и сделан первый шаг в построении модели, описывающей это поведение. Показано, что простейшая модель световых частиц является неадекватной.

Во второй половине части II рассматривается другая модель — волновая. Эта модель должна описывать распространение света в воздухе, вакууме, стекле и воде, содержать законы отражения и преломления, охватывать невзаимодействие пересекающихся световых лучей, предсказывать наблюдаемую скорость света в различных средах, и, наконец, она должна объяснить явление дифракции. В последних четырех главах части II исследуются характеристики волн и их применимость в качестве модели света.

Если некоторых учащихся мало беспокоит «построение модели», а затем ее отбрасывание», это является хорошим признаком освоения ими предмета; жизнь показывает, что модели отбрасываются с трудом. Модель солнечной системы Птолемея продержалась столетия после того, как ее несоответствие действительности было ясно показано. Во всяком случае, у учащихся не должно сложиться убеждение, что с помощью волн мы получим «правильную» модель. С помощью волн мы делаем следующий шаг в построении модели света. В части IV мы возвратимся к этой проблеме, чтобы показать, что, согласно установившимся представлениям, концепции частицы и волны должны быть скомбинированы.

Учащиеся вполне знакомы с кинематикой частиц. Они наблюдали, как различные шары, мячи и многие другие объекты ускоряются, замедляются, сталкиваются, отскакивают и разлетаются на части. Но их знания о волнах почти наверняка отрывочны. Правда, они прыгали через веревочку, возможно, натягивали веревку для сушки белья, наблюдали рябь на поверхности пруда и видели волны, бегущие по морю. Однако вряд ли кто-нибудь из них наблюдал эти явления достаточно прилежно, чтобы получить хорошее общее представление о природе волнового движения. Таким образом, при прохождении материала глав 15—18 как на занятиях в классе, так и во время лабораторных занятий важно терпеливо вырабатывать представления о волнах на конкретных примерах, которые можно наблюдать и рассматривать. Это создает прочное основание для концепции световых волн.

В гл. 15 вводятся общие характеристики волнового движения на простых и конкретных примерах. В этой главе рассматривается импульс на спиральной пружине (участок волны, движущийся только в одном направлении).

Гл. 15 должна быть тщательно проработана, так как она составляет основу для понимания остального материала части II. Из многих интересных тем

этой главы основной упор следует сделать на такие темы, как суперпозиция и отражение. Они весьма существенны для последующей работы.

Изучение гл.15 (и остального материала части II) сильно зависит от работы в лаборатории. Если у вас есть соответствующие возможности, желательно потратить лишнее время в лаборатории. Если число часов в неделю, отводимых на лабораторные работы, ограничено, вам, вероятно, придется компенсировать их недостаток с помощью классных демонстраций.

Краткое содержание главы 15

Волна есть нечто распространяющееся и при этом не обязательно увлекающее за собой вещество в своем движении.

Импульс, движущийся вдоль спиральной пружины, сохраняет свою форму при движении. Импульс движется вдоль пружины, но точки пружины движутся перпендикулярно к направлению движения импульса.

Когда два импульса пересекаются, смещение равно сумме смещений в отдельных импульсах.

Когда импульс достигает новой среды (такой, как более тяжелая или более легкая пружина или фиксированная опора), часть его может пройти дальше, а часть может отразиться. Что происходит в действительности, зависит от относительных свойств этих двух сред.

При анализе многих физических явлений необходимы и полезны идеализации. Иллюстрирующим примером этого является анализ волн.

Волновая модель может быть принята для света.

План изучения главы 15

В табл. 9 предлагаются возможные варианты планирования времени при изучении материала этой главы, согласующиеся с общим планом проработки всей части II (см. Введение, стр. 194).

ТАБЛИЦА 9

Глава 15	9-недельный план изучения части II			14-недельный план изучения части II		
Разделы	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты
15.1—15.3	1	0	—	2	0	—
15.4—15.6	1	1	II 6	2	1	II.6

Дополнительные материалы к главе 15

Лаборатория. В опыте II.6 (*Волны на спиральной пружине*) используется спиральная пружина, о которой идет речь в тексте Учебника, так что учащимся предоставляется возможность наблюдать поведение импульса из первых рук. Если позволяет планирование, эксперимент может быть проведен в два приема: 1) распространение и суперпозиция импульсов; 2) отражение. Если обе части выполняются вместе, его надо запланировать около середины главы.

Домашние, классные и лабораторные задания. Ответы, решения и таблицу относительной трудности задач см. на стр. 295.

15.1. Волна как новая форма движения

Ц е л ь. Выработать у учащихся качественное представление, что возмущение может распространяться, и ввести понятие о волновом импульсе (который легче изучать и анализировать, чем периодическую волну) как о волне малой длительности.

С о д е р ж а н и е. Волна представляет собой возмущение, которое распространяется, не обязательно увлекая за собой какое-либо вещество. Некоторые волны являются периодическими, но одиночные импульсы также могут быть волнами.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Этот раздел прорабатывайте тщательно. Многие учащиеся убеждены, что волны должны быть периодическими (т. е. повторяющимися). Удостоверьтесь, что они поняли, что импульсы являются волнами, так как они скоро будут изучать поведение волн на примере импульсов.

Некоторые учащиеся могут придираться к таким утверждениям, как «каждая капля воды остается там, где она покоилась до возмущения...» Учащиеся должны понять, что это идеализация, к которой можно весьма тесно приблизиться. Волны, омывающие берег, и волны, настолько высокие, что они обрушиваются, представляют собой случаи, когда вода переносится на короткие расстояния. Это те случаи, которые не очень близки к обсуждаемой идеализации. Однако даже в этих случаях частицы воды переносятся лишь вдоль небольших отрезков полного пути, проходимого волной.

Хорошее классное обсуждение этого раздела может быть сконцентрировано вокруг задачи 2. Попросите учащихся дать примеры того, как они могли бы передать сообщение из одной точки в другую, и указать, какие из них связаны с переносом массы и какие — с волновым движением. Часть этих примеров потребует обсуждения, прежде чем вы сможете решить, к какой категории они принадлежат. (Некоторые учащиеся на поймут, что означает «перенос массы», пока вы не объясните, что под этим просто подразумевается то, что какое-нибудь тело переходит из начальной точки в конечную.)

Определенные возражения могут быть выдвинуты в связи с тем, является ли данное предложение примером переноса массы или волновым движением. Поощряйте разумный спор, потому что многие учащиеся упустят весь смысл этих категорий, если им не станет ясно, что решающим является вопрос о механизме. Например, если выдвинуто предложение открыть банку с кофе и предоставить возможность распространяться его аромату, то прежде чем принять решение, нужно понять, что представляет собой запах и как он передается. Если известно, что какие-то газообразные молекулы высвобождаются из кофе и в конце концов достигают носа, передача запаха принадлежит к переносу массы. Но если бы мы постулировали (неправильно), что запах вызывается специальными колебаниями, возбуждаемыми в молекулах воздуха и передающимися от молекулы к молекуле (подобно звуку), перенос запаха представлял бы собой волновое движение.

Другой пример, который может быть либо передачей частиц, либо волновым движением, дает струна, натянутая между двумя окнами. Если вы туго натяните ее и ущипнете у одного конца, то возникновение колебаний на другом конце будет иметь место, очевидно, благодаря волновому движению. Ну а если вы втянете струну на 60 см в ваше окно, тем самым смотав 60 см ее с катушки в другом окне? Это выглядит до некоторой степени как перенос массы, хотя ни один отрезок струны не перешел непосредственно из одного окна в другое. Не позволяйте учащимся тратить время в случаях, подобных этому, на споры о том, какая из категорий яв-

ляется лучшей. Эти две категории не достаточно хорошо определены! Учащиеся научились тому, чему их хотели научить, и могут переходить к другим предложениям или к другим видам классной работы.

Пример, который может позабавить ваш класс, представляет длинная тонкостенная резиновая трубка, у которой при наблюдении с некоторого расстояния заметна небольшая область увеличенного диаметра, движущаяся вдоль нее. Это вздутие обычно служит примером волнового движения (если только вам не известно, что это вздутие вызвано каким-то животным, бегущим вдоль трубки внутри нее!). Было бы слишком произвольно решать, является это волной или нет, если бы было известно, что возмущение вызывается бегущим внутри животным.

Некоторые учащиеся почти наверняка предложат световую сигнализацию для передачи сообщений. Если она будет предложена слишком рано, отнесите ее временно к «сомнительной» категории. Когда вы наберете достаточно примеров, вернитесь к классификации света. Если учащиеся уловили общую идею этого раздела, они должны понять, что курс еще не дает им достаточно информации для принятия решения. Поскольку в курсе до сих пор не было обнаружено световых частиц и поскольку мы как раз начинаем исследовать волны, вы можете поместить свет в категорию волн (под вопросом). С другой стороны, если бы простая модель частиц была принята нами, или была бы построена более сложная теория, базирующаяся на частицах, свет мог бы принадлежать к категории переноса массы. Колебания в вопросе о том, к категории каких же явлений принадлежит свет в действительности, являются одной из причин, побуждающих к дальнейшему изучению волн.

Некоторые учащиеся могут прийти к убеждению, что волна не может включать перенос массы. Они будут меньше путаться если вы укажете, что иногда (безотносительно к волновому движению) происходит некоторый перенос массы. Обычным примером является доска, несомая прибойной волной (популярное развлечение на Гавайях). Доска явно движется, но волны существовали бы и в том случае, если бы никакой доски не было. Доска переносится волнами, но она не является причиной распространения волн.

Ваши учащиеся могут быть слегка удивлены широким разнообразием явлений, называемых волнами. Они понимают (правильно), что все характеристики, наблюдаемые у волны начинающих движение автомобилей, не следует переносить на волны, бегущие по струне, и т. д. Было бы неразумно подробно останавливаться на том, какие волны имеют общие характеристики.

На этой стадии мы не определяем волну. Часто термин «волна» используем для обозначения широкого класса явлений, которые удовлетворяют одному и тому же дифференциальному уравнению — волновому уравнению. Мы не можем дать учащимся волновое уравнение, так же как мы не можем его обсуждать. Вместо этого мы выбираем простые системы, в которых выполняется волновое уравнение, и наблюдаем за поведением этих систем. На данной стадии нам нужно рассмотреть только то свойство волны, которое позволяет передать сигнал, не посылая материальные частицы.

Если вы не будете сразу же выбирать различные примеры, у учащегося может создаться впечатление, что волнам всегда нужна среда, сквозь которую они могли бы распространяться. Самыми наглядными примерами волновых движений являются те, в которых волна бежит в явно видимой среде; каждый может видеть, как один конец шнура движется вверх, тянет за собой соседнюю часть и, таким образом,

распространяется волна. Следовательно, учащиеся, весьма вероятно, будут связывать волну со средой, в которой волна движется. С наибольшей легкостью они могут представить себе механическую волну, распространение которой зависит от упругих свойств среды. В конце концов, однако, они должны будут столкнуться с идеей, что свет представляет собой волновое движение без видимой среды.

Один из способов избежать переоценки роли среды состоит в тщательном выборе выражений. Фраза вида «мы можем видеть, как возмущение движется вдоль веревки», вероятно, лучше, чем «каждый участок веревки, который возмущен, в свою очередь возмущает соседний, давая начало импульсу, движущемуся по веревке». Упор на объяснение распространения (или динамики волнового движения) может привести к переоценке учащимися важности среды.

Другой путь борьбы с переоценкой важности среды, в которой бежит волна (помимо простого предупреждения в классе, что волновые явления могут иметь место в отсутствие среды), состоит в том, чтобы привести примеры, в которых среда отсутствует. Учащиеся легко воспримут мысль, что если вы повернете маленький намагниченный стержень на 180° , то потребуется некоторое время, прежде чем действие этой новой ориентации будет обнаружено в удаленной точке. (Нет нужды упоминать, что скоростью сигнала в этом случае является скорость света. Единственный существенный факт — что имеется конечная скорость — скорее всего будет воспринят учащимися без дальнейших деталей.) Рассмотрим намагниченный стержень, который поворачивают в непосредственной близости от вакуумной камеры. Если бы в различных точках внутри вакуумной камеры были расположены маленькие изолированные компасные стрелки, каждая из них начала бы поворачиваться в тот момент, когда до нее дойдет «известие» о повороте магнита, т. е. проявится его действие в новом положении. Такой импульс «осведомленности», или импульс «возможной осведомленности», который распространялся бы в вакууме, служит подходящим примером волны, движущейся в отсутствие среды.

15.2. Волны на спиральных пружинах

Ц е л ь. Создать основу для изучения волн.

С о д е р ж а н и е. а) Импульс движется вдоль пружины без искажений с постоянной скоростью.

б) Движение точек пружины совершенно отлично от движения волны.

в) Графические изображения импульсов являются приближенными. У реальных импульсов никогда не бывает очень острых углов (или «резких» изменений крутизны).

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Материал этого раздела проработайте по возможности подробнее. Для учащихся важно уяснить с помощью непосредственных наблюдений точную картину волнового движения. Содержание раздела, включая различие между движением и формой волны и движением частиц пружины, должно быть ясно понято. Особенно полезны демонстрации, решение задач и лабораторная работа.

Нежелательно обсуждать сколько-нибудь детально динамику волнового движения вдоль пружины. Учащиеся могут спросить, как один участок пружины действует на следующий, но им придется смириться с фактом, что вряд ли можно надеяться понять это количественно, прежде чем они узнают, как силы влияют на движение (в части III).

Почти наверняка возникнет вопрос о продольных волнах. Учащиеся либо подумают о них, либо увидят их на спиральной пружине. Для класса в целом лучше

всего, вероятно, придерживаться поперечных волн, объяснив, что продольные волны являются просто другим типом волнового движения, которого мы пока не будем касаться.

Следует продемонстрировать импульсы на спиральной пружине (или на шнуре, или резиновой трубке) и дать возможность учащимся поработать с ними в лаборатории. На опыт 11.6 рекомендуется потратить два раза по полурока в течение изучения этой главы. Если это невозможно, надо посвятить этому один полный урок, когда будет пройдена уже половина главы. (Подробное описание пружины, подвешенной на нитях, см. в Приложении 5 на стр. 391. Если вы подвесите спиральную пружину, ее желательно не снимать до тех пор, пока вы не используете ее во Введении к гл. 17.)

Вы можете разъяснить большую часть материала этого раздела с помощью детального обсуждения в классе рис. 15.3 и 15.4. Чтобы как следует понять суперпозицию волн в следующем разделе, учащимся важно понимать разницу между *фотографией* (или рисунком) волны и *графиком* какого-нибудь свойства волны. Учащиеся могут испы-



Рис. 91.



Рис. 92.

тывать некоторые затруднения в этом вопросе, так как графики на рис. 15.3 и 15.4 очень похожи на соответствующие изображения волны. Вы можете помочь учащимся выяснить это различие с помощью следующих примеров.

Если рис. 91 представляет собой изображение волны, распространяющейся вдоль пружины, то на этом рисунке было бы неправильно проводить горизонтальную ось, так как пружина не может находиться в двух местах одновременно. Строя график этой волны, мы можем выбрать любой масштаб по вертикали и по горизонтали, подходящий для наших целей. Мы можем построить график, который выглядит так, как показано на рис. 92. Заметим, что мы откладываем на графике



Рис. 93.

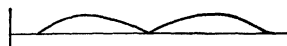


Рис. 94.

смещение из «нулевого положения» в зависимости от горизонтального расстояния вдоль пружины. В другом случае мы можем наблюдать за одной точкой пружины и строить график зависимости ее смещения от времени. Оба графика («смещение — расстояние» и «смещение — время») до некоторой степени маскируют суть дела, так как они имеют ту же самую общую форму, что и сама волна. Если учащиеся все еще испытывают трудности с их различением, вы можете заметить, что если бы волна выглядела так, как показано на рис. 93, то график зависимости абсолютной величины смещения от расстояния в этой волне выглядел бы примерно так, как на рис. 94. Теперь разница в форме должна быть ясна.

Учащиеся должны рассматривать рис. 15.1 и 15.2, так же как и последующие подобные рисунки, в качестве основных экспериментальных данных. Изучение этих рисунков должно быть подобно производству тщательных наблюдений в

лаборатории. Можно отметить следующие моменты при обсуждении этих рисунков или некоторых из задач.

1. Разъясните совершенно отчетливо, что рис. 15.3 и 15.4 представляют собой идеализированные графики смещения точек на пружине из их нормального положения (отложенного по вертикали) в функции положения каждой из этих точек вдоль пружины (отложенного по горизонтали). Если есть возможность, используйте мелки разного цвета для осей и для кривых. Отрезок оси под кривой иногда является источником путаницы. Некоторые учащиеся ошибочно принимают прямолинейную ось за пружину.

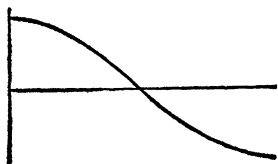


Рис. 95.

2. Спросите учащихся, действительно ли графики на рис. 15.3 и 15.4 выглядят так же, как мгновенные кадры на рис. 15.1 и 15.2? Они должны понимать, что действительный импульс не имел бы острого угла. (Невозможно создать реальный импульс, у которого наклон менялся бы столь круто.) Острые изломы используются просто в качестве приближения, удобного для предварительного изучения.

3. Коль скоро вы установили, что вы работаете с аппроксимациями, вы сможете более свободно давать учащимся примеры треугольных и других «спрямленных» импульсов, с которыми они смогут проще работать (примеры позднее).

4. Что показывает среднюю скорость каждой точки на рис. 15.3 и 15.4? — Стрелки. Их направление указывает направление движения участков пружины, а их длина пропорциональна скорости. В качестве необязательного задания (его желательно отложить до тех пор, пока способные учащиеся не попытаются самостоятельно решить задачу 13) можно предложить построить график зависимости скорости (с учетом направления) отдельных точек пружины на рис. 15.3 от горизонтального расстояния. Он выглядел бы подобно представленному на рис. 95. Практика в построении подобных графиков пригодится при решении задачи 13.

5. Что такое скорость волны? Удостоверьтесь, что учащиеся понимают, что: 1) сама волна должна обладать единственной скоростью, в противном случае менялась бы ее форма; 2) направление *скорости волны* отличается от направления движения отдельных точек пружины; 3) величина волновой скорости не зависит непосредственно от скоростей частиц; если бы смещение каждой точки было удвоено, то удвоились бы и скорости частиц, однако скорость волны осталась бы при этом неизменной (или почти неизменной).

6. Почему имеет место кажущееся скачкообразное изменение скорости на краях импульса, представленного на рис. 95? Наблюдается ли скачок скорости (или размытие) на рис. 15.1 и 15.2? Имело бы место скачкообразное изменение, если бы вместо рис. 15.3 график смещения имел закругленные углы?

7. Непременнo включите (либо во время предварительного обсуждения, либо теперь) некоторое количественное рассмотрение. Пример, который может быть использован, приведен на рис. 96, где показан волновой импульс, распространяющийся вдоль пружины со скоростью 100 м/с. Если учащиеся возражают против столь сложного импульса, напомните им, что это идеализация. Возможно, «реальный» импульс выглядел бы, как на рис. 97. Заметьте также, что это не рисунок, а график; масштабы по вертикали и по горизонтали различны.

Сначала рассмотрите проблему качественно. Задайте вопросы относительно точек *A, B, C, D, E* и *F* на рис. 96. Какие из них движутся вверх, вниз или не-

подвижны? Многие учащиеся ответят сразу же. Для других придется построить штриховой линией положение импульса по прошествии 0,002 с. (На этой качественной стадии рассмотрения нет необходимости указывать число 0,002.) Сразу же должно стать ясно, что точки *A*, *C* и *F* остаются на месте и, следовательно, их скорость равна нулю. Точка *B* за эти 0,002 с смещается вниз, и поэтому ее

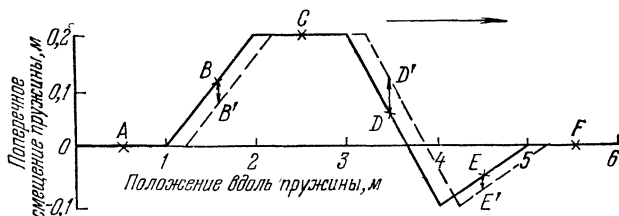


Рис. 96.

скорость направлена вниз. Точка *D* движется вверх к точке *D'*, и поэтому ее скорость направлена вверх. Переход *E* к *E'* показывает, что *E* движется вниз.

Затем можно спросить, какие точки движутся быстрее всех. Из чертежа должно быть ясно, что быстрее всех за данные 0,002 с движется точка *D*, затем *B*, а *E* смещается на наименьшее расстояние — исключая, конечно, те точки, которые остаются в покое.

Следующий вопрос уже количественный. Какова скорость точки *D*? Чтобы на него ответить, обратимся к графику в увеличенном масштабе (рис. 98).

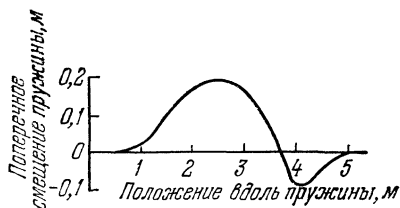


Рис. 97.

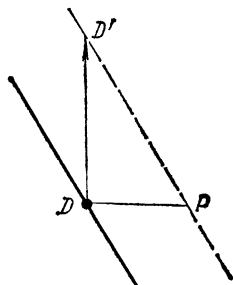


Рис. 98.

В течение данного интервала времени точка *D* проходит расстояние *DD'*, тогда как волна проходит расстояние *DP*. В нашем частном случае расстояние *DP* равно $0,002 \text{ с} \cdot 100 \text{ м/с} = 0,2 \text{ м}$. Обращаясь к первоначальному графику, легко видеть, что $DD'/DP = 0,3 \text{ м/}0,2 \text{ м}$. Следовательно, $DD'/DP = 0,3$, $DD' = 0,3 \cdot 0,2 = 0,06 \text{ м}$. Поскольку это перемещение происходит за 0,002 с, точка *D* движется со скоростью $0,06 : 0,002 = 30 \text{ м/с}$. Мы можем проделать то же самое для точек *B* и *E*, получая 20 и 10 м/с соответственно.

Теперь пора указать, если этого еще не сделал кто-нибудь из учащихся, что целый участок пружины от 1 до 2 м движется со скоростью точки *B*. Отрезок от 2 до 3 м целиком покоится, и т. д. (рис. 99). Теперь можно построить график зависимости скорости отрезков пружины от положения вдоль пружины. График, приведенный на рис. 99, является разрывным. Это получилось потому, что

наша волна имела резкие изломы. У реальных волн таких изломов не бывает, так что этот график скорости в практическом случае может выглядеть так, как показано на рис. 100.

Необходимо иметь в виду следующее замечание относительно скорости поперечных волн на пружине. Нет никакой необходимости давать учащимся аналитическое выражение для скорости волны, бегущей вдоль пружины. Они еще недостаточно знакомы с механикой, чтобы разобраться в единицах. Однако соответствующая формула может оказаться полезной, если учащиеся проделали дополнительную работу в лаборатории по измерению скоростей с целью выяснить качественно, от чего зависит скорость волны v . Эта скорость v дается выражением

$v^2 = \text{натяжение} / \text{масса на единицу длины}$. Отсюда видно, например, что волна в спиральной пружине (большая масса и

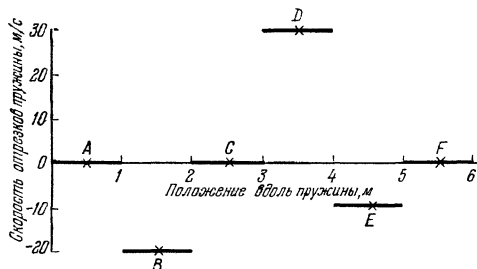


Рис. 99.

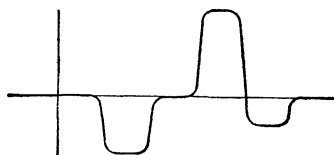


Рис. 100.

малое натяжение) движется медленно. Если натяжение выражено в ньютонах, а масса на единицу длины — в килограммах на метр, скорость получается в метрах на секунду.

В приведенном выше выражении для скорости волн на пружине предполагалось, что пружина является абсолютно гибкой и упругой. Более того, амплитуда волны предполагается достаточно малой, так что локальное натяжение в области волны равно натяжению во всех остальных участках пружины. (Если бы растяжение было настолько значительным, что увеличило бы локальное натяжение, то скорость была бы наибольшей в местах наибольшего растяжения, и волна не могла бы сохранять свою форму.)

Насколько это возможно, желательно избежать обсуждения вопроса о том, почему волна движется именно таким образом. Чтобы такое обсуждение имело смысл, учащиеся должны обладать более основательным знанием механики. Для сведения преподавателя общие положения волновой динамики включены в Приложение 6 на стр. 393.

15.3. Наложение волн. Пересечение импульсов

Ц е л ь. Представить принцип суперпозиции.

С о д е р ж а н и е. Результирующее смещение любой точки, в которую приходит несколько независимых импульсов, равно алгебраической сумме смещений, которые имели бы место от каждого импульса в отдельности. В этом состоит принцип суперпозиции — фундаментальное свойство того, что физики называют волнами.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Учащиеся должны усвоить принцип суперпозиции для смещений, чтобы понять интерференцию в волновых кюветах (и, таким образом, интерференцию света). Однако если у вас есть время, желательно

но расширить изучение этого раздела (и главы) и включить суперпозицию скоростей.

При обсуждении схем и конструкций с суперпозицией, таких, как приведенные на рис. 15.6, 15.8 и 15.9; вероятно, стоит удостовериться путем проверки в понимании учащимися того, что штриховые линии представляют смещение, которое наблюдалось бы, если бы каждый импульс распространялся в отдельности. Если сделать фотографии в лаборатории, мы никогда не увидим на них те части, которые показаны на рис. 15.6 штриховыми линиями. Напомните об этом несколько раз, когда будете разбирать на классной доске наложение волн.

Попросите какого-нибудь учащегося объяснить рис. 15.8, б, чтобы посмотреть, насколько хорошо он усвоил принцип суперпозиции и разницу между графиком импульса и его фотографией. Удостоверьтесь, что класс понял, что штриховые кривые являются графиками смещений, которые вызываются отдельными импульсами. Фотография пружины в момент, изображенный на рис. 15.8, б, представляла бы собой просто горизонтальную линию.

Возможно, что при анализе рис. 15.7 учащиеся заинтересуются, проходят ли два равных импульса друг сквозь друга или они просто отскакивают друг от друга. Рис. 15.5, на котором показано, как два импульса разной формы как будто бы проходят один сквозь другой, не решает вопрос: невозможно сказать, действительно ли маленький импульс «проникает» сквозь большой, или же он отскакивает, выбывая из большого равный себе импульс. В общем случае, когда происходит наложение двух волн, никакая часть комбинированной волны не описывает ни одну из первоначальных волн. Следовательно, когда эти две волны снова разделяются, бессмысленно устанавливать их былую принадлежность.

Понимание этого особенно важно в отношении волн вещества (см. разделы 33.8—33.10). Когда налагаются две волны, описывающие движение двух электронов, комбинированная волна описывает оба электрона, но никакая ее отдельная часть не описывает ни один из них. Таким образом, когда эти волны налагаются, отдельные электроны теряют свою индивидуальность, и когда они разлетаются снова, мы не можем сказать, что электрон, движущийся, например, направо, — это тот же самый электрон, который двигался направо до столкновения (до суперпозиции).

Волны, описывающие две различные частицы (скажем, электрон и протон), не перекрываются, а ведут себя как две отдельные волны на различных спиральных пружинах.

Качественное восприятие принципа суперпозиции в применении к скоростям позволит учащимся глубже понять рис. 15.7 и относящийся к нему текст Учебника. Учащиеся, которые упустили то обстоятельство, что размытие некоторых участков на рис. 15.1, 15.2 и 15.5 показывает высокую скорость их движения, могут не понять, что спиральная пружина на пятом сверху кадре рис. 15.7 практически находится в несмещенном состоянии. Больше того, знакомство с суперпозицией скоростей поможет при решении задач 11, 13 и 14.

Модель частиц предсказывает, что свет производит давление. Тот факт, что волны также производят давление, может быть продемонстрирован с помощью пружинного подвеса. Поместите отрезок картонной трубки около двух дюймов в диаметре и длиной шесть дюймов внутрь пружины и произведите встряхиванием несколько импульсов. Каждый раз, когда импульс достигает трубки, она будет немного смещаться по направлению от источника. Когда она приблизится к

фиксированному концу, ее движение замедлится, так как отраженные импульсы будут толкать ее в противоположном направлении. Если возбудить стоячие волны, трубка не будет двигаться, так как толчки балансируются, когда волны движутся по пружине в обоих направлениях.

Следующие демонстрации помогают учащимся лучше понять отражение от свободного и фиксированного концов пружины (их желательно ставить после вы-



Рис. 101.

полнения опыта II.6). Зеркала, используемые в этих демонстрациях, должны иметь площадь, равную по крайней мере 30×30 см.

1. Держите плоское зеркало у конца пружины так (рис. 101), чтобы учащийся, встряхивающий пружину, мог видеть ее отражение в зеркале. Когда он посылает импульс, кажется, что этот импульс входит в зеркало, а его отражение выглядит как выход из зеркала и последующее распространение по пружине. Поведение

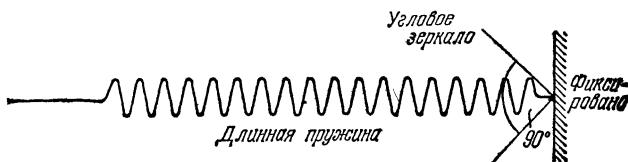


Рис. 102.

пружины в месте соединения будет таким же, как если бы два одинаковых импульса с разных сторон встретились на зеркале. Длинная нить имитирует свободный конец.

2. Угловое зеркало с углом 90° держите у фиксированного конца пружины, как показано на рис. 102. Каким будет поведение пружины в случае закрепленного конца? Этот тип зеркала подробно обсуждается в задаче 9 гл. 16.

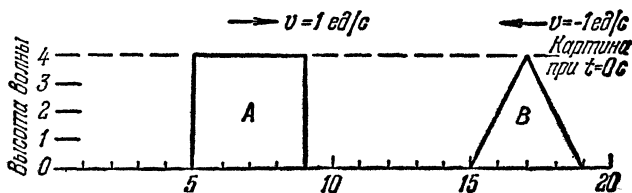


Рис. 103.

Описанные демонстрации позволяют учащимся нарисовать поведение импульса в последовательные моменты времени при свободном и фиксированном концах пружины с помощью принципа суперпозиции.

Дайте возможность учащимся попрактиковаться как в рассмотрении волнового движения, так и суперпозиции с помощью изображения двух волн простой формы (прямоугольной, треугольной или смешанной) и задайте вопросы следующего характера. Если бы мы имели только импульс A (рис. 103), какова была бы форма

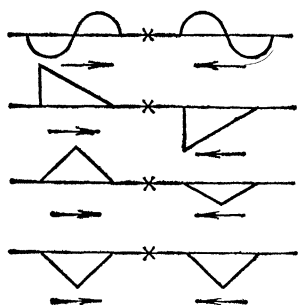


Рис. 104.

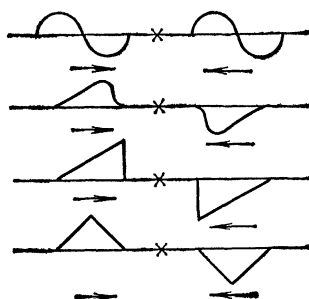


Рис. 105.

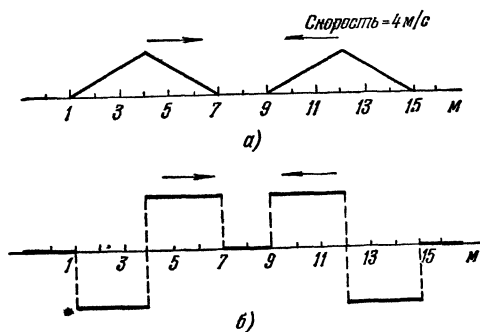


Рис. 106.

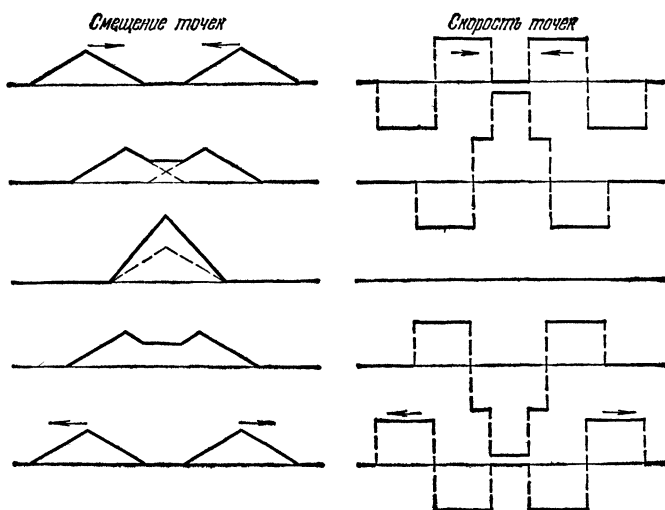


Рис. 107.

пружины через 1 с? Через 2 с? Через 10 с? Если бы мы имели только импульс B , какова была бы форма пружины через 1 с? Через 2 с? Через 5 с? Через 10 с? Если бы присутствовал только импульс A , где была бы точка с горизонтальной координатой 12 через 2 с? Если бы присутствовал только импульс B ? Если бы присутствовали оба? и т. д.

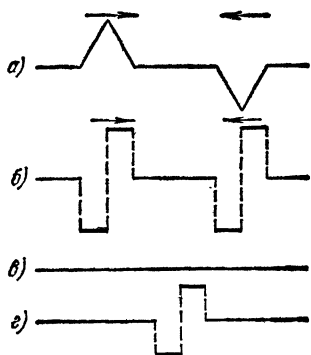


Рис. 108.

рис. 104 этим свойством не обладают, а примеры на рис. 105 — обладают, т. е. не смещают середину пружины.

Если у вас есть время, желательно дать учащимся некоторые представления о суперпозиции екоростей.

Два треугольных импульса, движущиеся навстречу друг другу, дают прекрасный пример для изучения суперпозиции скоростей, если пренебречь острыми углами. (Острые углы подразумевают чрезвычайно высокие ускорения; если бы углы были немного закругленными, то изменения скоростей были бы физически реализуемыми.) Рассмотрим два импульса, показанные на рис. 106, a , распространяющиеся навстречу друг другу. График скоростей точек пружины в тот же момент имеет вид,

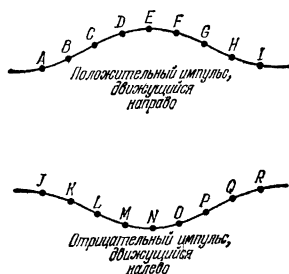
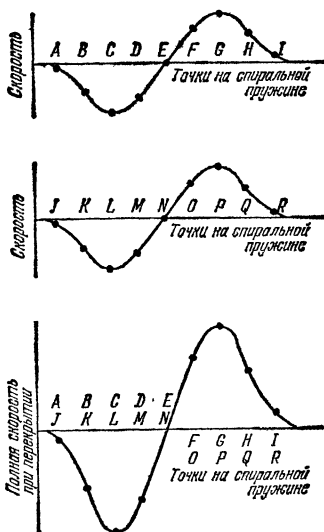


Рис. 109.



показанный на рис. 106, b . Приведенная на рис. 107 последовательность графиков показывает скорости и смещения точек по мере того, как импульсы пересекают друг друга. Заметьте, что в момент $t=1$ с эти два импульса складываются

и дают удвоенное смещение, однако скорость в этот момент во всех точках пружины равна нулю! Сравните этот результат с решением задачи 13 и рис. 15.17.

Если два импульса имеют противоположную полярность (рис. 108, а), то график скорости выглядит так, как показано на рис. 108, б. Во время пересечения этих двух импульсов наступит момент, когда суммарное смещение будет равно нулю, так что график смещения будет иметь вид, представленный на рис. 108, в, однако скорости при этом изображаются рис. 108, г. Этот случай представлен на рис. 15.7.

Хотя это ни в коей мере не является жизненно важным, при подробном прохождении этого раздела со способными учащимися желательно использовать треугольные импульсы, чтобы показать, что скорость частиц пропорциональна наклону в данный момент. Коль скоро это установлено, можно дать интересующимся учащимся полуколичественное объяснение рис. 15.7, представленное на рис. 109.

15.4. Отражение волн и их прохождение через среды

Ц е л ь. Описать (не объяснить), что происходит, когда импульс достигает границы.

С о д е р ж а н и е. В общем случае импульс на спиральной пружине частично отражается и частично проходит, если он попадает на границу раздела разного рода материалов.

а) Если граница представляет собой жестко закрепленный конец, импульс отражается и распространяется обратно перевернутым.

б) Если граница представляет собой свободный конец, импульс отражается не переворачиваясь.

в) Если импульс проходит из более «легкой» в более «тяжелую» среду, то проходящий импульс распространяется не переворачиваясь, а отраженный импульс распространяется обратно перевернутым.

г) Если импульс проходит из более «тяжелой» в более «легкую» среду, то как прошедший, так и отраженный импульсы распространяются прямыми (не перевернутыми).

д) Если две среды имеют почти одну и ту же массу на единицу длины, то большая часть импульса проходит через границу раздела. Если они имеют равные массы на единицу длины, то границы вообще не существует (поскольку речь идет об импульсе), и весь импульс «передается».

Важно, чтобы учащиеся поняли, что частичное прохождение и частичное отражение происходит на границах. Они должны также знать, что полярность отраженной волны зависит от конкретных свойств границы. От них не требуется четких механических представлений о том, почему импульсы отражаются именно так, а не иначе. Существенно наблюдение отражения и прохождения реальных импульсов в лабораторных работах или во время классных демонстраций.

Когда вы разбираете вопрос о том, является отраженный импульс прямым или перевернутым, используйте эти выражения, или слова «стоящий» и «опрокинутый», или введите термин «полярность». Избегайте слова «фаза». Это слово используется в гл. 17 и имеет смысл только для периодических волн. Если «фаза» употребляется здесь вместо «прямой», «стоящий» или «положительной полярности», учащиеся могут не уяснить точное значение фазы, когда они встретятся с понятием фазы периодических волн.

Хотя для учащихся важно видеть, что полярности отраженного и проходящего импульсов зависят от природы границ, встречающихся на их пути, конкретная полярность отраженного импульса в случае пружины не имеет большого значения для дальнейшего изучения волн. Однако идея об изменении полярности интересна сама по себе, особенно потому, что она стимулирует учащихся к дальнейшим лабораторным исследованиям. (Когда изменение фазы будет привлечено для объяснения картины интерференции в тонких пленках в гл. 18, учащиеся должны будут перенести на эти явления идею о том, что отражение происходит существенно различным образом в случае двух различных типов границ. В то же время не существует прямой аналогии между волнами на пружинах, водяными волнами и световыми волнами, которая сделала бы существенной особенности поляризации отраженных волн на пружине.)

Когда учащиеся наблюдают отражение волн, скажем, на спиральной подвешенной пружине, они неизбежно будут настаивать на «объяснении». «Почему волны отражаются именно таким образом от свободного и фиксированного концов?» Формально, все тот же старый ответ может быть: «Вы еще недостаточно знаете механику, чтобы понять *почему*». Однако учащимся понравится придумать (или услышать от вас) объяснения «в духе здравого смысла».

Некоторые учащиеся могут отвергнуть объяснение, связанное с предположением о том, что стенка создает импульс гашения. «...Откуда стенка знает хотя бы о том, какого рода импульс необходим, и как может *фиксированная* стенка догадаться, когда его послать?...» Такие вопросы требуют более глубокого проникновения в механику отражения, чем это сейчас возможно. В качестве альтернативного объяснения (не очень серьезного свойства) рассмотрим вместо фиксированной стенки «опытную руку». Если попытаться неподвижно удерживать один конец пружины в тот момент, когда к этому концу приходит импульс, то на пружину приходится производить давление, равное и противоположное тому давлению, которое производит импульс на руку. (При этом опирайтесь только на интуицию, не упоминая о Ньюtone.) Теперь допустим, что такого же рода давление производится на неподвижную пружину. При этом образовался бы импульс противоположной полярности. Не очень вдавайтесь в подробности. Может быть, учащиеся дадут другие объяснения. Посмотрите, не смогут ли учащиеся «объяснить» в том же духе отражение от свободного конца.

15.5. Идеализации и приближения

Ц е л ь. Проиллюстрировать использование идеализаций и приближений в науке.

С о д е р ж а н и е. Рассмотрение импульса на идеально гибкой спиральной пружине, не обладающей внутренним сопротивлением и расположенной в вакууме, является примером идеализации.

Поскольку эффекты, обнаруживаемые в реальных спиральных пружинах, не зависят от тех их свойств, которые исключены при идеализации, эта идеализация может быть с успехом использована.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Удостоверьтесь, что учащиеся не путают идеализацию с упрощенным экспериментальным расположением. Иногда мы пользуемся идеализацией для упрощения эксперимента. В других случаях мы просто используем идеализацию как руководство к тому, что наблюдать и чем пренебречь в уже готовом эксперименте. Третий путь использования идеализации,

который не развивается в этом разделе, состоит в построении модели, на которой основываются вычисления.

Можно попросить учащихся привести примеры идеализаций из предыдущих глав курса. Значение такого обсуждения состоит не в том, чтобы выработать определения «идеализации» и «приближения». Оно должно быть направлено к тому, что при изучении сложных явлений или при работе с ними крайне важно отделять существенное от несущественного. Не будучи поверхностным объяснением, подпадающая идеализация или приближение часто является мощным интеллектуальным средством для решения сложных вопросов. Выбор правильной идеализации часто является важнейшей частью решения проблемы.

Ниже приводится неполный список приближений, использованных при изучении света.

1. Отражение является либо абсолютно зеркальным, либо абсолютно диффузным.
2. Сферическое зеркало подобно параболическому зеркалу.
3. Сферическое зеркало обладает точечным фокусом.
4. Один и тот же показатель преломления относится ко всему белому свету.
5. Линзы дают идеальные изображения.

15.6. Можем ли мы принять волновую модель света?

Ц е л ь. Обеспечить переход к изучению волн на поверхности воды.

С о д е р ж а н и е. Увидев, что волны могут пересекать друг друга без изменений и что волны могут частично отражаться и частично проходить через границу раздела, мы интересуемся вопросом о том, могут ли волны преломляться. Чтобы на него ответить, мы должны рассмотреть волны, которые не ограничены единственным направлением распространения вдоль прямой.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Изучайте этот раздел кратко.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам

В табл. 10 приведена классификация задач в соответствии с их примерным уровнем трудности и с теми разделами, к которым они относятся. Указаны также те из них, которые особенно подходят для обсуждения в классе. Особо рекомендуемые задачи отмечены значком #.

ТАБЛИЦА 10

Разделы	Созвездочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
15.1	1	2 #			2 #
15.2	3, 4		5, 6 #		5, 6 #
15.3	7, 8, 12	9 #	10, 11	13 #	9 #, 10, 11, 13 #
15.4	16, 17	15 #, 18	14 #, 20	19, 21	14 #, 15 #, 19, 21
15.5	22	24	23, 25		

Краткие ответы

1*. Все волны распространяются в какой-нибудь среде, но сама среда не распространяется с волнами.

3*. В точке с максимальным смещением.

4*. Он по-прежнему двигался бы сначала вверх.

7*. Нет.

8*. 7 см.

12*. См. рис. 110.

16*. Падающий импульс.

17*. Три. (Скорости пропорциональны

расстояниям, которые импульсы проходят между последовательными фотографиями.)

22*. На нижних кадрах импульс меньше, чем на верхних.

Ответы с указаниями и решениями

2. Цель этого упражнения состоит не в том, чтобы просто сообщить учащимся, что некоторые явления (например звук) являются волновыми движениями. Это упражнение должно быть использовано для того, чтобы помочь учащимся лучше понять, чем волновое движение отличается от движения тела. Надо разъяснить, что мы должны в какой-то мере знать детальный механизм процесса передачи информации, чтобы иметь возможность его классифицировать. Приветственный возглас приятелю является хорошим примером волнового движения в том и только в том случае, если учащиеся понимают, что отдельные молекулы воздуха колеблются взад и вперед, но не распространяются изо рта в ухо.

Простой пример переноса массы представляет брошенный камень (см. раздел 15.1). Импульс, посланный по пружине, представляет столь же прозрачный пример волн. На данном этапе следует избегать обсуждения механизмов таких обычных волновых явлений, как звук и радиоволны. Достаточно заметить, что в этих примерах трудно найти свидетельства переноса массы. Многие учащиеся будут в нерешительности относительно телефонной связи. (Электрические сигналы, распространяющиеся вдоль проволоки, представляют собой электромагнитные волны; электроны в проволоке движутся лишь незначительно.) Распространение тепла от пламени неоднозначно. Излучение представляет пример волн; конвекция связана с переносом массы; теплопроводность более всего подходит к примеру волн.

Напомним, что на этой стадии классификация света является неопределенной. Поскольку простая модель частиц не соответствует свойствам света, «перенос массы» не может иметь места. С другой стороны, некоторая корпускулярная модель может работать. До тех пор, пока мы не получим подтверждение каких-либо волновых свойств, классифицировать свет как волны можно лишь условно.

5. Смещения на рис. 15.2 определяются путем измерения расстояний от нижней точки спиральной пружины до кончика указательной стрелки. Результаты представлены в табл. 11 и на рис. 111.

ТАБЛИЦА 11

Номер кадра	Время, 1/24 с	Расстояние, мм	Смещение, мм	Номер кадра	Время, 1/24 с	Расстояние, мм	Смещение, мм
1	0	5,2	0,0	7	6	2,8	-2,4
2	1	5,2	0,0	8	7	4,5	-0,7
3	2	5,6	0,4	9	8	5,0	-0,2
4	3	5,2	0,0	10	9	5,0	-0,2
5	4	3,0	-2,2	11	10	5,0	-0,2
6	5	1,3	-3,9	12	11	5,0	-0,2

Эта задача может быть дополнена рассмотрением импульса, распространяющегося слева направо, в котором смещение как функция расстояния выглядит так, как показано на рис. 112. Пусть учащиеся построят график зависимости сме-

щения точки от времени при прохождении импульса через эту точку. Это покажет сходство и различие между графиками зависимости смещения от расстояния и графиками зависимости смещения от времени.

6. Эта задача представляет хороший простой способ проверки знания учащимися связи между формой волны и скоростью частицы (см. раздел 15.2). Разъяс-

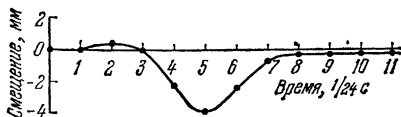


Рис. 111.



Рис. 112.

ните учащимся, хотите ли вы от них получить только два последовательных положения пружины («стрелки»), указывающие скорость каждой частицы, или график зависимости скорости каждой частицы от первоначального положения этой частицы (рис. 113). Обратите внимание, что средняя скорость частицы зависит от выбора временного интервала.

9. Если бы в данный момент каждый из импульсов присутствовал отдельно от другого, они бы выглядели так, как показано на рис. 114, а. Складывая графически смещения, получим картину, представленную на рис. 114, б. Когда импульсы находятся строго один над другим, сложный импульс оказывается вдвое выше каждого из них в отдельности (рис. 114, в).

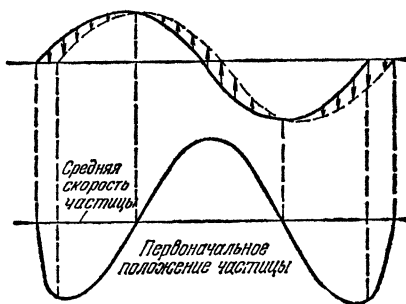


Рис. 113.

10. На седьмом кадре сверху на рис. 15.5 отсутствие нерезкости в левой части и очень слабое размытие в правой показывает, что в этот момент пружина либо не движется вовсе, либо ее движение происходит очень медленно. Изучая фотографии (сверху вниз), легко видеть (рис. 115), что отрезки пружины А и С движутся вниз в течение интервала времени между 6-м и 7-м кадрами. На 7-м кадре отрезки А и С покоятся. Между 7-м и 8-м кадрами эти отрезки будут

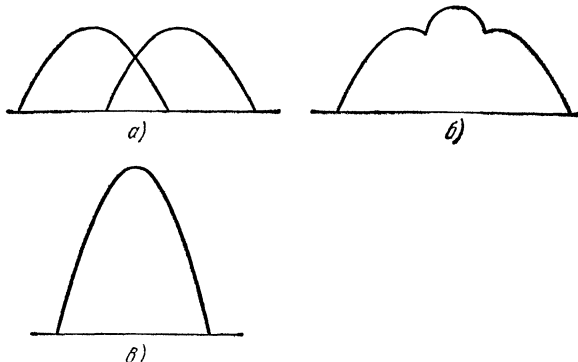


Рис. 114.

двигаться вверх. Между 6-м и 7-м кадрами отрезок В движется вверх, а на 7-м кадре он покоится. Между 7-м и 8-м кадрами отрезок В будет двигаться вниз.

11. Учащиеся могут решить эту задачу, исследуя фотографии независимо от того, понимают они принцип суперпозиции скоростей или нет. Однако задача

особенно поучительна, если учащиеся уже познакомились с суперпозицией скоростей.

В качестве предпосылки взгляните на четвертую и шестую фотографии. На пятой фотографии точки движутся так, как показано на рис. 116. Отметьте неразмытую часть в середине, которая находится в покое. В этом месте скорость изменяет направление. (Поскольку рассматриваемые импульсы в точности противоположны друг другу, средняя точка является узловой.)



Рис. 115.

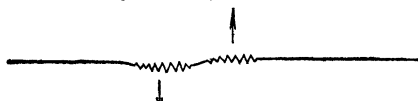


Рис. 116.

13. Эта задача может следовать за разделом 15.3, но только если вы обсудили суперпозицию скоростей, и не покажется учащимся очень трудной, если они поняли, что скорости налагаются так же, как смещения.

а) По-видимому, лучше всего построить график зависимости скорости точек спиральной пружины от их положения вдоль нее (рис. 117). Учащиеся должны заметить, что скорость у передних краев (фронтов) импульсов направлена вверх. На задних краях импульсов скорость направлена вниз. Принцип суперпозиции справедлив для скоростей в той же мере, что и для смещений. Сложение скоростей двух волн, показанное на рис. 177, г, дает нуль. Таким образом, мгновенная скорость пружины равна нулю.

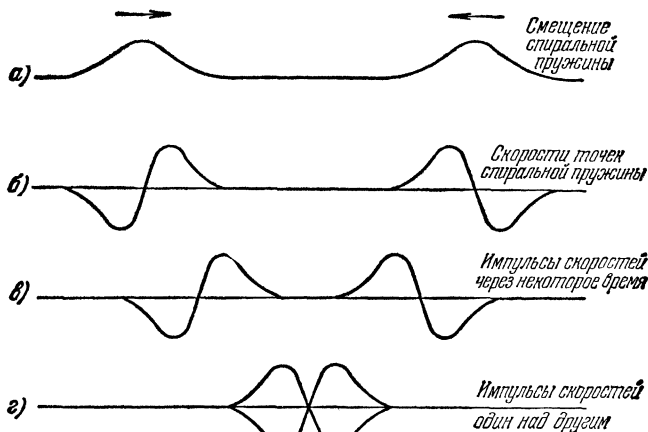


Рис. 117.

б) Если пружина деформирована таким образом, как показано на шестом кадре сверху на рис. 15.17 (удерживается в покое, а затем отпускается), два импульса, каждый из которых вдвое ниже первоначальной деформации, начнут распространяться в противоположных направлениях. Это можно оправдать с помощью следующих доводов: «Взгляните на кадр 6 рис. 15.17. Что произойдет затем? Два импульса разойдутся в противоположных направлениях. Если бы мы прикрыли фотоснимки 1, 2, 3, 4 и 5, знали ли бы мы о том, каким образом пружина пришла в деформированное состояние, изображенное на фотоснимке 6? Нет. Следовательно, независимо от того, каким образом пружина попала в это состояние, потом с ней должно произойти то же самое».

Некоторые учащиеся могут заявить, что мы могли бы получить ту же самую ситуацию, что на фотоснимке 6, если бы вдоль пружины распространялся одиночный

ный импульс. Хотя смещение было бы точно таким же, разница между этими случаями очевидна, так как, если бы распространялся только один импульс, отдельные части пружины (особенно у переднего и заднего краев импульса) находились бы в состоянии движения. Вероятно, стоит указать, что если мы хотим предсказать, что произойдет с волной в будущие моменты времени, мы должны знать смещение и скорость каждой точки пружины.

Заметим, что этот новый факт ни в коей мере не является очевидным. Учащиеся могут считать, например, что ускорение или какая-нибудь еще не определенная кинематическая или динамическая величина может управлять последующим движением. Существенно новый факт состоит в том, что смещение и скорость

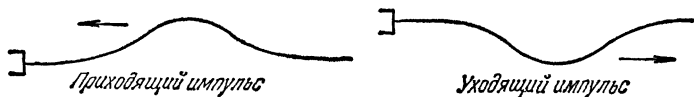


Рис. 118.

полностью определяют будущее (и, между прочим, прошлое) волны на пружине если нет действия внешних сил. Дальнейшее подтверждение этих идей учащиеся получают при выполнении лабораторных работ.

14. На рис. 15.10 показан симметричный импульс, приходящий к закрепленному концу и уходящий от него. Это будет выглядеть так, как представлено на рис. 118. На полпути при отражении смещение пружины равно сумме смещений от приходящего и уходящего импульсов (рис. 119)..

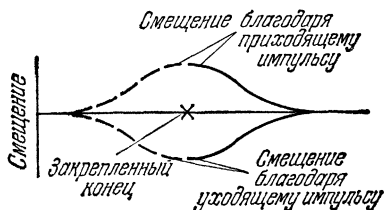


Рис. 119.

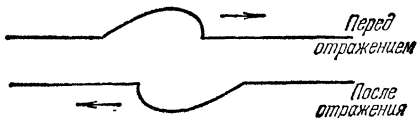


Рис. 120.

Заметим, что график смещений на рис. 119 не следует путать с изображением пружины. Пружина не может находиться в двух вертикальных положениях одновременно.

15. Ответ на эту задачу тесно связан с рис. 15.9 и с описанием отражения в тексте Учебника (рис. 120).

18. Это как раз та ситуация, которая изображена на рис. 15.11, где часть импульса проходит, а часть возвращается перевернутой и уменьшенной. В этом случае скорость импульса во второй пружине меньше, чем в первой.

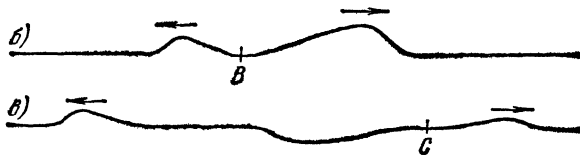


Рис. 121.

19. В точке В (рис.121, б) должно быть соединение, так как часть волны отражается в этом месте, а часть проходит дальше. Поскольку отраженная волна не переворачивается, участок левее точки В должен быть плотнее, чем лежащий справа от нее. Более того, мы видим, что проходящий импульс обладает большей скоростью и амплитудой, чем первоначальный импульс.

Отражение от точки *C* указывает второе соединение (рис. 121, в). Поскольку отраженный импульс перевернут, участок веревки правее *C* должен быть плотнее, чем участок, лежащий слева. Кроме того, скорость справа от *C* меньше, чем слева.

20. Если импульс переходит с одной пружины на другую, в которой скорость его распространения меньше, чем в первой, то отраженный импульс опрокидывается. Применяя это наблюдение к свету, мы заключаем, что световой импульс, распространяющийся в воздухе, переворачивается при отражении от поверхности воды, так как скорость света в воздухе больше, чем в воде. Этот вопрос подробно обсуждается в разделе 18.9.

21. Эта задача может служить хорошим показателем способности учащихся наблюдать явления, когда у них нет уверенности в результате. Одна из трудностей состоит в том, что учащимся нелегко понять, почему круговые волны отражаются именно таким образом. В частности, если учащиеся попробуют использовать аргументы, аналогичные приведенным в разделе 15.4, они придут к неверному ответу. Другая трудность для многих учащихся состоит в том, чтобы найти правильные слова для описания круговых волн.

Создать волну в три оборота довольно трудно, но и волна в один или два оборота показывает основные свойства отражения.

а) Возникающая волна представляет собой трехвитковую «правостороннюю» спираль. Она имеет точно такой же вид, как нарезка обычного винта (почти все винты являются правыми), если направить этот винт концом от себя.

б) С точки зрения наблюдателя, веревка представляется вращающейся в отраженной волне в ту же сторону. Однако поскольку волна движется в противоположном направлении, отраженную волну следовало бы назвать трехвитковой «левосторонней» спиралью. Вид этой волны нельзя продемонстрировать, повернув правосторонний винт; ее моделью мог бы служить винт с левой нарезкой.

в) При прохождении волны частица совершает три последовательных оборота по круговой орбите. Когда волна распространяется от наблюдателя, частица вращается по часовой стрелке (с точки зрения наблюдателя). Когда волна движется к наблюдателю, частица также вращается по часовой стрелке (с точки зрения наблюдателя).

Заметим, что в круговой волне вращение частиц после отражения происходит в ту же сторону, независимо от того, является ли отражающий конец веревки свободным или закрепленным.

23. а) Вопрос о пренебрежении уменьшением амплитуды волны при распространении импульса вдоль пружины весьма подробно обсуждается в разделе 15.5. Главными причинами этого уменьшения размеров является сопротивление воздуха, внутреннее сопротивление самой пружины и любое трение пружины о поддерживающие ее тела. С помощью соответствующих экспериментальных приспособлений возможно, хотя зачастую очень трудно, уменьшить все эти влияния до вполне малой величины. Мы можем пренебрегать этим уменьшением, если мы рассматриваем распространение импульса только в течение достаточно коротких интервалов времени, так что уменьшение его амплитуды едва заметно.

б) Поведение идеальной пружины без потерь гораздо легче описывать и предсказывать, чем поведение реальной пружины.

24. Под идеальной пружиной в этой главе мы подразумеваем пружину, для которой потери на трение очень малы и которая является достаточно гибкой, так что принцип суперпозиции как смещений, так и скоростей справедлив с высокой степенью точности.

25. Большое число примеров может быть дано вами и вашими учащимися без особых усилий. Несколько примеров приведено ниже. Поверхность моря является приблизительно плоской:

с хорошей степенью приближения для установления высоты горы над уровнем моря; описания средней глубины океана;

с плохой степенью приближения для судна в шторм; для человека на плоту, пытающегося пользоваться секстантом или телескопом.

16 ВОЛНЫ И СВЕТ

Цель этой главы — познакомить учащихся с явлениями, связанными с распространением волн на поверхности. В качестве инструмента для наблюдения этих явлений и для выполнения экспериментов с ними служит волновая ювета, описанная в тексте Учебника и используемая в лаборатории. Наблюдения с помощью волновой юветы показывают, что волны подвержены отражению, преломлению, дисперсии и дифракции. Аналогия между поведением волн на воде и поведением света настолько полная, что это наводит на мысль, что свет может распространяться как некоторого рода волновое возмущение.

Работа над этой главой должна быть построена вокруг лабораторных опытов с использованием текста Учебника в качестве связующего элемента и для обзора того, что должно быть изучено в лаборатории. Нельзя ограничиться тем, что учащиеся просто пронаблюдают «демонстрационные опыты» с волновой юветой. Они должны поработать самостоятельно, разбившись на небольшие группы, и изучить каждое явление вплотную для того, чтобы прийти к соответствующему действительному пониманию природы волнового движения.

Работа над этой главой оказывается одной из наиболее захватывающих на протяжении всего курса. Очень немногие учащиеся приступают к ней, будучи хоть в какой-то мере реально знакомыми с представленными здесь идеями, несмотря на многолетние привычные наблюдения волн на воде. Здесь представляется возможность освоить некоторые аспекты «научного метода». Приобретение опыта в тщательных количественных наблюдениях волнового движения — выделение событий, установление связи между явлениями, обобщение результатов — может научить учащихся науке больше, чем сотни страниц в книгах. Вам придется быть щедрыми при отведении времени на лабораторные работы.

Краткое содержание главы 16

Разделы 16.1—16.4. Волны на воде представляют поверхностное явление. Их гребни действуют как собирающие цилиндрические линзы для света, проходящего сквозь них. Отдельные участки волновых импульсов движутся по нормали к импульсу волны. Для отраженных волн угол падения равен углу отражения. Периодическая волна представляет собой картину возмущений, которая в каждой точке пространства повторяет сама себя через правильные промежутки времени, называемые периодом. Скорость распространения, длина волны и период связаны соотношением $v = \lambda/T$.

Раздел 16.5. Скорость распространения волн на воде зависит от глубины водоема. К направлениям распространения волн на поверхности воды, пересекающим область скачка скорости распространения, применим закон Снеллиуса: $\sin i / \sin r = n_{12}$ — постоянная величина. Волновая модель дает $n_{12} = v_1/v_2$, в то

время как модель частиц предсказывает $n_{12} = v_2/v_1$. Измерение скорости распространения света подтверждает предсказание волновой модели.

Р а з д е л 16.6. Скорость распространения волн на воде изменяется с частотой. Эта зависимость называется дисперсией. Преломление света изменяется в зависимости от цвета. Таким образом, если свет имеет волновую природу, возможно, что цвет является функцией частоты.

Р а з д е л 16.7. Водяные волны не создают четких теней, когда на их пути встречаются тела с размерами, равными или меньшими длины волны λ . Поэтому если свет является результатом волнового возмущения, то, поскольку он образует резкие тени от обычных объектов, его длина волны должна быть очень мала по сравнению, например, с сантиметром. Изгибание волн вблизи их краев называется дифракцией. Дифракция света наблюдается в тех случаях, когда используются щели или объекты с размерами меньше 1 мм. Это подтверждает представление о свете как следствии волнового возбуждения.

План изучения главы 16

С этой главой связаны четыре «обязательных» опыта. Работа в лаборатории должна доносить до учащихся самую суть представляемого материала. Было бы хорошо запланировать пять уроков для занятий в лаборатории и два — для занятий в классе, если вы стараетесь выдержать 9-недельный план изучения части II.

Первые два урока по гл. 16 можно посвятить выполнению лабораторных опытов II.7 и II.8. Выполнение лабораторных работ может сопровождаться внеклассным чтением и решением ряда задач.

В табл. 12 предлагаются возможные варианты планирования материала этой главы, согласующиеся с общим планом изучения части II, рекомендованным во Введении к части II Руководства. Лабораторные работы, которые должны предшествовать классным обсуждениям, помечены звездочкой.

ТА Б Л И Ц А 12

Глава 16	9-недельный план изучения части II			14-недельный план изучения части II		
Разделы	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты
16.1—16.3	0	1	II.7 *	0	1	II.7 *
16.4	1	1	II.8	1	2	II.8
16.5	0	1	II.9 *	1	1	II.9 *
16.6	0	0	—	1	0	—
16.7	1	2	II. 10 *	1	2	II.10 *

Дополнительные материалы к главе 16

Лаборатория. В ходе изучения данной главы учащиеся должны выполнить опыты II.7 (*Волновые импульсы в волновой кювете*), II.8 (*Периодические волны*), II.9 (*Преломление волн*) и II. 10 (*Волны и препятствия*).

Домашние, классные и лабораторные задания. Ответы, решения и таблицу классификации задач по их примерному уровню трудности см. на стр. 310.

Избегайте обсуждения вопроса о движении частиц воды в волне или вопроса о том, «почему» распространяются волны по воде. Обе эти темы крайне сложные (см. Приложение 7 на стр. 395). У учащихся выработается достаточно правильное интуитивное представление о волнах на воде, которое позволит им наблюдать и интерпретировать свои наблюдения в волновой кювете без явного рассмотрения таких вопросов. Краткие ответы на несколько вопросов, которые могут задать учащиеся, предлагаются ниже.

При обсуждении волновой кюветы может возникнуть небольшая путаница. Здесь используется реальный источник света, лучи которого проходят сквозь воду в волновой кювете. Рассказывая о лабораторной работе, вам приходилось упоминать о фокусировании, отражении, образовании тени и т. п. поведении этого света. С другой стороны, вы будете иметь дело с *фокусировкой* (сложным преломлением), *отражением* и т. д. волн на воде. Начиная работу с волновыми кюветами, тщательно разграничивайте эти две группы явлений.

16.1. Волны на воде

16.2. Прямолинейные и круговые волновые импульсы

16.3. Отражение

Ц е л ь. Ввести понятие о волнах на воде и о волновой кювете; выяснить различия между прямолинейными и круговыми импульсами и изучить направления, в которых они могут распространяться; пронаблюдать отражение водяных волн и связать эти наблюдения с законами отражения света, изученными в гл. 12.

С о д е р ж а н и е. а) Водяные волны распространяются по поверхности. Они обладают вершинами — гребнями, и углублениями — впадинами.

б) Гребни действуют как собирающие цилиндрические линзы, стремящиеся сфокусировать свет в линию.

в) Прямолинейный волновой импульс движется вдоль линии, перпендикулярной к нему самому — по нормали.

г) Круговой импульс движется внутрь или наружу; его последовательные положения представляют концентрические окружности.

д) Любая точка криволинейного импульса движется по нормали (перпендикулярно к касательной) к кривой в этой точке.

е) Угол между импульсом волны и отражающей поверхностью совпадает с углом между направлением распространения волнового импульса и перпендикуляром к отражающей поверхности. Для волн на воде справедлив закон отражения.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Хотя факты, представленные в этих разделах, просты, важно, чтобы учащиеся основательно в них разобрались. Они должны овладеть техникой работы с волновой кюветой, а также должны отдавать себе отчет в важности тех наблюдений, которые они производят.

Развитие материала разделов 16.1—16.3 должно естественно вырастать из опыта, сделанного в лаборатории. Первый день работы над этой главой хорошо посвятить выполнению опыта II.7. Подходящим заданием на вечер было бы чтение разделов 16.1—16.4 плюс одна или две задачи, относящиеся к разделам 16.1—16.3.

Работе в лаборатории должно предшествовать краткое объяснение процесса фокусировки, который делает видимыми волны в кювете. Можно сделать чертежи, представленные на рис. 122.

Затем спросите учащихся, как изменилось бы «фокусное расстояние», если бы возросло расстояние между гребнями, или если бы изменилась высота между гребнем и впадиной (которую можно назвать удвоенной *амплитудой*, если вы хотите ввести это полезное слово). Спросите их, следует ли ожидать изменения «резкости» изображения волн при изменениях горизонтального расстояния между гребнем и впадиной. Посмотрите, понимают ли они, каким образом изменения амплитуды могли бы скомпенсировать этот эффект. (Соотношение между амплитудой, частотой, расстоянием до лампы и удаленностью экрана можно выбрать таким образом, чтобы получилось вполне резкое изображение волн, причем наблюдается весьма широкий диапазон приемлемых значений этих величин.)

Следующие вопросы могут помочь освоиться с особенностями, которые должны быть установлены путем наблюдений в лаборатории.

1. Вы смотрите на волновую кювету — на одну точку гребня одной волны (рис. 123). Куда будет двигаться эта точка волнового гребня? — Вы должны показать нам и другие участки волны.

2. Перед вами небольшой участок волны (рис. 124). Куда он будет двигаться? — Он может двигаться в любом из двух перпендикулярных направлений (рис. 125).

3. Предположим, перед вами круговая волна (рис. 126). Можете ли вы сказать, каким образом она движется? — Вы не можете сказать, направляется она «вовнутрь» или «наружу»? (Учащийся может обоснованно заявить, что если бы он увидел подобную волну в лаборатории, она скорее всего двигалась бы наружу, потому что генераторы сходящихся круговых волн представляют редкость. Но если постучать по краю чашки с кофе, вы увидите сходящиеся круговые волны.)

4. Допустим, что радиус волны возрастает. Укажите, где будет находиться каждый из трех ее отмеченных на рис. 127, *a* участков, после того как волна пройдет, скажем, 1 см (выберите масштаб в соответствии с вашим рисунком) — См. рис. 127, *b*.

5. Предположим, вы погрузили в озеро генератор волн овальной формы с размерами 3×6 см (рис. 128). Какой вид имели бы волны, возбуждаемые им, после того как они прошли 1 км. — Они были бы почти круговыми (они имели бы размеры 1 км, $3 \text{ см} \times 1 \text{ км}$, 6 см).

Большинству учащихся будет полезно заново рассмотреть отражение с волновой точки зрения. Дайте им несколько упражнений, которые они могли бы выполнить графически или интуитивно с помощью представления о волновых импульсах. Некоторым учащимся волновой подход покажется легче, чем рассмотрение хода лучей, особенно после того, как они пронаблюдадут отражение волн в волновой кювете. Желательно, чтобы учащиеся проверили в лаборатории все, что они помнят о поведении света, отражающегося от сферического зеркала. Большинство учащихся (с помощью погружения одного пальца или линейки) без труда могут найти «фокус зеркала». Пусть они определяют «центр кривизны», используя знание «точки фокуса», и проверяют его экспериментально.

По-видимому, стоит явно указать на аналогию между отражением круговой волны от прямого барьера (рис. 16.9) и отражением точечного источника света в плоском зеркале.

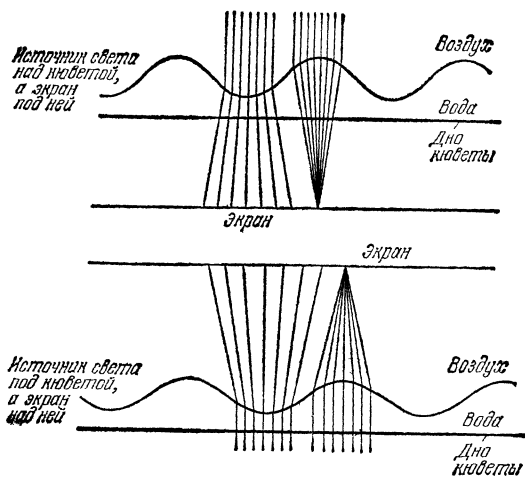


Рис. 122.

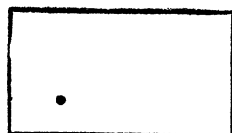


Рис. 123.

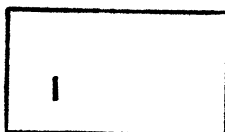


Рис. 124.

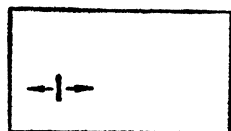


Рис. 125.

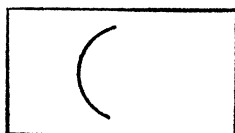
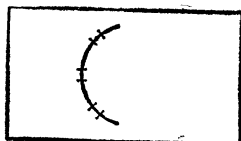
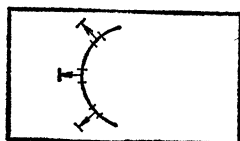


Рис. 126.



а)



б)

Рис. 127.

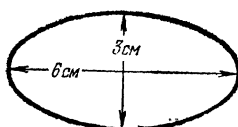


Рис. 128.

Если среди ваших учащихся есть желающие научиться более строго находить последовательные положения волнового импульса, желательно ввести понятие о графическом построении. (Это не что иное, как построение Гюйгенса, но вам нет нужды заботиться об имени.)

Рассмотрим волновой импульс (рис. 129, а), движущийся, вообще, «вверх». Как найти его положение немного времени спустя?

Поскольку каждая точка движется по нормали, построим касательные и перпендикуляры к ним в большом числе точек (рис. 129, б).

Чтобы найти положение волны через малое время t , отложим расстояние vt вдоль каждой нормали (v — скорость волны). Это легко может быть сделано с помощью циркуля (или кусочка мела на нити на доске). Сделав соответствующие метки, соедините их между собой, чтобы получить новое положение волнового импульса (рис. 129, в).

После того как учащиеся поняли это построение, желательно показать им более простой способ, не требующий построения касательных и нормалей. Просто проведите много полукружностей с центрами в точках волнового импульса (рис. 129, г). Если вы нарисовали достаточно много полукружностей, класс сразу увидит, как провести новое положение волнового импульса, не заботясь о построении касательных и нормалей.

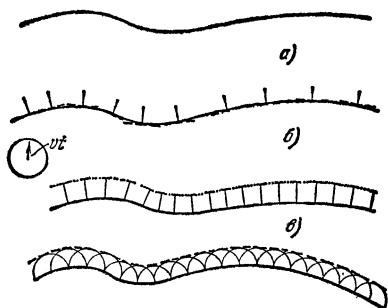


Рис. 129.

Введение построения Гюйгенса на данном этапе имеет два преимущества.

1. Оно дает возможность учащимся с помощью определенного, обоснованного способа проверить их представления о том, как будет себя вести форма волны. Волны сложных форм, или сложные случаи отражения и преломления могут быть рассмотрены при этом непосредственно.

2. Оно обеспечивает переход к анализу дифракционных явлений, вводя идею о том, что волна ведет себя примерно так же, как вела бы себя волна от ряда точечных источников.

16.4. Скорость распространения волн и периодические волны

Ц е л ь. Ввести понятие о периодических волнах и о методе измерения скорости волн.

С о д е р ж а н и е. а) Периодической является волна, образованная картиной возмущений, которая в каждой точке пространства повторяет сама себя через одинаковые промежутки времени. Число таких повторений в единицу времени (обычно за 1 с) называется частотой f .

б) Промежуток времени между повторениями называется периодом T . По определению $f=1/T$.

в) Поскольку волны движутся с постоянной скоростью v , последовательные одинаковые участки периодической волны всегда будут находиться на одном и том же расстоянии друг от друга. Расстояние между двумя такими последовательными точками называется длиной волны λ : $\lambda=vT$.

г) Скорость волн в волновой кювете может быть определена путем измерения f (с помощью стробоскопа) и λ (с помощью линейки) и последующего использования соотношения $v = f\lambda$.

Методические указания. Понимание соотношения $v = f\lambda$ весьма важно, и учащиеся должны приобрести немалый опыт в пользовании им при выполнении лабораторных работ и решении задач. Опыт II.9 должен следовать сразу же за тем, как вы задали на дом этот раздел. Его можно выполнить во второй день изучения этой главы. Затем домашнее изучение и следующий день классных занятий могут быть посвящены закреплению этого материала.

Вероятно, стоит затратить некоторое время на обсуждение рис. 16.12 и связанного с ним материала текста Учебника в классе. Если стробоскоп дает последовательные вспышки, соответствующие положениям A и B на рис. 16.12, a , то на основании одних только этих изображений нельзя быть уверенным, что штриховые линии, проведенные на рисунке, действительно соединяют положения одной и той же волны в два последовательных момента времени. Предполагается, что мы знаем, что волновое движение происходит слева направо. Далее, на верхней диаграмме волна между вспышками A и B действительно могла пройти расстояние, равное $\frac{1}{3}\lambda$, как указано на рис. 16.12, a , однако она могла бы пройти также расстояние $\frac{4}{3}\lambda$, $\frac{7}{3}\lambda$, $\frac{10}{3}\lambda$ и т. д. Это означает, что время между последовательными вспышками могло бы быть $\frac{1}{3}T$, $\frac{4}{3}T$, $\frac{7}{3}T$, $\frac{10}{3}T$ и т. д.

Аналогично, в более важном случае, представленном на рис. 16.12, b , время между вспышками могло бы действительно равно T , как и предположено; однако оно могло бы равняться также $2T$, $3T$, $4T$ и т. д. Может быть, придется напомнить учащимся, что они учились определять, какое из предположений является правильным (см. гл. 12). Можно увеличить частоту открывания щели стробоскопа. Если картина волны не может быть остановлена ни при какой более высокой частоте стробоскопа; то предположение о том, что интервал времени между первоначальными вспышками равнялся T , является правильным. Иными словами, максимальная частота стробоскопа $f_{\text{стр}}$, дающая «остановленную» картину, равна частоте наблюдаемого волнового возмущения:

$$f = f_{\text{стр}}.$$

16.5. Преломление

Ц е л ь. Показать, что волны на воде подчиняются закону Снеллиуса.

С о д е р ж а н и е. а) Скорость водяных волн зависит от глубины водоема.

б) Если частота генератора в волновой кювете остается постоянной, то во всей кювете наблюдается единственная частота. Если в двух областях длины волн λ_1 и λ_2 различны, то в этих областях соответственно различны и скорости распространения:

$$v_1 / v_2 = \lambda_1 / \lambda_2.$$

в) Зная свойства волн, мы можем прийти к заключению, что к преломлению волн применим закон Снеллиуса, т. е.

$$\sin i / \sin r = v_1 / v_2,$$

где v_1 и v_2 — скорости в области падения и в области преломления соответственно. Поэтому $\sin i / \sin r = \text{const}$ для границы между двумя данными средами, и

«показатель преломления» для волн равен

$$n_{12} = v_1/v_2.$$

г) В соответствии с волновой моделью, показатель преломления n_{12} для света, переходящего из среды 1 в среду 2, должен быть равен v_1/v_2 , в то время как корпускулярная модель Ньютона предсказывает v_2/v_1 . Когда были проделаны измерения, было найдено, что предсказания волновой модели являются правильными, что явилось сильным доводом в пользу волноподобной картины распространения света.

д) На границе между двумя участками в волновой кювете с различной глубиной воды волны частично отражаются и частично преломляются. Это является дополнительным свидетельством в пользу волновой модели, так как ни одна из знакомых нам частиц не ведет себя столь неопределенным образом.

Методические указания. Это очень важный материал. Вероятно, лучше всего начинать его изучение с опыта II.9. Этот эксперимент должен дать учащимся хорошие общие представления о поведении волн, пересекающих две среды с различными значениями скорости распространения. После выполнения лабораторной работы можно задать прочесть этот раздел и решить несколько относящихся к нему задач. Вслед за этим можно провести полное обсуждение этого материала в классе.

Наверное, следует повторить в классе доказательство закона Снеллиуса для волн на воде в том виде, как оно представлено в тексте Учебника. Важно, чтобы все учащиеся поняли ход этого доказательства.

В этом месте, по-видимому, интересно обсудить полное внутреннее отражение водяных волн. Оно представляет собой просто частный случай преломления, когда волна, переходящая из среды с малой скоростью распространения в среду, где

она распространяется быстро, подвергается настолько сильному увеличению скорости и изменению направления распространения, что эта волна поворачивает и снова входит в первоначальную среду медленного распространения.

Таким образом, в случае полного внутреннего отражения возмущение в действительности проникает в среду, лежащую по другую сторону от поверхности, на которой происходит отражение. Интересно отметить, что в случае света лезвие

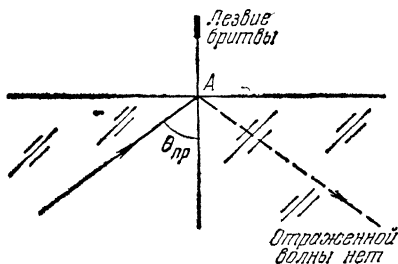


Рис. 130.

бритвы, прижатое острием к поверхности раздела «воздух — стекло» вдоль линии, перпендикулярной к плоскости чертежа в точке А (рис. 130), полностью срезает отраженный луч.

Желательно позволить некоторым учащимся попробовать получить полное отражение водяных волн в лаборатории. Сделать это нелегко. Поэтому лучше сначала удостовериться, что ваше оборудование обладает достаточно высокими качествами, что это вообще возможно осуществить. Вам нужно сделать «область медленного распространения» очень мелкой, а ваш генератор должен работать при очень низкой частоте. (Существенно иметь возможность производить 8 колебаний в секунду, а 5 колебаний в секунду было бы еще лучше.)

16.6. Дисперсия

Ц е л ь. Указать, что скорость распространения волн может зависеть от их частоты, и навести на мысль, что различные частоты могут быть ответственны за различную окраску света.

С о д е р ж а н и е. а) Скорость волн на воде зависит от их частоты; эта зависимость скорости от частоты называется *дисперсией*. Поскольку дисперсия различна при разной глубине воды, показатель преломления для волн, пересекающих границу между участками с различной глубиной воды, зависит от частоты.

б) В мелкой воде и при малых частотах дисперсия мала.

в) Поскольку преломление волн слегка зависит от частоты и поскольку преломление света слегка зависит от цвета, возможно, различный цвет света соответствует волнам различной частоты.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Этот раздел рекомендуем изучать полностью. Если учащиеся смогут пронаблюдать явления дисперсии в лаборатории, это окажет вам помощь.

Одну из наиболее ярких демонстраций дисперсии можно провести, возвращаясь к волновой кювете при расположении, когда наблюдается максимальное преломление (Вы должны иметь возможность получить ясно видимое изменение в направлении распространения не менее чем на 15 градусов. Сведения, содержащиеся в Приложении 6 на стр. 393, могут помочь вам в выборе наиболее удобных частот или глубин.) Когда волновая кювета действует таким образом, постепенно увеличивайте скорость мотора. К тому моменту, когда скорость удвоится или утроится, волны будут представляться на глаз пересекающими границу раздела без отклонения. Возможно, для наблюдения этих более высоких частот учащимся потребуется стробоскоп, хотя теперь уже многие из них научатся видеть высокочастотные волны, глядя сквозь свои пальцы и вода обеими руками взад и вперед или просто мигая глазами.

В задачу этого раздела не входит показать, что частота и цвет определенным образом связаны между собой. Главный вывод состоит в том, что частота *может* быть связана с цветом света. Это является правдоподобным допущением, потому что показатель преломления света зависит от цвета, а «показатель преломления» водяных волн изменяется с частотой. Раздел написан для учащихся, экспериментировавших с волнами в волновой кювете при мелкой воде и малых частотах. Ключевой пункт состоит в том, что дисперсия *может* зависеть от частоты; является ли она малой (как для волн на воде, так и для света) или же она велика в одном случае и мала в другом — не имеет значения. На этой стадии важны только качественные аспекты дисперсии.

16.7. Дифракция

Ц е л ь. Ввести представление о явлении дифракции волн. Показать зависимость дифракции волн на воде от длины волны и описать дифракцию света.

С о д е р ж а н и е. а) При прохождении волн сквозь отверстия направление распространения изменяется у краев отверстия. Это загибание называется дифракцией.

б) Выпуклость дифракционных явлений зависит от соотношения между длиной волны и шириной отверстия. Явление ярко выражено, когда размеры отверстия сравнимы или меньше длины волны. Эффект мал, когда длина волны мала по сравнению с размером отверстия. (Угол загибания зависит от отношения λ/w .)

в) Если дифракция света должна объясняться с помощью волновой модели, длина волны света должна быть очень мала.

Методические указания. Достаточно кратко проходите этот материал, но важно, чтобы учащиеся проделали какую-либо лабораторную работу по дифракции. Опыт II.10 должен предшествовать обсуждению этого раздела.

Вероятно, стоит повторить в классе выводы этого раздела, чтобы показать, что свет должен иметь очень малую длину волны. Давайте вспомним логическую структуру этого раздела.

1. Волны на воде показывают отражение, преломление и дисперсию.
2. Свет также испытывает отражение, преломление и дисперсию. Поэтому, возможно, свет распространяется подобно волнам.
3. Водяные волны загибают за угол препятствия.
4. Свет образует резкие тени. Поэтому волновая модель кажется неудовлетворительной.
5. Волны на воде загибаются, если длина волны мала.
6. Водяные волны, проходящие сквозь щель (или огибающие препятствие), испытывают значительное искривление, когда размеры щели (или препятствия) приблизительно равны или меньше длины волны.
7. Поскольку свет образует резкие тени обычных объектов, мы можем сделать вывод, что *если* его распространение является волноподобным, то его длина волны должна быть много меньше размеров этих объектов. Чтобы проверить эту возможность, потребуются эксперименты с малыми щелями и препятствиями, позволяющие выяснить, происходит ли загибание в этом случае.
8. Опыт показывает, что при размерах меньше $1/10$ мм происходит загибание света.

9. Таким образом, вместо того чтобы демонстрировать неудовлетворительность волновой модели, предварительное исследование дифракционных явлений подтверждает предсказание, полученное с ее помощью. Это надо рассматривать как сильное подкрепление волновой точки зрения.

В ходе проведенного доказательства мы пользовались материальными волнами на воде в качестве модели для исследования возможной природы света. Когда мы выводим свойства света из наблюдений над волновой кюветой, мы делаем экстраполяцию, которая должна быть проверена с помощью экспериментов со светом. Таким образом, наблюдение загибания волн на воде само по себе не доказывает загибание света, подобно тому как тот факт, что мы можем держать воду в ведерке, не доказывает возможности содержать в ведре свет. Однако в этом случае наша модель дает нам ключ к постановке правильных опытов со светом, указывая на важность величины λ/w в определении величины загибания.

ДОМАШНИЕ, КЛАСНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам

Интенсивная работа в лаборатории является ключом к доскональному пониманию материала, посвященного волнам. Кроме того, однако, решение задач существенно для приобретения навыков в аналитическом рассмотрении этого материала. Если у вас есть время, задавайте побольше задач.

В табл. 13 задачи классифицируются по их примерному уровню трудности и по разделам, к которым они относятся. Указаны те из них, которые наиболее подходят для обсуждения в классе. Особенно рекомендуемые задачи отмечены знаком #.

Разделы	Со звездочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
16.1—16.3	1—3	4 #, 5	6	7, 8, 9 #	6, 7, 9 #
16.4	10—12	13, 14 #	15	16	13, 15
16.5	17, 18, 20	19 #	21 #, 22—24	25 #	22, 23, 25 #
16.6			26, 27		26
16.7		28 #, 29	30, 31		29

Краткие ответы

1*. Около 20 см.

2*. $r' = 25^\circ$.

3*. а) Падающий импульс 2, отраженный импульс 1; б) $i = 70^\circ$.

10*. а) 85 м; б) уменьшится.

11*. $T = 1/4$ с; $f = 4$ с $^{-1}$.

12*. Уменьшить.

17*. Около пятого гребня снизу.

18*. $n \approx 1,8$.

20*. Нет, если только одна частота не кратна другой.

Ответы с указаниями и решениями

4. Если волновой гребень образует угол $i' = 30^\circ$ с барьером, то гребень отраженной волны составляет угол $r' = 30^\circ$ с барьером. Поскольку волна распространяется в направлении, перпендикулярном к ее гребню, направление распространения составляет угол 60° с барьером или угол 30° с нормалью к нему (рис. 131).

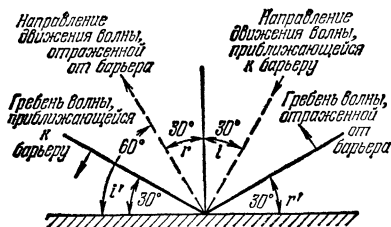


Рис. 131.

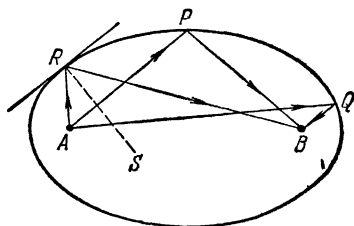


Рис. 132.

5. «Источник» находится у конца капельницы. Изображение источника находится в точке, расположенной на равном расстоянии под барьером за нижним обрезом рисунка. Это можно подтвердить с помощью циркуля.

6. Удостоверьтесь в том, что учащиеся понимают, что термин «идеальные условия» означает «идеальный отражатель» и «идеальное распространение волны». После работы с волновой кюветой некоторые учащиеся могут понимать под идеальной кюветой с полностью поглощающими стенками. (С этой задачей хорошо начать обсуждение фокусировки волн.)

Если погрузить палец в воду в центре круглого таза, то образуется круговой волновой импульс, который распространяется наружу, отражается, сходится обратно к центру, проходит сам сквозь себя и снова расходится и т. д. Учащиеся должны обратить внимание на то, что направление распространения в каждой точке расходящейся круговой волны идет вдоль нормали к отражающей поверхности. Следовательно, движение соответствующего сегмента отраженной волны происходит обратно вдоль той же самой линии по направлению к центру.

Это явление можно наблюдать, если капнуть чем-нибудь в центр чашки или стакана с жидкостью.

7. В этой задаче геометрические свойства эллипса предлагается вывести из того факта, что круговой волновой импульс, возбужденный в точке A , отражается (фокусируется) таким образом, что он сходится в точке B .

а) В задаче сформулировано два требования:

1) Отрезок волнового гребня, исходящего из точки A по направлению к любой точке эллипса (такой, как P), должен отразиться в таком направлении, чтобы после отражения он двигался по направлению к точке B (рис. 132).

2) Все такие отрезки волнового гребня должны прийти в точку B одновременно.

Условие 1) требует, чтобы в любой точке эллипса R (рис. 132) углы ARS и BRS были равны. Условие 2) представляет обычное геометрическое определение эллипса: такие расстояния, как ARB , APB , AQB и т. д., должны быть все равны между собой. Для определения эллипса достаточно условия 2), а условие 1) может быть выведено из него, однако проводить доказательство этого в классе нежелательно (см. Приложение к этой задаче). Тот факт, что эллиптический отражатель работает в волновой кювете, дает учащимся возможность непосредственно это проверить. Точки A и B называются *фокусами* эллипса.

б) Он будет сходиться в точке A . Все отражения симметричны относительно нормали к отражающей поверхности, и поэтому распространение волны обратимо.

в) Нет. Для точек вблизи фокусов получается довольно хорошее сходжение, но все равно не полное. Попробуйте сделать это с круговым отражателем, например, в чашке с кофе, пуская в нее капли с некоторой высоты, так чтобы они падали примерно в сантиметре от центра. При этом заметно фокусирование волн в точке, находящейся в сантиметре от центра по другую сторону.

Учащимся будет интересно увидеть отражение от эллиптического барьера в волновой кювете. Такой барьер легко изготовить из гибкой полоски алюминия. Ее можно изогнуть по шаблону эллипса, начерченному обычным способом (рис. 133).

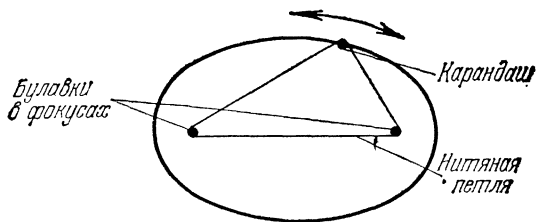


Рис. 133.

Интересно заметить, что полная фокусировка из одной точки в другую получается с помощью эллиптического зеркала, в то время как полная фокусировка параллельного света требует параболического зеркала, а полная фокусировка из точки в ту же самую точку требует сферического зеркала. Те из ваших учащихся, которые имеют склонность к геометрии, вспомнят, что эти кривые представляют конические сечения (рис. 134). В самом деле, можно показать, что для получения идеального мнимого изображения точки, находящейся слишком близко к зеркалу, чтобы могло получиться ее действительное изображение, нужно гиперболическое зеркало.

Приложение. Приведем одно из доказательств того, что прямые, проведенные из фокусов эллипса в любую точку на этой кривой, образуют равные углы с нормалью к эллипсу в этой точке.

Рассмотрим пути ACB , ADB и AEB (рис. 135, а). На основании геометрического определения эллипса эти пути равны. Построим касательную к эллипсу в точке D — прямую $C'DE'$ и продолжим прямые AC и AE до пересечения с этой касательной в точках C' и E' . Проведем также прямые $C'B$ и $E'B$, как показано

на рис. 135, а. Очевидно, путь $AC'B > ACB$ и путь $AE'B > AEB$. Поскольку пути ACB , AEB и ADB равны, отсюда следует, что пути $AC'B$ и $AE'B$ больше, чем ADB . Поэтому ADB представляет кратчайший путь из A в B , имеющий общую точку с прямой $C'DE'$. Эта информация может быть теперь использована для доказательства равенства углов $\angle C'DA$ и $\angle E'DB$.

Для упрощения чертежа нарисуем отдельно прямую $C'DE'$ и луч ADB (рис. 135, б). Теперь построим точку A' на равном расстоянии позади линии $C'DE'$

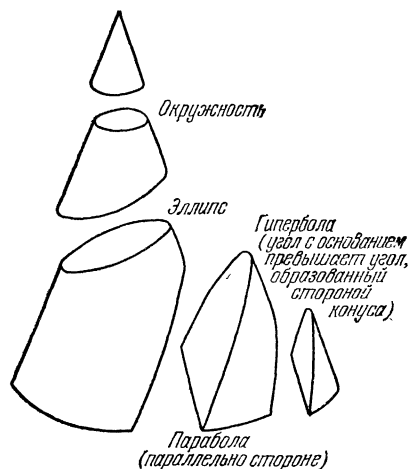


Рис. 134.

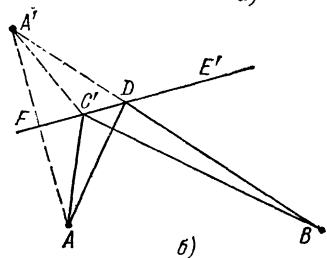
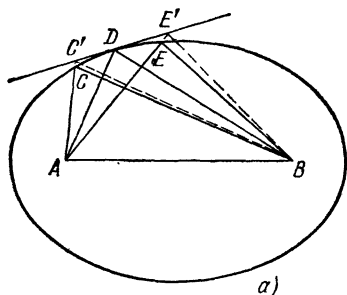


Рис. 135.

по отношению к A , т. е. $AF = A'F$, и AFC' — прямой угол (по построению). Тогда путь $AC'B = A'C'B$ и $ADB = A'DB$. Однако $A'DB$ является кратчайшей из всех линий между A' и B , когда $A'DB$ — прямая. Если $A'DB$ — прямая, то $\angle A'DF = \angle E'DB$. Однако $\angle A'FD = \angle AFD$, следовательно, $\angle A'DF = \angle ADF$ и $\angle ADF = \angle E'DB$. Если теперь провести нормаль к прямой $C'DE'$ в точке D , то образуются два угла, дополнительные к углам $\angle ADF$ и $\angle E'DB$, которые равны в силу равенства этих углов. Это завершает доказательство.

8. Проследим за тремя отрезками кругового импульса (рис. 136). После отражения они превращаются в отрезки прямолинейного импульса, который в некоторый момент совпадает с прямой линией на чертеже. Расстояние, которое каждый отрезок импульса проходит от фокуса до любой точки на параболе и затем до прямой линии, должно быть постоянным. Для того чтобы различные участки кругового импульса отражались в направлении, параллельном оси, перпендикуляр к параболе в каждой точке должен быть биссектрисой угла между прямой, проведенной из фокуса, и прямой, параллельной оси.

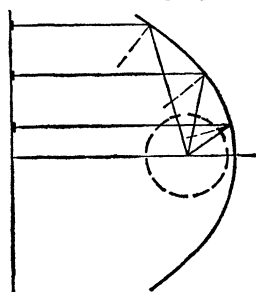


Рис. 136.

Поучительно сравнить эту задачу с задачей 7, где рассматривается эллиптический отражатель. Если смещать фокус B все дальше и дальше влево, прямые, идущие от отражателя к точке B , стремятся стать параллельными, а отраженный импульс становится прямолинейным. Таким образом, параболу можно рассматривать как эллипс, один из фокусов которого находится в бесконечности.

9. а) После отражения прямолинейный импульс остается прямолинейным, но его концы меняются местами. Для качественного понимания этого, по-видимому, лучше всего рассмотреть сперва одну половину импульса, обозначенную ON на рис. 137, *а*, и проследить ее отражение, а затем прибавить вторую половину, изображенную штриховой линией (рис. 137, *б—е*). Доказательство отложим до рассмотрения вопроса в п. б).

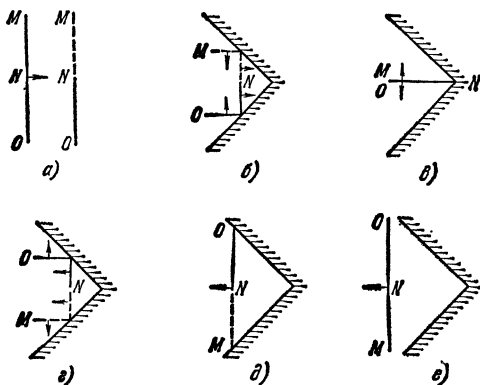


Рис. 137.

б) Эта часть задачи довольно трудна. Снова рассмотрим только часть импульса NP (рис. 138, *а*). Точка M проходит путь, указанный пунктиром, к точке M' , а точка P проходит по указанному пути к точке P' . Рис. 138, *б—д* показывают промежуточные положения участка импульса PMN . На рис. 138, *б* импульс показан после частичного отражения. QS перпендикулярно к первому зеркалу, и, таким

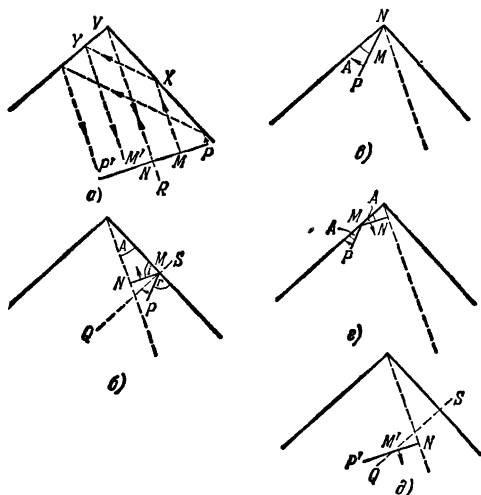


Рис. 138.

образом, параллельно второму зеркалу. Поскольку $r=i$, дополнительные углы PMQ , NMQ и A также равны. Угол падения на второе зеркало равен углу PMQ и на рис. 138, *в* обозначен для простоты буквой A . На рис. 138, *г* угол отражения также обозначен как угол A . На рис. 138, *д* угол $SM'N$ равен углу A (углу отра-

жения на рис. 138, г), поскольку их стороны взаимно параллельны. Таким образом, показано, что отраженный импульс параллелен падающему, но распространяется в противоположном направлении с переставленными концами P и N . Желательно обсудить путь точки импульса N вдоль прямой RV к зеркалам и обратно. Этот путь можно рассматривать как предел, к которому стремится путь $MXUM'$, когда точка M смещается по направлению к точке N вдоль фронта волны PN .

Заметим, что при нормальном отражении от плоского зеркала левая и правая стороны *не переходят* друг в друга. В результате ваша левая рука является правой рукой вашего изображения. Однако, используя угловое зеркало, вы обнаружите, что когда вы двигаете своей правой рукой, ваше изображение также двигает его правой рукой. Это единственный способ видеть себя так же, как вас видят другие!

13. Эту задачу можно использовать как толчок к обсуждению формулы $v=f\lambda$. Ее можно рассмотреть и логически, не обращаясь непосредственно к формуле.

а) $v=f\lambda=10 \cdot 3=30$ см/с.

б) $v=f\lambda$, $30=2\lambda$, $\lambda=15$ см. Или другой вариант: Первый импульс проходит расстояние $d=vt=30 \cdot 0,5$, прежде чем другой начнет свое движение. Поэтому он находится на 15 см впереди второго. Следовательно, они движутся в 15 см друг от друга. (Заметим, что эта задача предназначена для использования в связи с разделом 16.4, где мы еще говорим о единственной скорости распространения в среде, независимо от частоты возмущения.)

14. Один оборот стробоскопа в секунду даст два открытия щели в секунду. Между открываниями щели любой отдельный гребень пройдет в точности две длины волны. Таким образом, картина будет неподвижна при расстояниях между гребнями, равных одной длине волны (рис. 139, а).

Два оборота стробоскопа в секунду дают четыре открывания щели в секунду, что совпадает с частотой периодической волны. Вы увидите остановленную картину с расстоянием между гребнями в одну длину волны. Вид картины будет тем же самым, как и при одном обороте в секунду (рис. 139, б).

Четыре оборота в секунду, освещающие волну 8 раз в секунду, дадут остановленную картину, в которой гребни кажутся находящимися на расстоянии в полволны друг от друга (рис. 139, в).

15. а) $\lambda=10$ см/5, поэтому $\lambda=2$ см. Некоторые учащиеся могут допустить ошибку, считая, что между шестью гребнями лежит шесть длин волн.

б) В каждый данный момент трудно быть уверенным в том, что в центре картины (в источнике) находится гребень волны. Поэтому мы можем ошибиться на некоторую долю длины волны. Выражаясь более строго, мы не знаем фазу волны в источнике.

в) Если мы делаем определенную ошибку при установлении положения волнового гребня или при измерении, ошибка в определении длины волны при измерении пяти волн будет составлять всего лишь $1/5$ от той, которую мы получили бы, измеряя одну волну.

16. а) Волна пройдет в воде 1,2 см между импульсами; поэтому источник между импульсами должен проходить 0,4 см. Скорость источника должна составлять $0,4/1,2$, или $1/3$ от скорости волн, т. е. скорость волн должна быть в 3 раза больше скорости источника.

б) Каждый импульс будет производиться на 0,4 см дальше, и поэтому длина волны будет $1,2 \text{ см} + 0,4 \text{ см} = 1,6 \text{ см}$.

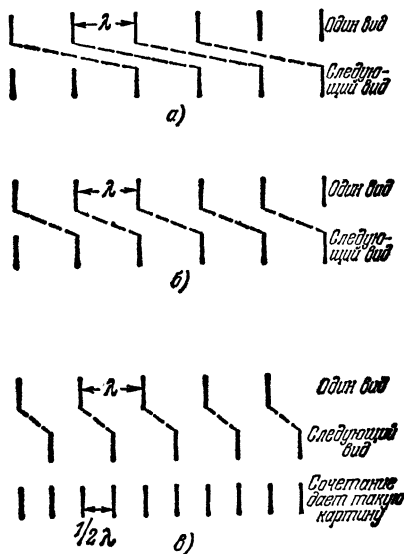


Рис. 139.

Заметим, что эффект Доплера можно легко продемонстрировать в волновой кювете с помощью резинового шланга, надетого на стеклянную трубку, изогнутую под углом 90° у одного конца. Держа конец стеклянной трубки примерно в 1 см над поверхностью воды и двигая ее вдоль кюветы, выдыхайте воздух равномерно и быстро через шланг. Если скорость источника превышает скорость распространения волн, то возникает ударная волна.

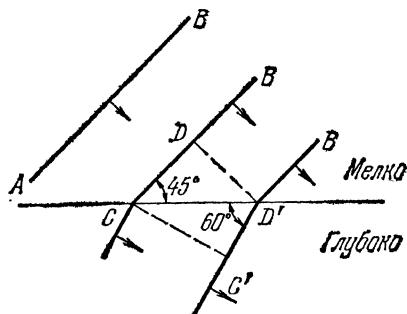


Рис. 140.

случае следует исходить из основных положения волнового фронта, учащимся придется пользоваться построением Гюйгенса.

а) На рис. 140 волновой импульс AB показан в три последовательных момента времени. Между двумя последними точка D движется к точке D' , а C — к C' . Однако время прохождения от D к D' равно DD'/v_m , а время движения от C к C' равно $CC'/v_{г\lambda}$ (где v_m и $v_{г\lambda}$ — скорости в мелкой и глубокой частях). Эти два времени равны. Следовательно,

$$\frac{DD'}{v_m} = \frac{CC'}{v_{г\lambda}} = \frac{CD' \sin 60^\circ}{CD' \sin 45^\circ} = \frac{\sin 60^\circ}{\sin 45^\circ} = \frac{0,866}{0,707} = 1,225.$$

б) $v_m = v_{г\lambda}/1,225 = 25/1,225 = 20,4$ см/с.

22. Многие учащиеся решают эту задачу, не подозревая о том, что они делают при ее решении два предположения: 1) свет есть волна и 2) частота света не изменится при переходе из одной среды в другую. Желательно обратить их внимание на это обстоятельство при обсуждении задачи.

а) Автомобиль проходит 2,1 м за каждый цикл (один оборот); таким образом, $(2,1 \text{ м/об}) \cdot 200 \text{ об/мин} = 420 \text{ м/мин}$.

б) Световые волны проходят $3 \cdot 10^{-5}$ см за каждый цикл источника; таким образом, $v = f\lambda = (3 \cdot 10^{-5} \text{ см}) \cdot (6 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}) = 1,8 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$.

в) $\lambda = (3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}) / (6 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}) = 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}$.

г) $n = v_{\text{вак}}/v_{\text{жидк}} = (3 \cdot 10^{10}) / (1,8 \cdot 10^{10}) = 1,7$.

23. Эта задача больше подходит для обсуждения в классе, чем для задания на дом. Первая часть задачи включает изменение скорости волн на воде при изменении глубины. Учащиеся могут справиться с этой частью после того, как они видели, что в волновой кювете волны движутся медленнее в мелкой воде. Вторая часть задачи несколько труднее.

Учащиеся должны понять, что: 1) подобное явление может происходить, если показатель преломления постепенно изменяется в какой-нибудь среде и 2) такие условия реализуются в действительности. Здесь можно вспомнить задачу 14 гл. 13, в которой рассматривается атмосферное преломление.

а) Мелкая часть кюветы справа.

б) На первый взгляд можно подумать о линзе или призме из стекла с постепенно меняющимся показателем преломления. Однако такие образцы вообще не изготавливаются. В то же время в природе существует один пример такого преломления. При прохождении света через атмосферу его лучи искривляются благодаря

19. а) $n_{12} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{0,69 \pm 0,01 \text{ см}}{0,42 \pm 0,02 \text{ см}} = 1,64 \pm 0,10$.

б) $n_{12} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin (57,5^\circ \pm 1,0^\circ)}{\sin (29,0^\circ \pm 2,0^\circ)} = 1,74 \pm 0,14$.

Эти результаты совпадают в пределах точности измерений.

21. Эту задачу на преломление можно решить с помощью формулы, или же ее можно использовать для обсуждения идей, лежащих в основе преломления волн, причем в последнем

тому, что показатель преломления воздуха постепенно изменяется от 1 до его максимального значения на уровне моря. Это позволяет видеть Солнце несколько мгновений спустя «после» заката и «перед» восходом (рис. 141).

Атмосферное преломление ответственно также и за «водные» миражи, которые обычно наблюдаются на дорогах в жаркие дни. Солнце нагревает дорогу, и воздух у ее покрытия становится более теплым (и менее плотным), чем окружающий воздух. В этих условиях скорость света у поверхности дороги больше, чем над ней. Тогда свет от удаленного источника, идущий к дороге перед наблюдателем, будет постепенно искривляться вверх. При соответствующем угле наблюдения можно видеть небо, глядя слегка вниз по направлению к дороге. Наблюдатель объясняет это явление как результат отражения от воды, якобы покрывающей дорогу.

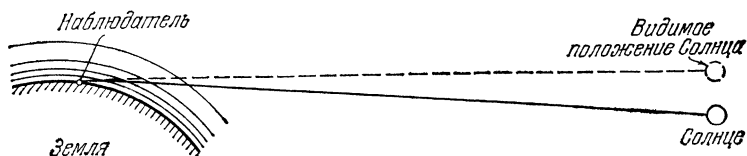


Рис. 141.

24. Надо указать учащимся, что скорость волны в мелкой части продолжает оставаться равной 24 см/с, хотя частота и увеличивается.

а) Показатель преломления равен $34/24$ в одном случае и $32/24$ в другом. В первом случае $\sin 60^\circ = (34/24) \sin \theta$, $\theta = 38^\circ$. Во втором случае $\theta = 41^\circ$.

б) Чтобы измерить непосредственно скорость распространения периодической волны, необходимо произвести измерение времени и расстояния или измерение длины волны и частоты. В волновой кювете, в принципе, можно использовать любой из этих методов.

Сравнение скорости распространения в одной среде со скоростью распространения в другой можно произвести, измеряя изменение угла распространения при переходе волны через границу между этими средами. Таким образом, если известно, что скорость в мелкой воде равна 24 см/с, то измерение углов преломления высокочастотного и низкочастотного возмущений могло бы, в принципе, дать значения 32 см/с и 34 см/с для соответствующих скоростей, однако разность между этими значениями слишком мала, чтобы ее можно было обнаружить в обычной волновой кювете.

Во-первых, очень трудно контролировать частоту большинства волновых вибраторов с достаточной точностью, чтобы сделать эту малую разность скоростей измеримой. Во-вторых, движение волны и ширина ее фронта затрудняют установление ее положения в любой момент времени. Если с помощью стробоскопа «остановить» волны, то эту трудность можно преодолеть и измерить длину волны, если частота поддерживается постоянной. Однако даже при использовании стробоскопического диска угловые измерения могут быть ненадежными. В результате взаимодействия конечных скоростей волны и щели получается кажущееся изменение направления распространения. Когда щель движется поперек волны, волна смещается, и это влияет на ее кажущееся направление.

С другой стороны, если желательно только показать изменение показателя преломления с частотой, не стоит никакого труда продемонстрировать качественно (в обычно используемом диапазоне частот) уменьшение загибания волн при увеличении частоты, означающее уменьшение показателя преломления.

в) В аналогичных опытах с оптическими приборами (призменный спектроскоп) очень легко измерять углы, в то время как измерить скорость света весьма трудно, особенно в различных средах. Поэтому в случае света предпочтительнее измерение углов. Это позволяет наблюдателю вычислять скорость света в любой среде относительно его скорости в воздухе.

25. Эта важная задача заслуживает того, чтобы обсудить ее в классе. Она представляет возможность повторить преломление в линзах с волновой точки зрения.

а) Прямолинейные волновые гребни искривляются таким образом, что они сходятся к «фокусу» в глубокой области позади барьера.

б) Это модель собирающей линзы (рис. 142). Заметим, что волны распространяются медленнее в мелкой области и что волна «сходит», т. е. фокусируется, в точке C , положение которой таково, что каждый участок волнового гребня затрачивает на движение к точке C точно такое же время, как и любой другой. Время перехода из A в C через точку B равно времени перехода из D в C через точку E . Очевидно, путь ABC длиннее, но это в точности компенсируется тем, что путь DEC содержит более длинный участок, проходящий в мелкой области, где волна распространяется медленнее.

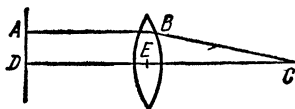


Рис. 142.

Желательно провести сравнение с задачей 7, где показано, что фокусировка при отражении от эллиптического барьера происходит благодаря тому, что все отрезки волнового гребня затрачивают одно и то же время на достижение фокуса. В этой задаче,

хотя расстояния, проходимые различными отрезками волнового фронта различны, главная мысль та же, что и прежде: все участки волнового фронта достигают фокуса в одно и то же время.

26. а) На рис. 16.27 длина волны короче, а фокусное расстояние длиннее, чем на рис. 16.26.

б) Фотография на рис. 16.27 показывает, что волны имеют меньшую длину волны, чем на рис. 16.26. Поэтому мы приходим к заключению, что в этом случае генератор волн колеблется с более высокой частотой.

Мы видим также, что эффективное фокусное расстояние линзы увеличивается при увеличении частоты и уменьшении длины волны. Это означает, что отношение скоростей в глубокой и мелкой воде уменьшается при возрастании частоты.

27. а) Волна будет распространяться быстрее в глубокой, чем в мелкой воде. Таким образом, поскольку средняя часть прямой волны распространяется по более глубокой воде, чем ее концы, средняя часть уйдет вперед. После прохождения области глубокой воды волна искривится наружу, как если бы она исходила из точечного источника. Картина будет соответствовать участкам расходящегося кругового волнового фронта.

б) Это устройство представляет модель двояковыпуклой воздушной линзы в стекле или в воде.

28. Эта задача имеет отношение к порядку величины дифракционных эффектов.

Свет может пройти сквозь щель шириной в 1 см, образуя резкие тени от ее краев. На основании зависимости дифракции от длины волны мы можем прийти к заключению, что длина световых волн должна быть гораздо меньше одного сантиметра.

29. Если бы длина световой волны составляла 0,1 мм, мы могли бы видеть только объекты, большие 1 мм, и следовательно, не могли бы отчетливо различить ушко иголки. Благодаря размерам наших зрачков, мы могли бы различать лишь точки, угловое расстояние между которыми превышает несколько градусов (мы даже не могли бы разглядеть отчетливо иголку).

30. Это упражнение относится к качественным представлениям о дифракции звуковых волн. Дифракция звуковых волн позволяет нам слышать звук из-за угла даже при отсутствии отражающих поверхностей, помогающих «обогнуть угол». Короткие волны дифрагируют меньше, чем длинные. Это может быть очень нестрого проверено. Поклонники высококачественного воспроизведения грамзаписей знают, что «пищалка» (маленький высокочастотный или коротковолновый громкоговоритель) должен быть «направлен» на слушателя. Динамик, воспроизводящий басы (низкочастотный или длинноволновый), может быть направлен в любом направлении. Ввиду важности дифракционных эффектов, даже с крупномасштабными объектами, мы можем прийти к заключению, что длина волны звуковых волн должна иметь порядок нескольких сантиметров.

31. Эту задачу можно задать совместно с задачей 30. Она может быть решена с помощью формулы $v = f\lambda$, из которой $\lambda = v/f$:

$$\lambda_1 = (330 \text{ м/с}) / (30 \text{ с}^{-1}) = 11 \text{ мм}, \quad \lambda_2 = (330 \text{ м/с}) / (15000 \text{ с}^{-1}) = 0,022 \text{ м}.$$

17 ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

До сих пор волновая модель света не противоречила его свойствам, изученным ранее. Предсказывает ли волновая модель какие-либо новые черты, проявление которых мы еще не замечали в наших предварительных опытах со светом? Суперпозиция волн, распространяющихся в одном измерении, показывает, что при прохождении одной волны сквозь другую образуются области их полного взаимного уничтожения — узлы. Обладают ли двухмерные волны в волновой кювете подобным же свойством интерферировать при наложении?

В этой главе проводится как качественное, так и количественное изучение интерференции волн на воде. Учащийся, наблюдавший интерференционную картину от двух точечных источников и изучивший визуальное влияние на эту картину изменения расстояния между источниками и изменения их частоты, обладает прочным фундаментом для понимания аналогичных явлений в случае света, звука и т. д. Из измерений, проведенных над интерференционными картинами в волновой кювете, можно вычислять длины волн. Поэтому работа в лаборатории с волновой кюветой является важной частью изучения материала этой главы. Столь же важно, чтобы каждый учащийся проделал те или иные задачи, связанные с графическими построениями, подобные задачам 5 и 6.

Краткое содержание главы 17

Раздел 17.1. Подходящие периодические волны, посланные с противоположных концов пружины, могут образовывать узлы в определенных фиксированных точках при прохождении одной из этих волн сквозь другую.

Раздел 17.2. Для нахождения с помощью графических методов интерференционной картины, образующейся в волновой кювете от двух точечных источников, испускающих круговые волны одной и той же частоты и с одинаковыми начальными фазами, используется принцип суперпозиции. Области с удвоенной высотой гребней и глубиной впадин движутся от источников наружу и разделяются линиями невозмущенной воды, которые также простираются наружу от источников.

Разделы 17.3, 17.4. Разность расстояний от двух источников до любой точки на линии узлов равна нечетному числу полуволн. При удалении от источников определение разности путей с помощью прямого измерения привело бы к большой неточности. Геометрия позволяет довольно просто найти соотношение между разнесением источников, положением линии узлов и длиной волны. Это соотношение можно проверить с помощью измерений, не требующих слишком высокой точности.

Раздел 17.5. Если два источника испускают волны не в фазе, линия узлов смещается, изгибаясь более резко вокруг запаздывающего источника. Методы,

развитые в предыдущих разделах, обобщаются с целью получить математическое соотношение, включающее запаздывание по фазе.

Р а з д е л 17.6. Заключение и выводы.

План изучения главы 17

Время, необходимое для усвоения понятий раздела 17.1 (табл. 14), будет зависеть от того, насколько учащиеся овладели понятиями гл. 15. В конкретизации представлений о периодических волнах могут оказать помощь демонстрации с подвешенной пружиной. Материал этого раздела должен быть понят, однако постарайтесь не тратить на него слишком много времени. Лабораторная работа II.11 (предварительный эксперимент) должна быть выполнена после обсуждения этого раздела.

Когда учащиеся, производя наблюдения над волновой кюветой, увидят, что две волны могут создать нулевое возмущение в некоторых точках,— половина сражения выиграна. Им будет легче следить за рассуждениями в разделе 17.2 Учебника, если они к тому же сделают несколько задач на построение графиков. Первая часть лабораторной работы II.11 может служить введением к этому разделу.

Аналитическое рассмотрение, проведенное в разделах 17.3 и 17.4 Учебника, может быть дополнено для убедительности графической проверкой, предлагаемой в задачах 6, 12 и 15. Вторая часть лабораторной работы II.11 может быть выполнена после прохождения этих разделов в классе.

Изучение узловых линий при $p=1/2$ в разделе 17.5 представляет быстрейший способ убедить учащихся в том, что относительная фаза является важным определяющим фактором. При изучении этого раздела даже способные учащиеся могут испытывать затруднения. Не пытайтесь проработать этот материал или добиться полного понимания до тех пор, пока его изучение не покажется достаточно легким делом. Лабораторную работу II.12 можно провести в связи с работой над этим разделом.

ТА Б Л И Ц А 14

Глава 17	9-недельный план изучения части II			14-недельный план изучения части II		
Разделы	В классе, часы	В лабора- тории, часы	Опыты	В классе, часы	В лабора- тории, часы	Опыты
17.1, 17.2	1	1	II.11	2	2	II.11
17.3—17.5	1	1	II.12	2	1	II.12

Дополнительные материалы к главе 17

Лаборатория. Опыт II.11 (*Волны от двух точечных источников*) — предварительный эксперимент, предназначен для выполнения после первого урока по этой главе.

Опыт II.12 (*Интерференция и фаза*) надо выполнять параллельно с изучением раздела 17.5.

Домашние, классные и лабораторные задания. Ответы, решения и таблица классификации задач по их примерному уровню трудности содержатся на стр. 326.

17.1. Интерференция волн на пружине

Ц е л ь. Ввести понятие об интерференции путем рассмотрения периодических волн в одном измерении, а именно периодических волн на пружине.

С о д е р ж а н и е. а) Краткий обзор отражения, преломления и дифракции как характерных свойств волнового движения.

б) Средняя точка между двумя подобными, но взаимно обратными волновыми импульсами на пружине остается неподвижной, когда импульсы пересекают друг друга. Если периодическая волна испытывает отражение, то в определенных местах пружины падающая и отраженная волны создают нулевое полное возмущение. Те точки, где это происходит, называются узлами. Суперпозиция двух волн с образованием узлов называется интерференцией.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Этот материал, составляющий основу для дальнейшего изучения, должен быть детально понят, прежде чем можно будет перейти к двумерным расположениям узлов. Время, требуемое для прохождения этого раздела, будет в сильной степени зависеть от того, насколько хорошо учащиеся поняли первые четыре раздела гл. 15.

Понятие узлов на спиральной пружине следует вводить с помощью демонстраций на подвешенной пружине, решения задач, подобных задаче 3, и следующих вопросов.

1. Рассмотрим два положительных (направленных вверх) импульса, посылаемых одновременно с противоположных концов пружины. В какой точке образуется при этом максимальный импульс, направленный вверх?

2. Если генератор импульсов заставляет пружину двигаться вверх на одном конце, в то время как второй импульс посылается с помощью движения другого конца вниз, то каким образом будет двигаться центральная точка при встрече этих импульсов?

3. Если два генератора посылают импульсы противоположной полярности, то как должны быть связаны формы этих импульсов для того, чтобы центр пружины был узловой точкой? (Нарисуйте несколько непарных импульсов, чтобы удостовериться, что учащиеся понимают необходимость как правильной формы, так и величины встречного импульса для образования узла.)

4. Для проверки усвоения изобразите один из импульсов, показанных в левом столбце на рис. 143, и попросите кого-нибудь из учащихся нарисовать импульс, который должен быть послан с другого конца.

Учащиеся получат более ясное представление о взаимном уничтожении волн, если вы используете несколько импульсов, не являющихся симметричными; в противном случае некоторые учащиеся могут подумать, что узлы получаются только, если каждый из импульсов симметричен по отношению к своему собственному центру.

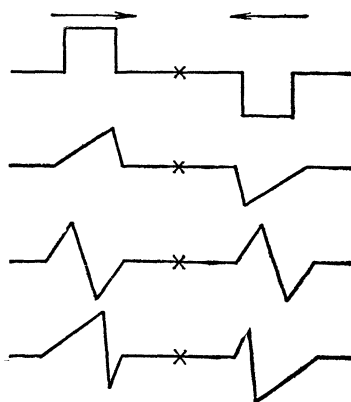


Рис. 143.

После таких упражнений задача 3 окажется, вероятно, нетрудной для ваших учащихся.

Если у вас устроен подвес из спиральной пружины, было бы очень неплохо подготовить класс к понятиям разности хода и разности фаз в двух измерениях с помощью следующего упражнения. Пошлите по одному учащемуся к каждому из концов пружины и попросите каждого из них послать положительный импульс, как только третий учащийся сосчитает до трех. Затем предложите классу решить, действительно ли учащиеся послали свои импульсы в один и тот же момент времени. Даже если учащиеся проделывают это, не производя тщательных лабораторных измерений, они быстро согласятся с тем, что наблюдение импульсов при их сложении в средней точке, где должно иметь место максимальное смещение, является наилучшим способом для решения вопроса. Если один учащийся посылает положительный (направленный вверх) импульс, а другой отрицательный (направленный вниз), то в средней точке должен получиться узел.

Спросите, что можно сделать для того, чтобы заставить импульсы пересечься в другой точке. Попросите класс решить, какой из учащихся должен передвинуться (и каким образом), чтобы оставить точку пересечения импульсов в центре даже в том случае, если один учащийся посылает свой импульс позднее, чем другой. Удостоверьтесь в том, что учащиеся понимают связь между точкой пересечения, разницей во времени испускания двух импульсов и двумя длинами путей.

17.2. Интерференция волн, посылаемых двумя точечными источниками

Ц е л ь. Выработать понятие об узловых линиях в случае поверхностных (двумерных) волн.

С о д е р ж а н и е. Два точечных источника, генерирующих волны (в фазе) одной и той же частоты (и амплитуды), образуют ряд линий, вдоль которых возмущение отсутствует; эти линии называются узловыми. Между узловыми линиями гребни усиливают гребни, а впадины усиливают впадины, давая удвоенные гребни и впадины, которые движутся наружу из области, занимаемой источниками.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Распространение понятия интерференции на случай двух измерений, с появлением узловых линий, очень важно для понимания остальных разделов этой главы и гл. 18.

Урок, или даже полурока, потраченные на качественное изучение интерференционных картин (первая часть лабораторной работы П.11) перед тем, как задавать раздел 17.2, будут способствовать пониманию учащимися материала при чтении. Побуждайте их к зарисовыванию того, что они видят в волновой кювете, а также к изучению картин с помощью стробоскопического диска.

Новым элементом в этом разделе является то, что волны распространяются в двух измерениях. В общем виде это часто представляет большую проблему для учащихся, хотя в действительности изучение этой темы оказывается несколько проще, чем можно было бы ожидать. Опыты с волновой кюветой и графические упражнения составляют необходимое дополнение к основному тексту Учебника при ознакомлении учащихся с интерференцией в двух измерениях.

Если изучению этого раздела предшествовала качественная часть лабораторной работы П.11, то несколько минут, потраченных в конце урока на то, чтобы показать на доске, как приступать к построению чертежей для задач 5 и 6, будут в большой степени способствовать пониманию учащимися текста Учебника. Рису-

нок, показывающий мгновенные положения гребней и впадин, позволит им выявить точки взаимного уничтожения, равно как и взаимного усиления волн. Сделайте ударение на принципе суперпозиции при этом построении. Для гребней можно использовать сплошные линии, а для впадин — штриховые. Посоветуйте учащимся начать такое построение, упражняясь в тщательном соблюдении равенства расстояний между последовательными окружностями, до того как они прочтут раздел 17.2. Для построения надо использовать большой лист бумаги, располагая источники вблизи центра листа и взяв длину волны около одного сантиметра.

В начале следующего урока полезно предложить учащимся провести узловые линии на рисунке к задаче 5. Это затем естественно приведет к дискуссии, из которой вы сможете определить, понятно ли им, что происходит между узловыми линиями. Обратите внимание на узловые линии, где уничтожение не является полным.

Теперь рассмотрим волны в двух измерениях. Одной из характерных черт такой волны, которая не подчеркивается в тексте Учебника и не важна при качественном рассмотрении, является убывание ее амплитуды по мере удаления волны от точечного источника. (Это происходит потому, что по мере расширения волны одно и то же количество возмущения приходится на все возрастающую поверхность, так что его интенсивность убывает.) Следовательно, если только мы не рассматриваем точку, равноудаленную от обоих источников, две волны не будут иметь в точности одну и ту же амплитуду. Во всех точках, удаленных от обоих источников, эта разница в амплитудах становится настолько малой, что ею можно пренебречь. В определенных местах (вдоль узловых линий) будет наблюдаться полное интерференционное гашение двух волн, т. е. поверхность воды будет оставаться невозмущенной.

С другой стороны, рассмотрим смещение воды вблизи от точек пересечения узловых линий с прямой, соединяющей источники. Волна от источника, ближайшего к узловой линии, будет, по определению, в противофазе с волной от более удаленного источника, однако она будет больше по амплитуде, так что волны не испытывают полного интерференционного гашения. Поверхность воды не будет невозмущенной в этой части узловой линии. Возмущение будет иметь, однако, локальный минимум в этой точке, т. е. будет меньше, чем в точках, непосредственно окружающих ее. Это легко видеть из рис. 17.6, 17.9 и других фотографий. Узловые линии четко обозначены в точках, удаленных от обоих источников, но узловая линия, которая подходит близко к одному из них, становится нечеткой и может даже исчезать в этой области.

Таким образом, при строгом подходе узловые линии должны определяться как такие, вдоль которых возмущение воды имеет локальный минимум, но не всегда в точности равно нулю. Однако в точках, удаленных от обоих источников, а также в точках, приблизительно равноотстоящих от источников, возмущение вдоль узловых линий будет пренебрежимо малым, и поверхность воды вдоль этих линий будет практически спокойной.

Во всех наших приложениях этих понятий к распространению света мы будем интересоваться точками, далекими от источников, где приведенное выше свойство не сказывается. Поэтому можно посоветовать вам не упоминать об этом, если только кто-нибудь из учащихся, при внимательном изучении наблюдаемой в волновой ювете картины или просто по интуиции, не задаст вам вопросов.

17.3. Форма узловых линий

Ц е л ь. Показать соотношение между разностью хода и длиной волны, которое выполняется для всех точек вдоль узловых линий.

С о д е р ж а н и е. Максимальное интерференционное гашение происходит в точках, для которых разность длин путей от обоих источников составляет $\frac{1}{2}\lambda$, $\frac{3}{2}\lambda$, $\frac{5}{2}\lambda$ и т. д. Любая узловая линия является геометрическим местом точек, для которых разность хода равна $(n - \frac{1}{2})\lambda$, где $n = 1, 2, 3, \dots$

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Вы должны подчеркнуть решающую роль разности хода. Учащиеся могут получить качественные представления, необходимые для понимания интерференции света, если они осознают, что разность хода в $\frac{1}{2}\lambda$ (или $\frac{3}{2}\lambda$, или $\frac{5}{2}\lambda$ и т. д.) означает интерференционное уничтожение. Именно на понятии разности хода в большей степени, чем на форме узловых линий, следует сделать ударение в этом разделе. Раздел надо пройти весьма быстро, как комментарий к развернутому построению, проведенному в разделе 17.2.

Построение, показанное на рис. 17.11 и развитое в задаче 12, будет полезно для обсуждения в классе или в качестве домашнего упражнения, иллюстрирующего роль разности хода. Физически это построение таково, что мы фиксируем внимание на определенной части волны от одного источника (гребне, впадине или промежуточной точке) и на соответствующем участке второго волнового профиля, который имеет как раз противоположное смещение. Пересечение этих двух участков волновых фронтов является точкой нулевого смещения. Мы отмечаем последовательные положения этого пересечения по мере радиального движения обеих волн наружу.

17.4. Длины волн, расстояния между источниками и углы

Ц е л ь. Разработать алгебру для расчета интерференционной картины на больших расстояниях от источников.

С о д е р ж а н и е. а) Когда расстояния от источников много больше расстояния между источниками, узловые линии практически становятся прямыми, которые (если их продолжить обратно) проходят через среднюю точку между источниками.

б) Когда расстояния велики, получение разности хода путем измерения длин путей с последующим вычитанием практически неосуществимо.

в) С хорошей степенью приближения, разность хода зависит от расстояния между источниками и угла, образованного прямолинейным участком узловой линии.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Эти идеи понадобятся в следующей главе. Удостоверьтесь, что учащиеся обладают правильным качественным пониманием природы интерференционной картины вдали от источников, даже если вы не можете тратить время на полное алгебраическое рассмотрение. В этом месте можно выполнить вторую часть лабораторной работы II.11.

Переход от изучения водяных волн в волновой кювете к изучению света включает огромное изменение масштабов. Следовательно, все эксперименты со светом будут включать области, далекие от источников света. Именно по этой причине мы сейчас изучаем узловые линии в удаленных областях, хотя они не так уж важны в волновых кюветах. Пояснения на этот счет помогут учащимся понять причины рассматриваемых идей этого раздела.

Учащиеся оценят трудность измерения разности хода с помощью прямого вычитания, если они попробуют проделать это графически. Задача 12 и рис. 17.11 дают простой способ построения узловых линий в непосредственной близости от источников, но на расстояниях порядка $5d$ или $10d$ (используем обозначения задачи 6) становится все труднее строить окружности достаточно точного радиуса, так чтобы их пересечения образовали гладкую, почти прямую линию. Учащиеся согласятся с тем, что для удаленных областей нужен иной метод. Они придут к выводу, однако, что для фотографий волновой кюветы, приведенных в тексте Учебника, прямое вычитание все еще является полезной процедурой.

Геометрические рассуждения, иллюстрируемые рис. 17.12 (включая результат, что для удаленной точки, такой, как P , два угла 1 и 2 должны быть почти прямыми), будут легче восприняты учащимися, если они проверят эти рассуждения с помощью графических измерений. Они должны рассмотреть ряд случаев, начиная с того, когда точка P лежит вблизи от источников S_1 и S_2 , и постепенно переходя к более удаленным точкам. При этом, если учащиеся ознакомились с графическими рассуждениями предыдущего раздела, то могут быть использованы те же самые рисунки.

На рис. 144 a — предварительно проведенные дуги, скажем, с $v_1 - v_2 = \frac{1}{2} \lambda$; b — дуга радиуса v_2 , проведенная теперь с центром в точке пересечения P , прямая линия c соединяет точки пересечения дуги v_2 , образуя равные углы 1 и 2. На объяснение этого стоит потратить некоторое время, поскольку такого рода приближения кажутся иногда странными и «не совсем верными» учащимся, которые имели дело до сих пор со строгой геометрией на плоскости. Коль скоро основное положение будет воспринято учащимися, приведенные в тексте Учебника рассуждения будут для них относительно легкими. Большую помощь во всех отношениях окажет практическое выполнение графических упражнений. В добавление к задаче 12 весьма полезны будут также задачи 6, 15 и 17.

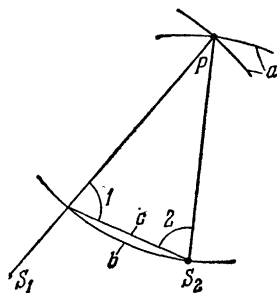


Рис. 144.

Обозначение θ_n может смутить некоторых учащихся, так как они могут подумать, что θ является переменной, и могут быть не знакомы с обозначением, при котором индекс показывает частное значение этой переменной. Возможно, придется явно упомянуть о том, что θ_n представляет ряд частных значений, каждое из которых определяется величиной n .

17.5. Фаза

Ц е л ь. Проиллюстрировать влияние относительной фазы источников на интерференционные картины.

С о д е р ж а н и е. а) Если два источника одинаковой частоты не погружаются в воду одновременно, то они «не совпадают по фазе». Если один источник запаздывает по отношению к другому на время t , отставание по фазе p определяется отношением $p = t/T$. Если, например, источник 1 запаздывает по отношению к источнику 2 на $\frac{2}{3} T$, то $p = \frac{2}{3}$.

б) Если p отлично от нуля, узловые линии смещены из их «синфазных» положений. Формула, определяющая положение узловых линий, является простым обобщением прежнего результата.

Методические указания. Проработка этого раздела будет зависеть от того, насколько хорошо ваши учащиеся усвоили предыдущие результаты. Понимание этого раздела будет сильно способствовать проникновению в суть интерференционных явлений, а рассуждения являются едва ли более сложными, чем в случае синфазного расположения. Однако учет фазы несколько усложняет процесс мышления, и ваши менее способные учащиеся могут чувствовать желание отказаться от него. Самое меньшее, чего вам следует добиваться, — это осознания того, что относительная фаза источников оказывает существенное влияние на картину узлов.

В этом месте можно выполнить лабораторную работу II.12.

Определение отставания по фазе до некоторой степени произвольно, и в любой конкретной проблеме говорить о том, какой из источников отстает по фазе, можно из соображений удобства. В примере, приведенном в тексте Учебника в начале этого раздела, S_2 запаздывает относительно S_1 на одну треть периода, так что он отстает по фазе на $p = 1/3$. Поскольку разности фаз, кратные периоду, несущественны, мы можем в то же время сказать, что S_1 отстает от S_2 на две трети периода, т.е. $p' = 2/3$. Чтобы избежать путаницы, мы придерживаемся одного условия относительно фазы. Для перехода к отставанию по фазе можно использовать задачу 20.

Не нужно разбирать в деталях новое изображение гребней и впадин для случая разных фаз (см. рис. 17.14). Если до учащихся дойдет, что один ряд окружностей имеет теперь меньшие радиусы, они легко согласятся с тем, что узловые линии получатся в новых положениях, а те учащиеся, которые способны проследить весь вывод в деталях, смогут, по-видимому, прямо перейти к обсуждению разности хода. Лучший способ убедить всех ваших учащихся, что фаза является определяющим фактором, состоит в обсуждении случая $p = 1/2$ в качестве частного случая. Совершенно ясно, что центральная линия является теперь узловой, поскольку она представляет линию равных разностей хода, так что вдоль нее обе волны всегда будут в противофазе. (Это один из случаев истинной узловой линии, т.е. нулевого возмущения воды, а не просто локального минимума.)

В курсах физики повышенного типа вместо отставания по фазе обычно используется фазовый угол. Учащимся в данном курсе не нужно определение фазового угла. Если вы упомянете о нем, это может их только запутать.

17.6. Заключение

Для изучения гл. 18 важно, чтобы учащиеся поняли выводы последнего абзаца раздела 17.6 Учебника. Чтобы интерференционная картина сохранялась неизменной, запаздывание по фазе должно оставаться постоянным. Чтобы наблюдать интерференцию света, надо предусмотреть в эксперименте постоянство разности фаз.

ДОМАШНИЕ, КЛАССНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам

Графические упражнения могут быть с успехом выполнены без сложных инструментов, однако они требуют большого внимания. Чтобы точно начертить много окружностей с одним и тем же центром, надо приколоть бумагу к чертежной доске или плотному листу картона. Использование разноцветных карандашей для различных деталей чертежа будет способствовать лучшему пониманию.

В табл. 15 задачи классифицируются по их примерному уровню трудности и по разделам, к которым они относятся. Указаны те из них, которые особенно

подходят для обсуждения в классе и лабораторных наблюдений. Особо рекомендуемые задачи отмечены значком #.

ТАБЛИЦА 15

Раз- делы	Со звез- дочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
17.1	1, 2	3#			
17.2	4, 7	8	5#, 6#, 9		5#, 8
17.3	10, 11	13	12		
17.4	14	18	15#, 16, 19	17	16, 17
17.5	21, 22	20	23—25	26, 27	20, 24, 25
17.6			28, 29		

Краткие ответы

1*. См. рис. 145.

2*. На расстоянии λ от стенки.

4*. «Удвоенный гребень» А; «удвоенная впадина» С; узловая точка В.

7*. Нет. Вдоль этой линии располагаются «удвоенные гребни», разделенные «удвоенными впадинами».

10*. Вторая узловая линия слева от центральной линии.

11*. Номера узловой линии, на которой лежит точка, т. е. значения числа n .

14*. Да, для всех $\lambda > 2d$.

21*. $p=0,36$.

22*. Да, в обоих случаях оба источника погружаются в воду одновременно.



Рис. 145.

Ответы с указаниями и решениями

3. Это простая задача, включающая длины путей, дает хорошую подготовку для рассмотрения последующих, более сложных интерференционных картин.

Для того чтобы решить, что происходит в точке P_1 на расстоянии λ от стенки, рассмотрим расположение импульсов в тот момент, когда отраженный импульс a достигает точки P_1 (рис. 146). Это произойдет через время $\frac{1}{2}T$ после момента, показанного на рис. 17.3.

Заметим, что как e , так и a прошли расстояние $\frac{1}{2}\lambda$ из их положений, показанных на рис. 17.3. Точно так же, как действия импульсов a и b уничтожают друг друга в точке P , действия импульсов a и c будут уничтожать друг друга в точке P_1 . По прошествии времени T импульсы b и d встретятся в точке P_1 , и их действия взаимно уничтожатся.

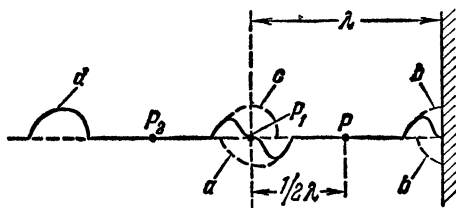


Рис. 146.

Подобным же образом можно показать, что точка P_2 будет узловой. Когда импульсы a и d встречаются в точке P_2 , импульсы b и c встретятся в точке P . Это произойдет через время $\frac{1}{2}T$ после момента, изображенного на рис. 146, или через время T после момента, соответствующего рис. 17.3.

5. Решение этой задачи должно помочь учащимся понять разделы 17.2 и 17.3. Проследите, чтобы учащиеся выполняли рисунки тщательно; в противном случае при небрежном построении закономерность интерференционной картины в более удаленных точках будет утрачена.

а) На рис. 147 выбран масштаб, соответствующий $\lambda=1$ см. Гребни в момент a изображены сплошными линиями. Впадины для того же самого момента изображены

прерывистыми линиями. Взаимное уничтожение происходит там, где гребни и впадины пересекают друг друга. Места взаимного уничтожения отмечены черными точками, и эти точки соединены между собой в правой части рисунка, чтобы показать картину узловых линий в этой части.

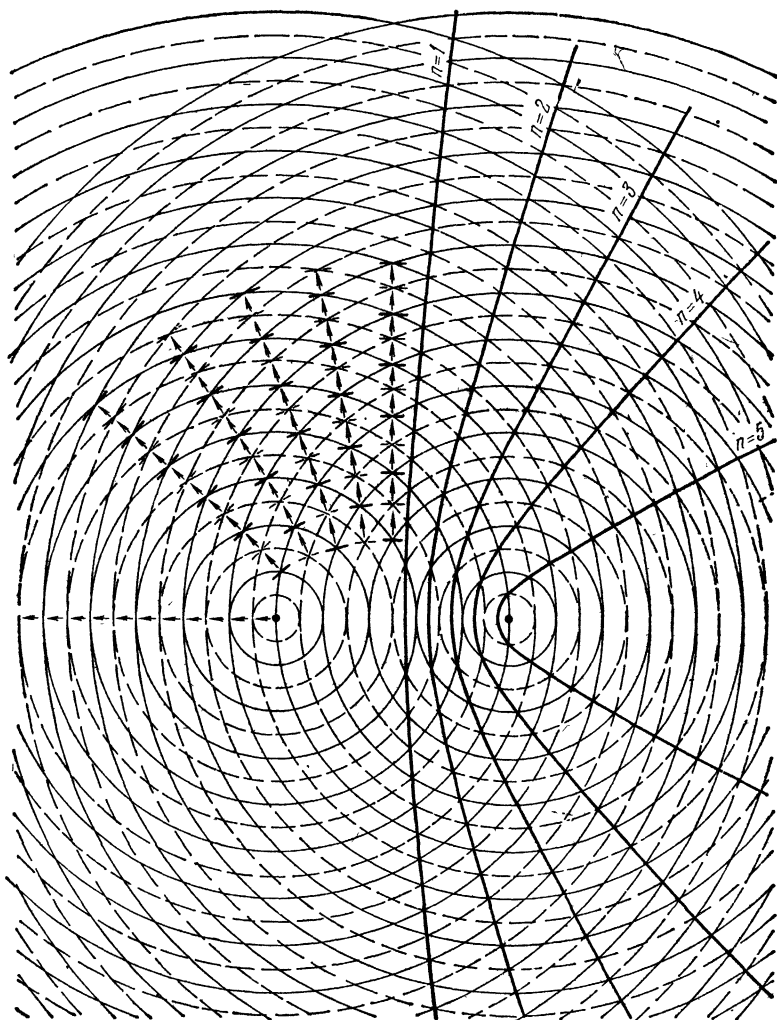


Рис. 147.

б) Для момента b нет необходимости выполнять новый рисунок. Тот же самый чертеж может быть использован снова, если считать, что теперь сплошные линии представляют впадины, а прерывистые — гребни. Имея в виду это изменение обозначений, мы можем видеть, какие изменения происходят между моментами времени a и b на половину периода позднее.

В левой части рисунка короткие сплошные черточки указывают положения удвоенных гребней в момент a , а короткие прерывистые черточки — положения

удвоенных впадин в момент *б*. Соединительные стрелочки показывают, как движутся удвоенные гребни в промежуток времени между *а* и *б*. Интересно отметить, что когда ваш глаз переходит от одной радиальной линии удвоенных гребней к соседней узловой линии, а затем к следующей линии удвоенных гребней, вы видите, что две соседние линии удвоенных гребней находятся в противофазе. Некоторые учащиеся могут предпочесть использование цветных карандашей для обозначения различных частей рисунка.

6. Если рисунок к задаче 5 был выполнен тщательно, его можно использовать и при решении этой задачи. Однако те из учащихся, у кого не получился рис. 147, наверное, предпочтут начать сызнова и сделать его как следует. Для того чтобы получить прямолинейные узловые линии, наибольшие окружности должны иметь радиусы от 9λ до 13λ . Поэтому некоторым учащимся придется нарисовать дополнительные дуги кроме тех, которые были построены для решения задачи 5. Продолжения прямолинейных участков узловых линий обратно к источникам не были показаны на рис. 147 ввиду путаницы, которую это могло бы повлечь при объяснении задачи 5. Желательно, чтобы вы продолжили эти линии цветным карандашом на рисунке к задаче 5 с целью убедиться, насколько близко все они проходят к середине отрезка, соединяющего источники.

Если учащийся шаг за шагом построит этот окончательный рисунок, такое построение поможет ему гораздо яснее воспринять рассуждения разделов 17.2 и 17.3.

8. Это домашнее задание позволяет другим способом получить наглядное представление о формировании интерференционной картины от двух точечных источников. Установление положений узловых линий с помощью этого устройства будет неточным, если вращение каждой полоски происходит не относительно одной из точек ее внутреннего края. Канцелярские кнопки или булавки, используемые в качестве точек, вокруг которых вращаются полоски, удерживали бы «источники» в фиксированных положениях, позволяя легче оперировать нашим устройством.

Чтобы изображать источники, излучающие в фазе, обе полоски должны быть прищиплены в соответственных точках (например обе кнопки должны проходить через линии на бумаге).

Описанное устройство с успехом может быть использовано в качестве хорошей классной демонстрации, если полоски (включая расстояния между линиями) изготовить в достаточно большом для классного наблюдения масштабе.

Для любой точки поверхности, окружающей источники, можно определить, будет ли в ней интерференционное ослабление, усиление или промежуточный случай, если сдвинуть полоски в этой точке. Если соответственные места на полосках (линии, середины промежутков между ними и т. д.) сходятся вместе, происходит усиление, и точка, расположенная таким образом, лежит в области бегущей волны. Там, где линия одной полоски встречает середину промежутка другой, происходит взаимное уничтожение, и так расположенные точки лежат на узловой линии.

Эти полоски можно использовать для нахождения узловых линий. Если линии на полосках пронумерованы, как на рис. 148, мы можем проследить путь узловой линии, отмечая несколько точек, которые лежат на ней. Например, если мы хотим проследить первую узловую линию, сдвинем полоски таким образом, чтобы деление 3,5 на одной из них коснулось деления 4 на другой. Отметим эту точку. Затем поместим деление 4,5 напротив 5; сделаем отметку и т. д. Вторая узловая линия может быть найдена аналогично помещением 3,5 напротив 5; 4,5 напротив 6 и т. д.

9. Это упражнение на применение принципа суперпозиции. Конкретный вопрос, поставленный в задаче (относящийся только к первоначальным узловым линиям), — очень легкий, однако любой дальнейший анализ ситуации с тремя источниками может быть очень сложным, и учащиеся должны получить соответствующее предостережение.

Согласно принципу суперпозиции полное смещение в любой точке равно алгебраической сумме отдельных смещений, и суммирование может быть выполнено в любом порядке. Сумма смещений, вызываемых двумя первоначальными генераторами, равна нулю вдоль узловой линии. Поэтому полное смещение вдоль такой

первоначальной волновой линии есть просто смещение, вызываемое третьим генератором; таким образом, оно больше уже не равно нулю. Первоначальные узловые линии больше не являются узловыми.

12. Это графическое упражнение служит для иллюстрации свойства узловых линий в отношении разности хода.

Сопровождающий решение рис. 149, масштаб которого соответствует $\lambda = 1$ см, сделан с учетом того, чтобы свести число необходимых установок циркуля к минимуму. Большая дуга окружности проводится с центром в S_2 и имеет любой удобный радиус r . Затем игла циркуля помещается в S_1 и им производится ряд засечек на

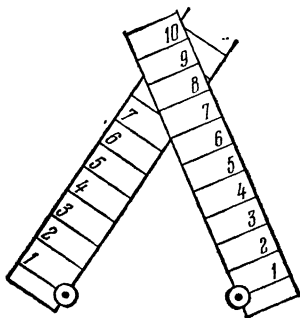


Рис. 148.

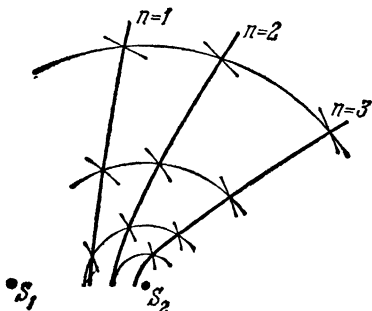


Рис. 149.

первоначальных дугах с радиусами $r + \frac{1}{2}\lambda$, $r + \frac{3}{2}\lambda$, $r + \frac{5}{2}\lambda$. Такое построение продлевается для различных значений r с тем, чтобы перекрыть всю желаемую область плоскости, после чего отмечаются точки пересечения окружностей с линией, соединяющей источники S_1 и S_2 . Соединение между собой соответствующих засечек и дает, наконец, узловые линии.

Преимущество этого метода состоит в том, что он позволяет выбрать столько различных значений r , сколько нужно для удобства построения узловых линий. Теперь нет необходимости рисовать всю последовательность окружностей с расстоянием λ между ними, как это делалось в задачах 5 и 6. Одна из физических интерпретаций метода разностей хода состоит в том, что мы фиксируем свое внимание на конкретном участке волны, исходящей из S_2 (на гребне, впадине или некоторой промежуточной точке), и строим его пересечение с теми участками волны, исходящей из S_1 , которые имеют в точности противоположное смещение. Каждое такое пересечение является точкой узловой линии, и мы изображаем движение этого пересечения по мере распространения обеих волн наружу от их источников. В некотором смысле эта точка зрения является дополнительной к подходу, развитому в задачах 5 и 6, где наблюдение велось за всей поверхностью в один и тот же момент времени и отыскивались линии нулевого смещения. Оба эти метода являются просто разными способами определения разностей хода.

13. Узловые линии остались бы в тех же самых положениях, но становились бы все менее и менее отчетливыми. Полного взаимного уничтожения уже больше не происходило бы, и следовательно, вода вдоль этих линий обнаруживала бы все более интенсивное волновое движение. Когда второй источник окончательно прекратил бы свое действие, то, разумеется, остались бы просто круговые волны, расходящиеся от действующего источника.

15. Это графическое упражнение подтверждает аналитическое определение углового положения узловых линий, данное в разделе 17.4. Тщательное выполнение рисунка будет способствовать его убедительности.

Сопровождающий решение рис. 150 получен уменьшением масштаба из основного чертежа в натуральную величину, используемого для получения численного решения этой задачи. Для засечки точек узловых линий был использован метод разностей хода (см. задачу 12). Область «далекая» от источников, — вот что интересует нас в этой задаче. В таких областях узловые линии являются прямыми, и, будучи продолжены обратно к источникам, проходят через среднюю точку между

источниками. (В задаче 6 этот результат был проверен графически.) Следовательно, все, что нужно, — это найти какую-либо точку на каждой узловой линии как можно дальше от источников и соединить ее с серединой расстояния между ними с помощью прямой линии. С помощью использованного здесь циркуля (самого обычного) можно было делать засечки с наибольшим радиусом около 15 см, т. е. $2,5d$. Было получено также несколько более близких точек на узловых линиях с целью проследить отклонение от прямолинейного поведения. При радиусе 10 см это отклонение очень мало, что говорит о том, что 15 см, по-видимому, представляет достаточно большое удаление от источников (см. замечание в конце решения).

Для $\sin \theta_2$ были получены следующие числовые результаты:

$$AB=6,05 \text{ см}, AC=15,84 \text{ см},$$

$$\sin \theta_2 = 6,05/15,84 = 0,382 \text{ (графически)}.$$

По формуле для разности хода

$$\sin \theta_2 = (2 - 1/2) \lambda/d = 3/2 \cdot \lambda/4\lambda = 0,375 \text{ (теоретически)}.$$

Мы получили относительную «ошибку», равную

$$(0,382 - 0,375)/0,375 = 1,9\%.$$

Результат, имеющий такую точность (которую нетрудно достигнуть с помощью примитивных принадлежностей, если пользоваться ими с аккуратностью), должен быть вполне убеждающим. Эта задача может также помочь рассеять какое бы то ни было смущение в отношении n — номера узловой линии. Каково бы ни было фундаментальное значение n , здесь это неважно; $(n - 1/2)\lambda$ является разностью хода, используемой при построении узловых линий, и та же самая величина встречается при вычислении $\sin \theta_n$.

Замечание. Причина того, что ошибка оказывается довольно большой, состоит не в слабой технике черчения, а в том, что на расстоянии $2,5d$ узловые линии еще находятся на некотором расстоянии от своих асимптот. С помощью аналитической геометрии можно показать, что в этом случае величина, которую мы измеряли на нашем рисунке, должна отличаться от угла асимптоты на 1,7%. Следовательно, почти вся наша «ошибка», за исключением 0,2%, была неизбежной. Это указывает на внутреннюю слабость метода прямого вычитания при определении разности хода. Однако мы не советуем упоминать об этом в классе в связи с данной конкретной задачей; цель задачи может быть достигнута без предостережений относительно погрешности.

16. Это хорошая задача для иллюстрации применения техники этой главы к другому, но привычному явлению.

Хотя учащиеся, наверное, смогут предложить опыты для определения того, принадлежит ли звук к волновым явлениям, они вряд ли отгадают себе отчет в том, что их экспериментальные установки должны будут иметь размеры, соответствующие длине звуковых волн. Если вы не ограничитесь безразмерным экспериментом, вам придется сообщить учащимся, в каком диапазоне лежат звуковые волны.

Скорость звука составляет около 330 м/с; слышимые частоты лежат в диапазоне примерно от 50 до 15 000 колебаний в секунду, и средней ноте «до» соответствует 256 колебаний в секунду. Поэтому длины волн занимают диапазон от 60 м до 2 см, с длинами волн звуков, связанных с музыкальными нотами, около метра. Учащиеся должны понимать, что важно иметь единственную частоту. Они должны

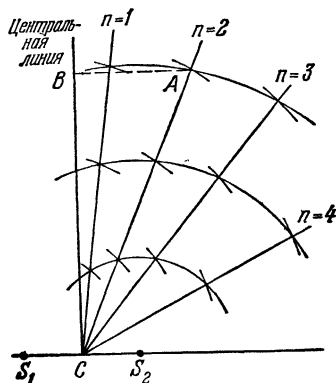


Рис. 150.

быть в состоянии представить опыты, которые позволили бы сделать со звуком то же, что было сделано с водяными волнами в этой главе.

Выполнять это упражнение теоретически, рассматривая лишь мысленные эксперименты. Овлечение в область действительного экспериментирования со звуком на этой стадии вызвало бы большие затраты времени и скорее всего принесло бы разочарование, так как если ваше оборудование не очень совершенно и сами вы не имели опыта в акустике, всякого рода побочные эффекты могут замаскировать те характеристики, которые вы ищете (что решительно подтвердит большинство поклонников высококачественной звукозаписи). Одна простая демонстрация, которую можно иметь про запас, чтобы поразить тех учащихся, которые изобретают сложные установки, состоит в следующем.

Камертон достаточно высокой частоты (чтобы иметь не слишком большую λ), помещенный на расстоянии λ от классной доски (или гладкой кирпичной стены), представляет вполне хорошее интерференционное устройство (рис. 151). Если учащийся перемещает свою голову вдоль указанной линии, он должен слышать вполне

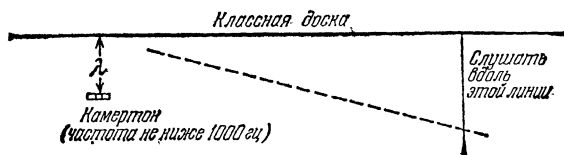


Рис. 151.

различные области звука и области тишины. Положения узлов (зон тишины) позволят по порядку величины оценить значение λ . (Постарайтесь так ударить камертон, чтобы возбудить только основную частоту его колебаний. Присутствие высших гармоник может несколько исказить явление.)

17. Измерение на реальных картинах интерференции представляет хорошее упражнение для учащихся; они убедятся в том, что в действительности узловые линии не являются одномерными (мысль, к которой их могло привести решение предшествующих задач), а представляют собой области конечной ширины, центр которых должен быть найден. Хотя к этому времени учащиеся уже должны быть знакомы с ошибками эксперимента, следует указать им на тот факт, что различные измерения могут давать несколько различные результаты.

а) Любая из четырех узловых линий, показанных на рис. 17.6, или любая из трех, показанных на рис. 17.9, может быть использована для решения задачи. Поскольку положение центральной линии точно установить трудно, искомый угол определяется как половина угла между узловой линией номера n справа и узловой линией того же номера n слева.

Типичный расчет для второй узловой линии на рис. 17.9 $\theta \approx 32^\circ$ имеет вид

$$\lambda/d = \sin 32^\circ / (2 - 1/2) = 0,35.$$

Результаты измерений для рис. 17.6 и 17.9 представлены в табл. 16.

ТАБЛИЦА 16

Рис. 17.6	Номер узловой линии	Угол θ	λ/d	Рис. 17.9	Номер узловой линии	Угол θ	λ/d
Рис. 17.6	1	7°	0,25	Рис. 17.9	1	10°	0,35
	2	21°	0,23		2	32°	0,35
	3	37°	0,24		3 (очень грубо)	55°	0,33
	4	53°	0,23				

Для рис. 17.6 среднее значение $\lambda/d = 0,24$, в случае же рис. 17.9 следует считать $\lambda/d = 0,35$.

б) Для рис. 17.9 измеренное расстояние между источниками равно приблизительно 1,6 см. Это означает, что реальные источники находятся на расстоянии 6,4 см друг от друга. Таким образом, истинные значения длин волн равны: для рис. 17.6 $\lambda = 0,24 \cdot 6,4 = 1,5$ см; для рис. 17.9 $\lambda = 0,35 \cdot 6,4 = 2,2$ см.

18. Может оказаться, что определение гиперболы, которое найдут учащиеся, будет в точности совпадать с найденным нами для узловых линий: это геометрическое место точек, разность расстояний которых до двух фиксированных точек постоянна. Отсюда они узнают, что узловые линии являются гиперболами, что с точки зрения физики не добавляет ничего нового к их пониманию интерференции, однако позволяет им выразаться на языке математики.

Есть и другие определения гиперболы. Если учащиеся еще не знают или не могут без труда доказать, что они эквивалентны определению в терминах разности хода, то не следует тратить на эту задачу много времени, надо просто указать учащимся, где они могут найти соответствующее доказательство (в любом хорошем учебнике аналитической геометрии). Ниже приводятся два определения, которые могут им встретиться, и показана их связь с нашим определением.

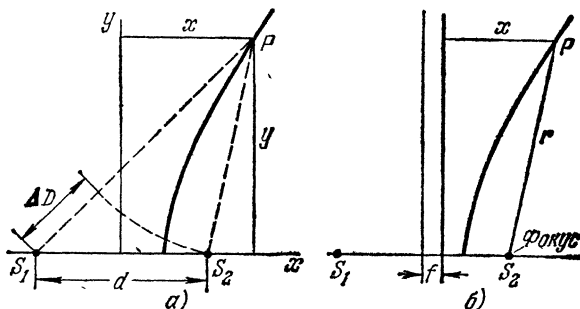


Рис. 152.

Расстояние между источниками обозначим d , а разность хода через ΔD , т. е. $\Delta D = (n - 1/2) \lambda$ (рис. 152, а). Одно из определений гиперболы в прямоугольных координатах имеет вид

$$x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1.$$

Знакомые с аналитической геометрией учащиеся, наверное, смогут показать, что постоянные a и b связаны с d и ΔD следующими соотношениями:

$$a = 1/2 \Delta D, \quad b = 1/2 \sqrt{d^2 - (\Delta D)^2}.$$

Следовательно, чтобы эти линии могли быть узловыми, необходимо выполнение неравенства $d > \Delta D$.

Менее привычное определение выражается через r (расстояние от точки гиперболы до фокуса одного из источников) и x (расстояние по перпендикуляру до фиксированной линии, называемой директрисой — не центральной линией в виде $r = ex$, где e — постоянная величина, большая единицы, которая называется эксцентриситетом (рис. 152, б)). Несколько труднее показать, что эксцентриситет e и расстояние директрисы от центральной линии f связаны с d и ΔD следующим образом:

$$e = d/\Delta D, \quad f = 1/2 \Delta D^2/d.$$

19. Пусть b обозначает основание прямоугольного треугольника с углом $\alpha = 30^\circ$ при вершине. Тогда $b = L \sin \alpha$.

а) Когда $L = 50$ см, $b = L \sin 30^\circ = 50 \text{ см} \cdot 0,5 = 25$ см;

$$\sin \beta = (25 \text{ см} - d/2)/50 \text{ см} = (25 \text{ см} - 5 \text{ см})/50 \text{ см} = 20/50 = 0,40, \\ \beta = 23,6^\circ;$$

$$\sin \gamma = (25 \text{ см} + d/2)/50 \text{ см} = (25 \text{ см} + 5 \text{ см})/50 \text{ см} = 30/50 = 0,60, \\ \gamma = 36,9^\circ.$$

б) Когда $L=500$ см, $b=500$ см $\cdot \sin 30^\circ=250$ см;

$$\sin \beta = (250 \text{ см} - 5 \text{ см}) / 500 \text{ см} = 245 / 500 = 0,490, \beta = 29,3^\circ;$$

$$\sin \gamma = (250 \text{ см} + 5 \text{ см}) / 500 \text{ см} = 255 / 500 = 0,510, \gamma = 30,7^\circ.$$

в) Поскольку $29,3^\circ \approx 30^\circ \approx 30,7^\circ$, учащиеся должны убедиться, что при L , во много раз превышающих d (условие, выполняющееся в опыте Юнга), $\gamma \approx \alpha \approx \beta$.

20. а) Поскольку каждый автомобиль затрачивает 2,5 мин на полный оборот, период T составляет 2,5 мин. Запоздывание на 0,5 мин равно $1/5 T$. Поэтому отставание по фазе p равно $1/5$.

б) Скорость каждого из автомобилей равна длине окружности трека 5 км, деленной на время, необходимое для ее прохождения, 2,5 мин. Поэтому скорость равна 5 км/2,5 мин = 2 км/мин.

в) Если бы трек имел 4 км в окружности, отставание по фазе p не изменилось бы ($p=1/5$), так как отставание по фазе зависит только от времени движения машин, а оно не изменяется. Однако скорость изменяется: скорость равна 4 км/2,5 мин, т. е. 1,6 км/мин.

Фаза не зависит от амплитуды и скорости движения. Этот результат справедлив также и для волновой кюветы. Картина, которую мы наблюдаем, зависит только от p , а не от скорости волн и не от их амплитуды.

23. Подстановка значения $n=1$ в формулу, приведенную в разделе 17.5, дает

$$PS_1 - PS_2 = (p + n - 1/2) \lambda = (p + 1 - 1/2) \lambda = (p + 1/2) \lambda.$$

Истинное предназначение этой задачи состоит, однако, в том, чтобы побудить учащегося проделать вывод этой формулы для одной конкретной узловой линии. Этот вывод можно провести, возвращаясь к рассуждениям раздела 17.3, где было показано, что в случае одинаковых фаз в источниках разность хода для первой узловой линии равна $PS_1 - PS_2 = 1/2 \lambda$. Если теперь S_2 запаздывает по отношению к S_1 и отставание по фазе равно p , то гребни будут исходить из S_1 на время pT (T — период) раньше, чем из S_2 . За это время гребни удалятся от S_1 на расстояние, равное $ut = (\lambda/T) \cdot pT = p\lambda$. Таким образом, как видно из рис. 153, полная разность

хода от любой точки узловой линии до источников увеличивается на ту же самую величину и дается теперь выражением

$$PS_1 - PS_2 = p\lambda + 1/2 \lambda = (p + 1/2) \lambda.$$

24. Некоторые учащиеся могут решить эту задачу, комбинируя формулу из раздела 17.5: $\sin \theta = (p + n - 1/2) \lambda / d$ с формулой, относящейся к рис. 17.13: $\sin \theta = x/L$. Это дает подходящую формулу ($n=1$):

$$x/L = (p + 1/2) \lambda / d,$$

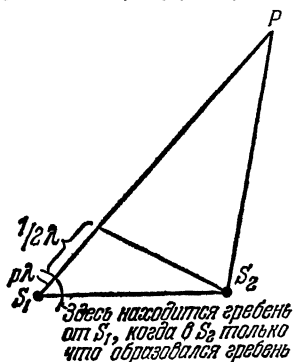


Рис. 153.

после чего остается лишь произвести алгебраические преобразования. Нужно добиться, чтобы учащиеся сделали эту задачу, исходя из более элементарных положений.

Идеальный путь решения этой задачи состоит в том, чтобы учащийся понял, что разность хода равна $d \sin \theta = dx/L$, и использовал условие взаимного уничтожения двух волн.

а) Разность хода равна $(\lambda/0,01) \cdot (0,008 L/L) = 0,8\lambda$. Поскольку два источника, находящиеся в одинаковой фазе, образуют узел при разности хода, равной $0,5\lambda$, лишние $0,3\lambda$ означают в этом случае, что источник, находящийся дальше, опережает первый по фазе на $p=0,3$. Это эквивалентно утверждению, что ближайший источник отстает по фазе на $p=0,7$.

б) Разность хода равна $(\lambda/0,016) \cdot 0,008 = 0,5\lambda$. Следовательно, источники должны быть в фазе, т. е. $p=0$.

Разумеется, бездумная подстановка данных задачи в подходящую формулу также дает $p=0,3$ и $p=0$ соответственно.

Пытаясь вывести формулу, учащийся может получить эквивалентный результат $x/L = (p-1/2)\lambda/d$. Это дало бы $p=1,3$ и $p=1$ соответственно, что соответствует $p=0,3$ и $p=0$, потому что p по определению должно быть числом, лежащим между нулем и единицей.

25. Эта задача похожа на задачи 5 и 6, за исключением того, что она включает фазу. Если вы еще не занимались тщательным графическим изображением этой физической ситуации, вы должны обязательно это сделать. Если у учащихся есть ранее выполненные рисунки, они теперь могут графически найти численный ответ к этой задаче.

а) Если источники находятся в одной фазе, то $p=0$, и для первой узловой линии $\sin \theta_1 = 1/2 \lambda/d$. Поэтому $\sin \theta_1 = 1/2 \cdot 1/6 = 0,1$; $\theta_1 = 5,7^\circ$. (Если учащиеся найдут угол по таблице синусов, они получат значение $5,74^\circ$. Они могут также измерить этот угол непосредственно по своим рисункам к задаче 6 и таким образом получить ответ, отличающийся более чем на один градус от вычисленного значения.)

б) Если разность фаз равна $p=1/2$, то, используя формулу, выведенную в задаче 23, учащиеся получат $\sin \theta_1 = (1/2 + 1/2)1/6 = 0,2$. Это дает $\theta_1 = 11,5^\circ$ (или $11,54^\circ$). Заметьте, что при $p=1/2$ перпендикуляр, восстановленный из середины отрезка, соединяющего источники, является узловой линией. Эта узловая линия, соответствующая $\theta=0$, могла бы быть названа «первой» узловой линией. (Какую узловую линию называть «первой» — совершенно несущественно, о чем не следует забывать.)

в) Самый легкий способ найти число узловых линий состоит в том, чтобы подумать о точках пересечения узловых линий с отрезком прямой, соединяющим источники. Поскольку расстояние между этими узловыми точками равно $1/2 \lambda$, то, вообще говоря, будет наблюдаться 10 узловых линий (рис. 154).

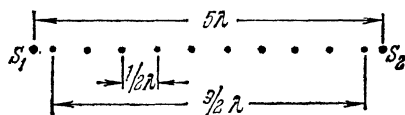


Рис. 154.

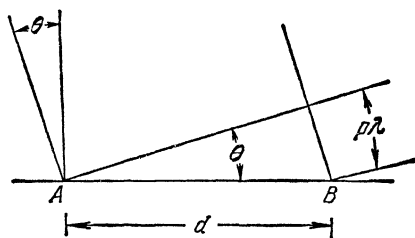


Рис. 155.

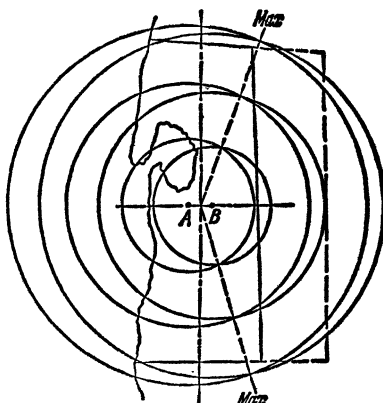


Рис. 156.

Однако когда $p=1/2$, то как S_1 , так и S_2 лежат на узловых линиях и наблюдается 11 узловых линий. В этом очень специальном случае девять средних узловых линий являются обычными. Две последние «линии» лежат вдоль продолжения в обе стороны линии, соединяющей источники. Говорят ли учащиеся о продолжениях в разные стороны как об одной или о двух линиях — совершенно несущественно.

26. Сигнал, приходящий в точку B, должен отставать от волны, пришедшей в A, на часть длины волны, равную разности фаз p . Из приведенного рис. 155 видно, что

$$p\lambda = d \sin \theta, \quad \lambda = c/f = (3 \cdot 10^8)/(2 \cdot 10^7) = 15 \text{ м}, \quad p = 100 \cdot 0,087/15 = 0,58.$$

27. а) По сути дела, проблема сводится к нахождению такого расположения, при котором максимальное усиление сигнала происходит в направлении берега, а минимальное — перпендикулярно к нему (рис. 156). Нам нежелательно иметь какую-нибудь настоящую узловую линию, потому что живущие вдоль такой линии люди вообще были бы не в состоянии принимать какие-либо сигналы. Для любых двух источников, работающих в одной фазе, существует линия максимального усиления вдоль перпендикуляра к середине соединяющего их отрезка. Однако, как мы видели в задаче 14, когда расстояние между источниками d меньше половины длины волны, не существует узловых линий. Поэтому две рассматриваемые антенны должны быть размещены на расстоянии друг от друга, несколько меньшем половины длины волны, в положениях A и B , показанных на рис. 156.

б) Одно из решений состоит в перемещении радиостанции. Однако можно заставить линию максимального усиления повернуть в глубь суши с помощью уменьшения длины передающей линии, питающей антенну A , таким образом, чтобы ее сигнал опережал сигнал антенны B , на некоторую долю длины волны (т. е. несколько расфазировать источники). Новые линии максимального усиления отмечены на рис. 156 значком «Мах».

28. Назначение этой задач — вновь привлечь внимание учащихся к факту, установленному в разделе 17.6, что для получения неподвижной интерференционной картины необходимо, чтобы отставание по фазе между двумя источниками оставалось постоянным. Если отставание по фазе изменяется с постоянной скоростью, узловые линии будут медленно сползать поперек кюветы от стороны, где расположен более высокочастотный источник, в сторону более низкочастотного. В течение каждой секунды узловая линия будет смещаться в положение, где находилась соседняя с ней линия в начале этой секунды. Узловые линии больше не являются гиперболами, а представляют собой довольно странные кривые.

Описанные в лабораторной работе II.12 упражнения шаг за шагом приводят учащихся к понятиям и заключениям, необходимым для решения этой задачи. В этой работе описаны генераторы, позволяющие продемонстрировать «заметающее» веерообразное движение узловых линий.

Вам, видимо, не следует говорить учащимся о том, что для неподвижного наблюдателя прохождение мимо него узловых линий и областей усиления в этой ситуации соответствует явлению биений в музыке, если только сами учащиеся не поднимут этого вопроса.

29. Во всей интерференционной картине образуется излом. Этот излом будет двигаться наружу со скоростью, приблизительно равной скорости волны.

18 СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ

Краткое содержание главы 18

Производя, наблюдая и анализируя интерференционные эффекты на водяных волнах, учащиеся подготовились теперь к восприятию кульминационного пункта развития этой части курса — того факта, что свет обнаруживает аналогичные интерференционные эффекты и поэтому ведет себя подобно волнам. Параллелизм между поведением волн на воде и светом, наблюдаемый в лаборатории, должен обладать большой убедительной силой. В первом разделе этой главы объясняется, почему обычно мы не видим интерференции света. Казалось бы, это удивительно, так как мы часто наблюдаем освещение одной и той же области двумя или большим числом источников и должны были бы увидеть во многих местах узловые линии. Однако хаотические, быстро меняющиеся сдвиги фаз в свете, идущем от различных источников, вызывают смазывание и размытие картин интерференции.

Далее описывается классический опыт Юнга по интерференции, чтобы продемонстрировать простой способ достигнуть постоянства разности фаз между двумя источниками. Через интерференцию света текст Учебника подводит затем к определению длины световой волны из интерференционных опытов и к связи длины волны с цветом. Далее анализируется дифракция как форма интерференции и объясняются цветовые эффекты в интерференции и дифракции.

Поскольку эта глава является завершающей II часть курса, она должна быть тщательно проработана. Особенно ценны лабораторные опыты, в частности II.13, равно как и решение задач, так как это позволяет учащимся превратить то, что они узнали о волнах на воде, в понимание волновой природы света.

План изучения главы 18

В табл. 17 даются возможные варианты распределения времени при изучении данной главы, согласованные с общим планом проработки части II (см. Введение ко II части Руководства).

Т А Б Л И Ц А 17

Глава 18	9-недельный план изучения части II			14-недельный план изучения части II		
	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты	В классе, часы	В лаборатории, часы	Опыты
18.1—18.4	1	1	II.13	2	1	II.13
18.5—18.8	1	1	II.14	2	1	II.14
18.9—18.12	1	0	—	1	2	II.15, II.16

Дополнительные материалы к главе 18

Лаборатория. В процессе изучения главы рекомендуется выполнить опыты II.13 (*Опыт Юнга*), II.14 (*Дифракция света от одной щели*), II.15 (*Равняющая способность*) и II.16 (*Измерение малых расстояний с помощью интерференции*) (см. указания на стр. 378).

Домашние, классные и лабораторные задания. Ответы, решения и таблица классификации задач по их примерному уровню трудности приведены на стр. 347.

18.1. Можно ли наблюдать интерференцию света?

Цель. Указать физические факторы, связанные с происхождением и наблюдением интерференции света.

Содержание. а) Если волновая модель света правильна, мы должны получить со светом интерференционные картины, подобные наблюдаемым в волновой кювете.

б) По аналогии с водяными волнами, в поисках интерференции света мы ожидаем, что наклон узловых линий будет зависеть от отношения λ/d , и нам надо работать с определенной длиной волны.

в) Эксперимент, призванный продемонстрировать картину интерференции от двух источников, не удастся осуществить при использовании двух независимых источников света.

Эта неудача может быть связана с быстрыми изменениями разности фаз между двумя источниками. Прежде чем отбросить волновую модель света, мы должны поставить опыт, используя источники света, про которые известно, что они находятся в фазе.

Методические указания. Основопологающие рассуждения данного раздела должны быть глубоко поняты учащимися. Сколько времени потребуется на это — в сильной степени зависит от того, насколько хорошо была понята предыдущая глава.

Этот раздел лучше всего прорабатывать в виде классной беседы, в ходе которой надо привлечь учащихся к «планированию» экспериментов, обсуждаемых в оставшейся части главы. Эта беседа будет естественно опираться на опыт, приобретенный из экспериментов с волновой кюветой. Некоторые из них придется рассмотреть снова, чтобы понять, каким образом их можно было бы повторить, используя источники света.

Имеет смысл еще раз взглянуть на картины интерференции от двух источников водяных волн на рис. 17.6 и 17.9, используя понятия и методы, применимые к источникам света; например, мы должны мысленно заменить заднюю стенку волновой кюветы (наиболее удаленную от источников) экраном, а оба источника водяных волн — двумя источниками света, которые надо как-то заставить излучать световые волны в фазе. Если это сделано, мы можем лишь наблюдать на экране места, где пересекаются узловые линии, и места, куда приходят удвоенные гребни. Для вычисления длины волны (в действительности отношения λ/d) нам нужно воспользоваться геометрическими закономерностями, представленными на рис. 17.12 и 17.13. Если вы этого еще не сделали, надо во что бы то ни стало найти λ/d для рис. 17.6 и 17.9 этим способом. Используемая здесь простая геометрия должна быть понята до конца, поскольку она снова и снова используется на протяжении главы, иногда с незначительными изменениями. Удостоверьтесь также

в том, что каждый учащийся понимает качественно и количественно, что происходит при изменении отношения λ/d .

Учащиеся должны также снова рассмотреть рис. 17.16 и 17.17, которые показывают лучше, чем это может быть выражено словами, влияние изменения разности фаз между источниками. Удостоверьтесь, что учащиеся заметили, что картины на экране при $p=0$ и при $p=1/2$ взаимно дополняют друг друга; «темные» и «светлые» области в них взаимно меняются местами, так что при наложении этих картин экран оказывается равномерно освещенным, т. е. не наблюдается никакой картины интерференции.

Иными словами, мы замечаем, что при непрерывном изменении отставания по фазе от значения $p=0$ до $p=1$ каждая «темная» полоса непрерывно перемещается по экрану до тех пор, пока при $p=1$ каждая полоса не займет положение, которое первоначально занимала соседняя с ней полоса. Поскольку теперь получается последовательность интерференционных картин, создаваемых с равномерным ростом отставания по фазе от $p=0$ до $p=1$, светлые полосы равномерно заполняют экран; суперпозиция картин интерференции со всевозможными отставаниями по фазе дает в результате равномерно освещенный экран. В этих условиях интерференционная картина не видна.

Из приведенного обсуждения необходимости использовать источники с постоянным отставанием по фазе должна быть очевидна. Если представится возможность, предложите своим учащимся спроектировать источники света, которые наверняка были бы в одной фазе (или имели бы фиксированную разность фаз). Хорошей исходной точкой для обсуждения этой проблемы является задача 2. Отметим, что для целей этого раздела нет необходимости знать, почему два независимых источника света имеют разность фаз, быстро изменяющуюся во времени. Этот интересный вопрос будет вкратце затронут в разделе 18.3.

18.2. Интерференция световых волн. Опыт Юнга

Ц е л ь. Качественно описать интерференционный опыт с двумя щелями.

С о д е р ж а н и е. Чтобы получить два источника света, жестко связанных по фазе, мы используем один источник, и разделяем его свет на два пучка лучей. Один из способов достигнуть этого состоит в том, чтобы расположить линейный источник света параллельно двум узким щелям в непрозрачном экране.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я. Этот раздел представляет решение проблемы, поставленной в предыдущем разделе: как нам создать два источника света, про которые известно, что они излучают в фазе?

Имеет смысл провести лабораторную работу II.13 в этом месте курса, так как к этому времени учащиеся уже должны обладать необходимой основой как для качественного, так и для количественного понимания ее результатов. Последующие разделы (18.3 и 18.4) могут затем быть использованы для того, чтобы повторить и систематизировать изученное в лаборатории.

18.3. Разность фаз источников света. Атомы

Ц е л ь. Кратко объяснить, каким образом разность фаз источников света связана с устойчивостью интерференционных картин.

С о д е р ж а н и е. В источнике света отдельные атомы посылают короткие вспышки света независимо друг от друга. Поэтому отставание по фазе между двумя источниками света очень быстро изменяется во времени. Соответственно смещаются

и картины интерференции. Единственным исключением является семейство источников света, известных под названием «лазеры». С развитием производства лазеров, возможно, в будущем можно будет без всякого труда наблюдать интерференционные явления между двумя источниками света.

Методические указания. До этого раздела мы уже наблюдали интерференцию света. Неудача попыток наблюдать интерференцию от двух независимых источников означает поэтому, что разность фаз между двумя независимыми источниками быстро изменяется во времени.

Для наших нынешних целей мы могли бы ограничиться констатацией этого обстоятельства; однако вопрос о том, почему это должно быть именно так, интересен сам по себе. Предлагаемое объяснение является простым и правдоподобным, так что оно не должно встретить возражений. Вероятно, пока еще бесполезно углубляться в этом направлении. В конце части IV мы вернемся более подробно к испусканию света атомами.

Следующие пояснения могут помочь в ответах на вопросы.

1. Продолжительность световых вспышек от отдельных атомов очень мала, но она весьма велика по сравнению с периодом света (см. задачу 8). Поэтому вполне разумно рассматривать свет — даже от отдельных вспышки — как периодическую волну. Укажем для сравнения, что продолжительность отдельной вспышки света от атома имеет порядок 10^6 периодов; в волновой кювете возбудитель волн с периодом порядка 10^{-1} с должен был бы колебаться в течение примерно 10^5 с (или около суток), чтобы произвести группу волн, длящуюся 10^6 периодов.

2. Тот факт, что, когда один атом в источнике света прекращает излучение, а другой начинает его, разность фаз испытывает хаотические скачки, не вызывает трудностей в опыте Юнга (или аналогичных экспериментах). Фактически, мы должны представлять себе это явление таким образом, что световая волна, создаваемая отдельным атомом, разделяется двумя щелями на два пучка лучей, которые снова складываются на экране, образуя картину интерференции. Поскольку световая вспышка имеет длину порядка 10^6 длин волн, а разности хода составляют всего лишь несколько длин волн, перекрытие двух пучков, идущих от двух щелей, является почти полным. Поскольку картина интерференции, создаваемая каждой вспышкой, будет одной и той же, наложение нескольких вспышек просто увеличит наблюдаемую интенсивность на экране. Это справедливо в том случае, если источник достаточно мал, так что *каждый его атом* находится на одном и том же расстоянии (в пределах небольшой части длины волны) от обеих щелей. Сделанные замечания, конечно, справедливы только, если мы используем для света строгую волновую модель; ближе к концу части IV эти понятия освещаются более полно.

18.4. Цвет и длина волны света

Ц е л ь. Используя волновую модель, связать цвет света с длиной его волны.

С о д е р ж а н и е. а) Двухщелевая интерференционная картина, получаемая при использовании белого света, выявляет поразительные цветовые эффекты. Эти эффекты наводят на мысль, что различные цвета в спектре белого света имеют различные длины волн.

б) Отдельный цвет спектра создает картину интерференции, предсказываемую волновой моделью. Измеряя расстояния между темными полосами, мы можем вычислить длину волны.

Методические указания. Если вы провели беседу в классе, описанную в разделе 18.1, и лабораторную работу II.13, то этот раздел текста Учебника будет служить в основном для обзора результатов эксперимента и для качественного и количественного обсуждения их важности. Очевидно, это должно быть сделано вполне основательно. Желательно сосредоточить обсуждение на более важных и относящихся к делу особенностях этих результатов.

1. Изменения картин интерференции для различных цветов спектра соответствуют предсказаниям волновой модели.

2. На интерференционной картине можно измерить расстояние между темными полосами и с помощью этого расстояния вычислить длину волны.

3. Различные цвета спектра дают различные расстояния между полосами; каждый цвет соответствует своей длине волны.

Количественные соотношения описываются формулами, содержащими разность хода: $\text{разность хода} = d \sin \theta$ и $\sin \theta = x/L$. Заметим, что при малых θ величина L очень мало отличается от расстояния между двухщелевым источником и экраном, на котором наблюдается картина, так что мы можем считать L постоянной для любых мест интерференционной картины. Однако надо проверить, что учащиеся понимают значение основной идеи о разности хода по двум путям, проходящим от источника к экрану через разные щели. Было бы большим упущением ограничиться простой подстановкой чисел в приведенные формулы. В задаче 5 от учащихся требуется рассмотреть несколько иную ситуацию, и поэтому им приходится рассуждать, исходя непосредственно из простых, фундаментальных понятий.

На фотографиях, приведенных на рис. 18.5, I, II (см. цветную вклейку), на картинах интерференции, наблюдаемых в лаборатории, присутствуют побочные эффекты, не очень связанные с основными положениями теории. Лучше всего — лишь слегка коснуться этих усложнений, а их обсуждение опустить или отложить на будущее. Некоторые из таких вторичных эффектов состоят в следующем.

1. Распределение интенсивности света между светлыми полосами интерференционной картины зависит от особенностей дифракции света на каждой щели. Этот вопрос затрагивается вкратце в разделе 18.7 Учебника.

2. Цветовые эффекты в картине, полученной в белом свете, происходят от наложения картин, образованных различными цветами (т. е. длинами волн), составляющими белый свет. Этот вопрос обсуждается в разделе 18.11 Учебника. В конце этого раздела кратко упоминается о картине интерференции, образованной большим числом щелей, а не двумя. Вероятно, желательно опустить подробное обсуждение этого явления, если вы не можете показать картину интерференции, образуемую устройством из нескольких щелей (с дезориентирующим названием «дифракционная» решетка), либо в виде демонстрации, либо во время работы в лаборатории. Причина сужения светлых линий, создаваемых дифракционной решеткой, может быть легче понята, если вернуться к дифракции от одной щели (см. раздел 18.6).

18.5. Дифракция. Интерференция от одной щели

Содержание. а) Свет, проходящий через одиночную щель, создает картину интерференции, довольно похожую на картину от двух щелей.

б) В волновой кювете образуется одна и та же картина волн в следующих двух опытах: 1) при дифракции прямолинейной волны на щели; 2) при действии шеренги

точечных источников, излучающих в одной фазе, плотно и равномерно распределенных вдоль прямой, длина которой совпадает с шириной щели, используемой в п. 1).

Методические указания. Было бы очень полезно воспроизвести в волновой кювете те картины, которые приведены на рис. 18.7. Подходящая демонстрация описаны на стр. 376 в связи с опытом II.14. Чтобы демонстрация была наглядной, надо пользоваться как можно более короткими волнами, чтобы отношение ширины щели к длине волны было как можно больше; это отношение должно составлять по крайней мере 3 : 1, но желательно даже больше.

Вместо шеренги тесно расположенных точечных источников можно взять генератор со стержнем подходящей длины, указав, что это соответствует предельному случаю очень плотного расположения точечных источников. Конечно, существенно так закрепить стержень, чтобы оба его конца погружались на одинаковую глубину, в противном случае узловые линии не получатся ярко выраженными.

Если картины будут достаточно четкими, можно попробовать установить соотношение $\sin \theta = \lambda/w$ для первой узловой линии (вторая узловая линия скорее всего вряд ли будет видна).

Лабораторная работа II.14 должна быть проведена (по крайней мере ее первая часть) как введение к этому разделу. Если у вас есть источники с резкими спектральными линиями, воспользуйтесь ими.

Материал этого раздела следует в первую очередь подавать в виде лабораторных наблюдений дифракции света и путем демонстраций с волновой кюветой. Если у вас нет возможности провести демонстрацию, нужно тщательно обсудить фотографии, приведенные на рис. 18.7. Наблюдения в волновой кювете дадут возможность: 1) эмпирически установить математическое соотношение, выведенное в следующем разделе с помощью принципа суперпозиции; 2) показать справедливость принципа Гюйгенса, в котором фронт волны заменяется большим числом источников.

Если вы еще не пользовались принципом Гюйгенса при рассмотрении отражения и преломления, то выход за рамки его ограниченного применения к рассматриваемому случаю почти ничего вам не даст. Во всяком случае вам следует подчеркнуть, что его применение в данном случае непосредственно основано на эксперименте.

Отметим, что если вам удастся установить соотношение между λ/w и $\sin \theta$ из опытов с волновой кюветой, вы можете использовать дифракцию света для обоснования волновой модели независимо от теоретических предсказаний, вывод которых дан в следующем разделе. Поскольку некоторым учащимся выводы следующего раздела могут показаться трудными, этот альтернативный подход может им очень помочь.

18.6. Теория дифракции от щели

Содержание. Положение узлов и (приблизленно) положение максимумов в дифракционной картине от одной щели можно определить путем «замены» щели на шеренгу источников, излучающих в фазе с последующим применением принципа суперпозиции.

Методические указания. Вы должны совершенно четко выделить два пункта, на которых основан весь вывод.

1. Направления, в которых происходит полное взаимное уничтожение, можно предсказать, если разбить источники на пары. Эти пары должны быть выбраны таким образом, чтобы разность хода между членами каждой пары равнялась $\frac{1}{2}\lambda$, $\frac{3}{2}\lambda$ и т. д.

2. Гребни от всех источников могут совпадать только в направлении, перпендикулярном щели. Причина этого заключается в том, что при замене щели цепочкой источников в фазе, эти источники должны отстоять друг от друга на расстояние, не превышающее длину волны. В этом случае разность хода между волнами от соседних источников никогда не может превышать малой части от длины волны, даже по направлению, составляющему 90° с нормалью к щели (рис. 157).

Если бы расстояние между источниками в цепочке было больше, чем λ , то при некотором значении угла θ разность хода $d \sin \theta$ была бы равна λ , и по этому направлению была бы видна светлая полоска. Именно это и происходит в дифракционной решетке с $d > \lambda$, где при нескольких значениях угла θ наблюдается несколько порядков интерференции (см. замечание в конце раздела 18.4 Учебника).

Отметим, что геометрия, используемая в этом разделе для определения разностей хода, в точности совпадает с геометрией, использованной для нахождения разностей хода в случае двух источников (см. раздел 17.4).

Если вы почувствуете, что ваш класс уловил суть рассуждений этого раздела, желательно применить аналогичные рассуждения к другим примерам. Важный пример представляет дифракционная решетка. Здесь мы действительно имеем дело с рядом равноудаленных источников в фазе: каждый из источников представляет щель, и все щели освещаются единым линейным источником. В дифракционной решетке, однако, расстояние d между соседними источниками (щелями) превышает длину волны λ . Следовательно, полное усиление происходит не только в направлении прямого падения. Оно наблюдается также для таких углов, для которых разность хода между соседними щелями равна целому числу длин волн, т. е. для углов, определяемых уравнением

$$d \sin \theta = m \lambda,$$

где $m=0, 1, 2, 3, \dots$. Однако результаты этого раздела говорят нам, что в случае N щелей при условии $(Nd) \sin \theta = (\text{целое число}) \cdot \lambda$ должен наблюдаться минимум (полное взаимное уничтожение), если только $d \sin \theta$ также не равно целому числу длин волн. Это означает, например, что при $d \sin \theta = \lambda$ наблюдается сильный максимум, т. е. при $Nd \sin \theta = (N+1)\lambda$ или $Nd \sin \theta = (N-1)\lambda$. Если N очень велико, это означает, что светлая полоска при $d \sin \theta = \lambda$ является очень узкой. Как и при дифракции от щели, примерно посередине между последовательными минимумами располагаются побочные максимумы, где происходит частичное усиление. Эти побочные максимумы намного слабее и обычно не наблюдаются. Не пытайтесь вдаваться в детали.

Метод спаривания щелей для доказательства взаимного уничтожения при $(Nd) \sin \theta = (\text{целое число}) \cdot \lambda$ годится только, если N равно степени числа 2. Взаимное уничтожение для этих θ происходит и при других значениях N , но доказать это труднее.

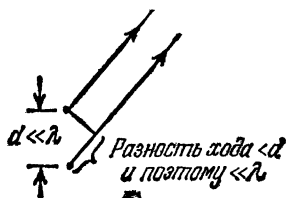


Рис. 157.

Очевидно, метод разбиения на пары применим точно таким же образом к картине излучения антенны, состоящей из каркаса с укрепленными на нем равноотстоящими источниками радиоволн, работающими в одной фазе. Если расстояние между ними меньше длины волны, картина излучения такой антенны будет напоминать дифракционную картину от щели.

18.7. Экспериментальная проверка теории для одной и двух щелей

Содержание. Наблюдаемые дифракционные картины, создаваемые щелями, находятся в количественном согласии с предсказаниями волновой теории света. Интерференционная картина от двух щелей попадает в область перекрытия центральных максимумов дифракционной картины от каждой из щелей в отдельности.

Методические указания. Роль дифракции в образовании интерференционной картины от двух щелей можно довольно отчетливо видеть из рис. 18.13.

18.8. Разрешающая способность

Цель. Показать влияние дифракции на разрешающую способность.

Содержание. Разрешающая способность оптического прибора — это мера его способности давать отдельные изображения объектов, находящихся близко друг к другу. Способность оптических приборов разрешать мелкие детали ограничена волновой природой света.

Методические указания. В разделах 18.8—18.11 описываются световые явления, интересные сами по себе и в то же время позволяющие более широко продемонстрировать применение волновых представлений о свете. Эта последняя особенность не должна ускользнуть из поля зрения учащихся.

В связи с этим разделом можно провести лабораторную работу II.15.

По-видимому, следует ограничить обсуждение этого вопроса качественными соображениями, высказанными в тексте Учебника. Грубая оценка разрешающей способности линз при наблюдении с их помощью удаленных объектов может быть получена, если несколько выйти за рамки беседы по задаче 21. В оптической системе, используемой для наблюдения близко лежащих объектов (микроскоп), ситуация несколько отлична, хотя результат вполне аналогичен первому (см. задачу 20).

Диаметр глазного зрачка имеет порядок $2 \text{ мм} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Принимая $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$, мы находим

$$\theta \approx \sin \theta = \lambda/w = (5 \cdot 10^{-7} \text{ м}) / (2 \cdot 10^{-3} \text{ м}) = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ рад.}$$

Угловое разрешение в $2,5 \cdot 10^{-4}$ радиан означает, что хороший глаз должен быть в состоянии различить две линии, находящиеся на расстоянии $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, или 0,25 мм, с расстояния в 1 м. Это не очень далеко от истинной разрешающей способности человеческого глаза.

Некоторые из ваших учащихся-фотолюбителей быстро заметят, что для получения фотографий с помощью малого отверстия это отверстие должно быть слишком малым (камера-обскура). Для удаленных объектов (по сравнению с расстоянием от отверстия до пленки) оптимальный диаметр отверстия равен примерно $A_0 \approx 2\sqrt{\lambda q}$, где для λ надо взять некоторое среднее значение (скажем, $4 \cdot 10^{-5} \text{ см}$) от тех длин волн, к которым чувствительна пленка, а q обозначает расстояние между отверстием и изображением, выраженное в см.

Более строгий результат, справедливый также и для объектов, лежащих относительно близко к отверстию, имеет вид

$$A_0 = 2\sqrt{0,9\lambda pq/(p+q)}.$$

18.9. Интерференция в тонких пленках и слоях

Содержание. а) Два пучка световых лучей, отражающихся от двух поверхностей тонкой пленки, могут интерферировать.

б) Получается ли в результате интерференции взаимное усиление, уничтожение или промежуточный случай — зависит от толщины пленки.

в) Если толщина пленки сравнима с длиной волны, происходит полное взаимное уничтожение; это означает, что одна из двух отраженных волн опрокидывается при отражении. Аналогия с отражением волн от места соединения двух пружин (в которых волны распространяются с разными скоростями) приводит к выводу, что инверсия происходит на поверхности, где волна переходит из среды с более высокой скоростью распространения в среду с более низкой скоростью.

г) Для пленок конечной толщины можно предсказать, получится ли в результате интерференции усиление или ослабление, если учесть разность хода между двумя отраженными волнами.

Методические указания. В связи с этим разделом можно провести лабораторную работу II.16.

При объяснении интерференции в тонких пленках мы должны принять во внимание два эффекта.

1. Луч, отраженный от задней поверхности пленки, проходит путь, на удвоенную толщину пленки превышающий расстояние, проходимое лучом, отраженным от ее передней поверхности (для нормального падения).

2. Один из отраженных лучей поворачивается верхней стороной вниз, а другой нет.

Если вы хотите упростить дело, вы можете рассмотреть оба эти эффекта по отдельности, сначала с помощью лабораторного опыта. В этом лабораторном опыте мы можем интересоваться только влиянием разности хода; мы просто наблюдаем переход сильного отражения в отсутствие отражения при изменении толщины тонкого воздушного клина. Мы можем понять происходящее, заметив, что если при данной разности хода происходит полное усиление, то при увеличении разности хода на λ , т. е. когда толщина пленки увеличится на $\frac{1}{2}\lambda$, мы снова должны иметь усиление. С другой стороны, если две волны усиливаются при данной разности хода (гребни встречаются гребни, впадины встречаются с впадинами), то при увеличении толщины на $\frac{1}{4}\lambda$ мы получим полное взаимное уничтожение. Это изменяет разность хода на $\frac{1}{2}\lambda$, так что две волны смещаются друг относительно друга на $\frac{1}{2}\lambda$, и теперь гребни встречаются с впадинами, а впадины — с гребнями.

Именно при обсуждении того, что распространяющаяся в воздухе волна может опрокинуться при отражении от стекла, ваша работа с отраженными импульсами на спиральной пружине оплатит вам сторицей. Логика здесь такова: точно так же, как импульсы на спиральной пружине отражаются, опрокидываясь при переходе из среды с высокой скоростью распространения в среду с низкой скоростью, так и световые волны отражаются с обращением, переходя из среды быстрого распространения в среду медленного распространения.

Тот факт, что если одно из отражений является прямым, то другое происходит в обращении, является общим свойством всех волн. Это известно как экспериментальный факт и в разбираемом случае, поскольку при пренебрежимо малой разности хода происходит полное взаимное уничтожение двух волн. Это говорит нам о том, что *одна* из двух волн испытывает мгновенное обращение, но не о том, с *какой* из них это происходит (см. задачу 28). Мы могли бы, по-видимому, догадаться, переходя к пределу нулевой толщины, что от очень тонкой пленки не должно происходить никакого отражения; пленка нулевой толщины означает отсутствие пленки, и поэтому отсутствие отражения.

Учащиеся могут задать вопрос, каким образом два параллельных луча *1* и *2* на рис. 18.16 интерферируют между собой, если они не перекрываются. Простейший ответ состоит в том, что в действительности нас интересует лишь случай нормального падения, а в этом случае *1* и *2* совпадают в пространстве. Конечно, этот

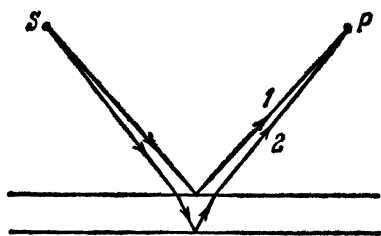


Рис. 158.

ответ не является вполне удовлетворительным, поскольку мы получаем интерференцию и при углах, отличных от 90° . Для полного ответа потребуются чертеж, подобный рис. 158, на котором должны быть изображены источник света и точка наблюдения интерференции (например экран). Положение несколько усложняется по сравнению со случаем нормального падения (теперь имеется небольшая разность хода как внутри, так и снаружи пленки).

По этой причине более разумнее всего, вероятно, сделать упор только на случае нормального падения. Рисунки в тексте Учебника выполнены таким образом, чтобы на них легко было видеть различные лучи.

Кто-нибудь может спросить, каким образом первый и второй отраженные лучи гасят друг друга, если второй из них, очевидно, имеет меньшую амплитуду. Ответ гласит, что и первый, и второй отраженные лучи настолько близки по амплитуде, что их взаимное уничтожение является почти полным.

18.10. Интерференция света, проходящего сквозь тонкую пленку

Содержание. а) Интерференционные эффекты наблюдаются в тонких пленках в проходящем свете так же, как и в отраженном.

б) Достаточно принять во внимание два проходящих луча: более яркий луч, проходящий непосредственно, и значительно более слабый луч, проходящий после двух отражений в пленке. Разность хода между этими лучами при нормальном падении равна удвоенной толщине пленки.

в) Когда разность хода равна 0 , λ , 2λ и т. д., эти два луча усиливают друг друга. Когда разность хода равна $\frac{1}{2}\lambda$, $\frac{3}{2}\lambda$, $\frac{5}{2}\lambda$ и т. д., происходит максимальное взаимное ослабление этих лучей. Как и следовало ожидать, максимумы пропускания совпадают с минимумами отражения, и наоборот.

Методические указания. Материал этого раздела должен потребовать очень краткой беседы.

18.11. Цвета тонких пленок интерференционного происхождения

Содержание. Положение темных и светлых зон в интерференционной картине различно для различных длин волн. При использовании белого света,

представляющего смесь различных длин волн, получается перекрытие интерференционных картин, приводящее к наблюдаемым цветовым эффектам.

Методические указания. Этот раздел должен потребовать не-большой беседы. Основная мысль, которая должна ее пронизывать,— цветовые эффекты дают еще одно подтверждение того, что физическое различие между светом различных цветов состоит в различии длины волны.

18.12. Заключение

Ц е л ь. Кратко суммировать материал части II курса и упомянуть о некоторых интересных вопросах, связанных со светом, которых мы не касались в нашем изложении. Некоторые из этих вопросов будут рассмотрены позднее на протяжении курса, другие не будут рассмотрены вовсе.

Вопросы эти следующие.

1. Какова природа среды, в которой распространяется свет?
2. Как изменяется амплитуда световых «волн» при изменении интенсивности света?
3. Какова природа и значение стоячих световых волн?
4. Каким образом в одной теории могут сосуществовать волновые и корпускулярные представления о свете?

Методические указания. Независимо от того, как вы относитесь к «повторениям» в классе,— «за» или «против»,— стоит потратить немного времени на обсуждение в свете идей части II понятия модели и того, каким образом устанавливается применимость той или иной модели.

Вывод формулы линзы с помощью волновой теории приведен в Приложении 8 на стр. 397.

ДОМАШНИЕ КЛАСНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Ответы к задачам

В табл. 18 задачи классифицируются по их примерному уровню трудности и в соответствии с разделами, к которым они относятся. Указаны те из них, которые особенно подходят для обсуждения в классе. Особо рекомендуемые задачи отмечены значком #.

ТАБЛИЦА 18

Разделы	Со звездочкой	Легкие	Средние	Трудные	Классные
18.1	1		2#		2#
18.2, 18.3	7	3, 4#	5#, 6#		5#, 6#
18.4	9	8#			8#
18.5	10		11, 12		12
18.6	13	14	15#	16	15#
18.7			17, 18#		18#
18.8	19	20#, 22	21#	21#	21#
18.9—18.11	23—26	27#	28, 29, 30#		28
18.12			31		31

Краткие ответы

1*. Попробовать найти места, где лодка не вздымается и не проваливается на волнах. Вдоль узловых линий вода неподвижна; по любую сторону от них лодка будет качаться.

7*. 0,9 м.

9*. $\Delta x = 0,68$ мм.

10*. Узлы для красного света находятся в 1,4 раза дальше друг от друга, чем узлы для синего.

13*. Все источники действуют в фазе при образовании центрального максимума. На рис. 18.11 две трети источников гасят друг друга, а в оставшейся одной трети отставание по фазе между источниками не превышает $1/2$.

19*. Увеличение то же самое (при проверке расстояния между центрами изображений).

23*. Увеличится.

24*. $\lambda = 4200$ Å.

25*. Нет; длина волны в каждом веществе зависит от показателя преломления вещества.

26*. Полосы будут тоньше и вдвое ближе друг к другу.

Ответы с указаниями и решениями

2. Этот вопрос обсуждается в разделах 18.1 и 18.3 текста Учебника и там же дается ответ на него. Кратко: положение темных и светлых полос зависит не только от разности хода, но и от разности фаз между источниками. Если разность фаз изменится во времени, то картина интерференции смещается. Быстро смещающаяся картина приводит в результате к равномерной освещенности экрана. Нет никаких оснований полагать, что разность фаз между двумя лампочками накаливания должна оставаться постоянной.

3. Для решения можно воспользоваться формулой для расстояния между темными полосами $\Delta x = L\lambda/d$. Из данных задачи $\Delta x = 0,32$ см, $d = 0,02$ см, $L = 130$ см получаем

$$\lambda = \Delta x d / L = 0,32 \text{ см} \cdot 0,02 \text{ см} / 130 \text{ см} = (3,2 \cdot 10^{-1}) \cdot (2 \cdot 10^{-2}) / (1,3 \cdot 10^2) \text{ см} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}.$$

Учащиеся мало чему научатся, если будут механически подставлять в формулу данные задачи. Выделите основные шаги в рассуждениях:

1. Если щели находятся на равных расстояниях от первичного источника, то каждая из них действует как источник в одинаковой фазе с другим.

2. Узел (темная полоса) получается в том месте экрана, разность хода до которого от источников равна $1/2\lambda$, $3/2\lambda$, $5/2\lambda$, ...

3. Из геометрических соображений, иллюстрируемых рис. 17.12 и 17.13 (удостоверьтесь, что ваш класс понимает эти геометрические соотношения), мы имеем

$$(\text{разность хода}) = d \sin \theta \quad \text{и} \quad \sin \theta = x/L.$$

4. Если n очень мало, то с достаточной точностью можно взять в качестве L расстояние от плоскости щелей до плоскости экрана.

5. Полагая разность хода равной $1/2\lambda$, $3/2\lambda$, $5/2\lambda$, ..., мы получаем положения последовательных узлов:

$$\begin{aligned} x_1/L &= \sin \theta_1 = d \sin \theta_1 / d = 1/2\lambda/d, \\ x_2/L &= \sin \theta_2 = d \sin \theta_2 / d = 3/2\lambda/d, \\ x_1 &= 1/2 L\lambda/d, \quad x_2 = 3/2 L\lambda/d, \quad x_3 = 5/2 L\lambda/d, \dots \end{aligned}$$

Расстояние между последовательными темными полосами равно при этом

$$\Delta x = x_2 - x_1 = x_3 - x_2 = \dots = L\lambda/d.$$

4. $\Delta x_{\text{кр}} = L\lambda_{\text{кр}}/d$. Мы имеем $d = 0,01$ см, $\lambda_{\text{кр}} = 6,5 \cdot 10^{-7}$ м = $6,5 \cdot 10^{-5}$ см, $\Delta x_{\text{кр}} = 1$ см, откуда

$$L = \frac{\Delta x_{\text{кр}}}{\lambda_{\text{кр}}} d = \frac{1 \text{ см}}{6,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}} \cdot 10^{-2} \text{ см} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ см} = 1,5 \text{ м}.$$

Если мы используем различные цвета, то расстояние между полосами изменяется прямо пропорционально длине волны (поскольку разность хода,

выраженная в длинах волн, должна оставаться той же самой):

$$\frac{\Delta x_{\phi}}{\Delta x_{\text{кр}}} = \frac{\lambda_{\phi}}{\lambda_{\text{кр}}}, \quad \Delta x_{\phi} = \frac{\lambda_{\phi}}{\lambda_{\text{кр}}} \cdot \Delta x_{\text{кр}} = \frac{4,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{6,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}} \cdot 1 \text{ см} = 0,7 \text{ см}.$$

5. Центральный максимум интерференционной картины образуется в том месте, где длины путей от обеих щелей до экрана равны между собой, — в предположении одинаковых расстояний от щелей до источника. Максимумы образуются также в тех случаях, когда длины путей от щелей до экрана отличаются на целое число длин волн.

Рассмотрим рис. 159. Свет, идущий от щели B к максимуму, находящемуся в точке C , должен пройти на целое число длин волн больший путь, чем свет, идущий в тот же максимум от щели A . Однако BC длиннее AC на отрезок BD . Следовательно, $BD = n\lambda$, где $n=0, 1, 2, 3, \dots$

Можно показать, что если точка C находится очень далеко (AC велико по сравнению с AB), то $BD = AB \sin \theta$. Но $AB = d$ — расстояние между щелями. Окончательно имеем $d \sin \theta = n\lambda$ и $\sin \theta = n\lambda/d$, где $n=0, 1, 2, 3, \dots$

6. а) Темная полоса в точке C (рис. 160) на поверхности пластинки означает, что между «двумя» источниками имеется отставание по фазе, равное $1/2$. Поскольку «оба» источника находятся на одинаковом расстоянии от C , это изменение фазы должно быть вызвано «обращением» волны при отражении от поверхности стекла.

б) Следующая темная полоса в точке P означает разность фаз в один период благодаря разности хода от источников в одну длину волны λ . Как видно из

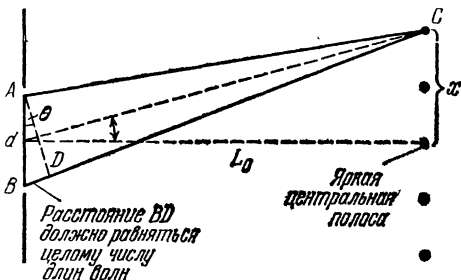


Рис. 159.

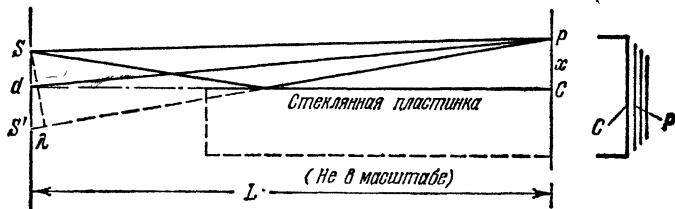


Рис. 160.

рис. 160, $x/L \approx \lambda/d$, где d — расстояние между «двумя» источниками, L — расстояние от источников до дальнего края пластинки и x — расстояние между точкой P и центральной полосой.

Высота щели над верхней поверхностью стеклянной пластинки равна

$$\frac{d}{2} = \frac{\lambda L}{2x} = \frac{(5,4 \cdot 10^{-5} \text{ см}) \cdot 60 \text{ см}}{2 \cdot 0,09 \text{ см}} = 0,018 \text{ см}.$$

Этот эксперимент был одним из первых опытов со светом, показавших, что на границе «воздух — стекло» происходит скачкообразное изменение фазы.

8. Чтобы связать период T с длиной волны λ , заметим, что волна проходит расстояние в одну длину волны за один период. Полагая скорость световой волны равной c , имеем

$$c = \lambda/T, \quad T = \lambda/c$$

и следующие значения для входящих сюда величин:

$$\lambda_{\text{жк}} = 5,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}, \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}, \quad T \approx 1,9 \cdot 10^{-15} \text{ с}.$$

Излучение света отдельным атомом происходит в течение времени t , имеющего порядок 10^{-9} с. За это время число периодов равно по порядку величины

$$\frac{t}{T} \approx \frac{10^{-9} \text{ с}}{10^{-15} \text{ с/период}} = 10^6 \text{ периодов.}$$

Одиночный атом испускает поэтому цепочку волн длиной приблизительно 10^6 длин волн. Это подсказывает метод оценки продолжительности такой вспышки. Мы могли бы осуществить интерференционный опыт, постепенно увеличивая разность хода между интерферирующими лучами. Покуда разность хода меньше длины волновой цепочки, волновые цепочки в расщепленных лучах будут перекрываться. Когда же разность хода превысит длину цепочки волн, перекрытие больше не будет иметь места, и картина интерференции исчезает.

11. Направивается следующий метод: поместим источник (щель или лампу с узкой нитью накаливания) перед измеряемой щелью и измерим расстояние x

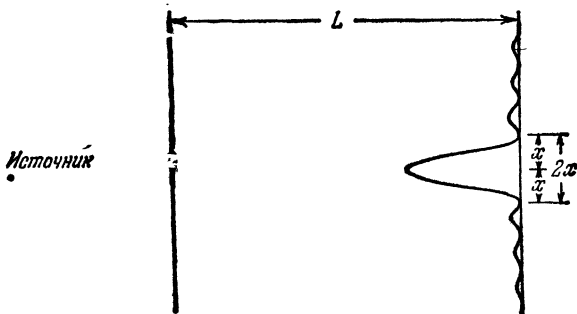


Рис. 161.

между центральным максимумом и первой темной областью дифракционной картины, возникающей на экране (рис. 161). Теперь мы знаем x и можем измерить L . Чтобы найти ширину щели w , используем соотношения: $x/L \approx \sin \theta = \lambda/w$. Получим $w = \lambda L/x$.

12. Дополнительное расстояние DA (рис. 162), которое проходит свет до того, как он достигнет верхнего края щели, компенсируется лишним расстоянием BC ,

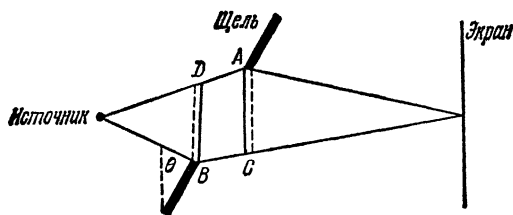


Рис. 162.

которое он проходит от нижней части щели до экрана наблюдения. Поэтому центральный максимум не смещается. Однако щель становится как бы уже. Если она имеет ширину w , то ее эффективная ширина равна $w \cos \theta$. Поскольку щель становится уже, дифракционная картина становится шире.

Данное выше решение верно в первом приближении, и это все, чем следует ограничиться учащимся. Полное решение проблемы очень сложно.

14. Узлы дифракционной картины получаются при таких углах, при которых разность хода $w \sin \theta_n$ от обоих краев щели до экрана равна целому числу длин волн:

$$w \sin \theta_n = n\lambda, \quad \sin \theta_n = n\lambda/w.$$

Поскольку $\lambda = 5,8 \cdot 10^{-7}$ м и $w = 10^{-2}$ м, 10^{-2} м, 10^{-4} м соответственно, мы получаем для первого узла при 1-миллиметровой щели

$$\sin \theta = \lambda/w = (5,8 \cdot 10^{-7} \text{ м})/10^{-2} \text{ м} = 5,8 \cdot 10^{-4}.$$

Поскольку наши таблицы тригонометрических функций не содержат столь малых значений, для нахождения угла достаточно вспомнить, что при малых углах значение угла в радианах равно его синусу. Следовательно, угол в радианах равен $5,8 \cdot 10^{-4}$. Углы в радианах и в градусах пропорциональны:

$$\theta/(5,8 \cdot 10^{-4}) = 180^\circ/\pi, \text{ или } \theta = 0,033^\circ.$$

Результаты можно представить в виде табл. 19.

ТАБЛИЦА 19

n/w	а) 1 мм	б) 10 мм	в) 0,1 мм
1	$\theta = 0,033^\circ$	$0,0033^\circ$	$0,33^\circ$
2	$\theta = 0,066^\circ$	$0,0066^\circ$	$0,66^\circ$
3	$\theta = 0,100^\circ$	$0,0100^\circ$	$1,00^\circ$

15. а) Если прикрыть правую половину источников, общая яркость интерференционной картины уменьшится наполовину, центральная линия картины сместится на $1/4$ w влево и картина будет примерно вдвое шире, чем прежде.

б) Центральная линия останется в прежнем положении, а интенсивность и ширина картины изменятся так же, как в ответе п. а).

16. Условие, необходимое для полного усиления любого числа волн, идущих от группы источников, излучающих в одной фазе, очевидно, сводится к тому, чтобы разность хода от любых двух источников равнялась целому числу длин волн. Если источники расположены на равных расстояниях друг от друга, это условие удовлетворяется, когда разность хода от соседних источников составляет целое число длин волн (рис. 163).

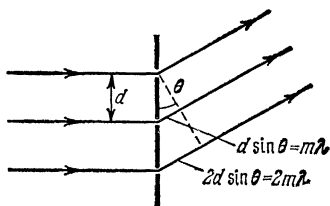


Рис. 163.

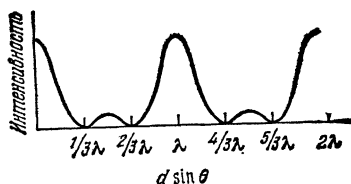


Рис. 164.

Кроме того, по-видимому, должны существовать побочные максимумы, где происходит частичное усиление. В действительности, интенсивность картины от трех щелей выглядит так, как показано на рис. 164.

Из рассуждений, приведенных в тексте Учебника в связи с рис. 18.9 и 18.10, вытекает существование минимумов, когда $N d \sin \theta = (\text{целое число}) \cdot \lambda$, где N — число щелей, но $d \sin \theta / \lambda$ не равно целому числу. Это верно в общем случае, но может быть доказано с помощью приема спаривания щелей, только если N является степенью числа 2. Если число щелей больше двух, то главные максимумы появляются при тех же самых углах, что и для двух щелей, но являются более узкими.

17. Эта задача требует от учащихся применить их знания об интерференции света к области звуковых явлений.

а) Никакого звука не будет слышно под таким углом θ , для которого расстояние AB (рис. 165) равно $\frac{1}{2}\lambda$, $\frac{3}{2}\lambda$, $\frac{5}{2}\lambda$, ..., потому что при этом излучения обоих громкоговорителей будут взаимно ослаблять друг друга.

В этой задаче $\lambda = v/f = 300/1000 = 0,3$ м, $AB = 2 \sin \theta$ м. Отсутствие звука будет иметь место при

$$2 \sin \theta = \frac{0,3}{2}; \frac{0,9}{2}; \frac{1,5}{2}; \frac{2,1}{2} \text{ и т. д.}$$

Отсюда

$$\sin \theta = 0,075; 0,225; 0,375; 0,525; 0,675; 0,825; 0,975,$$

$$\theta = 4,3^\circ; 13^\circ; 22^\circ; 31,7^\circ; 42,5^\circ; 55,6^\circ; 77^\circ.$$

б) Благодаря многократным отражениям звук проходил бы по большому числу путей различной длины, прежде чем он достиг бы уха или микрофона. Поскольку он приходил бы при этом с самыми различными фазами, узлы интерференции не наблюдались бы.

18. На рис. 166 кривая a представляет распределение интенсивности, которое имело бы место при дифракции от одной щели. (Стрелки, направленные вниз, показывают темные области.)

Кривая b представляет распределение интенсивности, которое имело бы место при интерференции света от двух точечных (или линейных) источников в одинаковой фазе, если бы они испускали свет равномерно по всем направлениям. (Стрелки, направленные вверх, показывают темные полосы.)

Кривая c , полученная перемножением a и b , дает распределение интенсивности от двух линейных источников, излучающих свет в соответствии с дифракционной картиной от щели, а не равномерно по всем направлениям.

Отношение расстояния между щелями d к ширине щели w оказывается равным приблизительно 3,8. В соответствии с рис. 18.13 мы имели бы

$$x_D = L\lambda/w; \Delta x = L\lambda/d; x_D/\Delta x = d/w \approx 4,0.$$

20. а) Чтобы микроскоп давал большое увеличение, диаметр его объектива (апертура) должен быть очень мал, чтобы радиус кривизны поверхности линзы можно было сделать малым. Однако большое увеличение будет бесполезным, если из-за дифракционных эффектов на малой апертуре нельзя будет различить две соседние точки.

Для приближенного рассмотрения дифракционных эффектов на малой апертуре линзы учащиеся могут заменить ее щелью. Свет, проходящий через одиночную щель, расширяется, образуя дифракционную картину, первый минимум которой расположен под таким углом, что $\sin \theta = \lambda/w$. Рассмотрение света, идущего от двух соседних источников, соответствует рассмотрению света от двух соседних точек объекта. Свет от *двух источников, находящихся на малом угле от удаления друг от друга*, проходя сквозь щель, образует перекрывающиеся дифракционные картины. Если бы угол между направлениями на источники был большим, то наблюдались бы две отдельные дифракционные картины, и можно было бы с уверенностью сказать, что мы имеем дело с двумя источниками. Если же угол между источниками θ таков, что $\sin \theta = \lambda/w$, то из-за перекрытия дифракционных картин мы не смогли бы ясно различить два источника. Слишком большие усилия, которые пришлось бы затратить для получения точного выражения (через λ/w) синуса угла, позволяющего различить изображения двух соседних источников, не были бы вознаграждены. Для круговой апертуры это требование немного отличается от случая щели.

Однако чтобы различить две точки на изображении, угловое расстояние между ними должно быть не меньше θ , где $\sin \theta$ примерно равен λ/w , а w обозначает диа-

метр линзы. Ввиду того, что ω более или менее определяется желаемым увеличением, отсюда следует, что для достижения возможно малых θ (угловых расстояний между двумя точками, которые можно наблюдать отдельно) мы должны стремиться по возможности уменьшить λ (использовать, например, ультрафиолетовый свет).

б) Изображения можно наблюдать на флуоресцирующем экране или получать их фотографии на пленке.

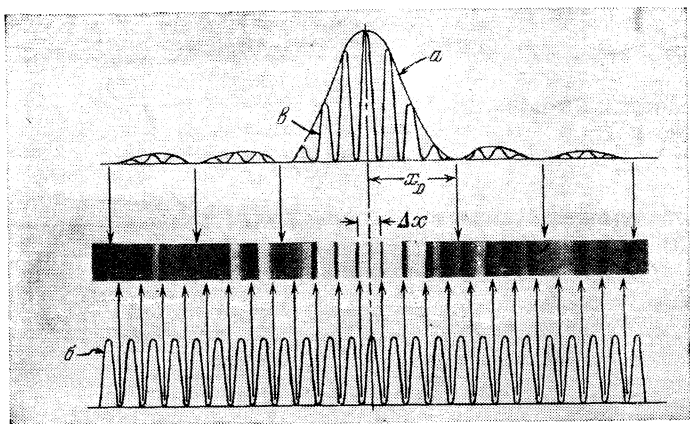


Рис. 166.

в) При применении линз они должны быть прозрачны для используемых длин волн. Кварц прозрачен приблизительно до $2100 \text{ \AA}$, флюорит — до $1200 \text{ \AA}$; однако воздух сильно поглощает лучи с длинами волн меньше $1800 \text{ \AA}$. В принципе можно было бы изготовить микроскоп, используя зеркала вместо линз.

21. а) Поскольку разность фаз между двумя источниками быстро изменяется, между испускаемыми ими световыми волнами интерференции не происходит. Каждый из источников создает свою собственную дифракционную картину в отдельности, и эти две картины просто налагаются друг на друга (рис. 167).

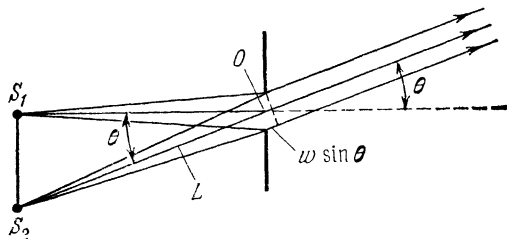


Рис. 167.

Центральный максимум дифракционной картины, создаваемой источником S_2 , лежит в направлении прямой, соединяющей S_2 с серединой щели. Если первый узел дифракционной картины от S_1 лежит в том же направлении, мы должны иметь $\omega \sin \theta = \lambda$. Поэтому $\sin \theta = x/L = \lambda/\omega$.

б) Поскольку $\omega = 10^{-2} \text{ см}$ и $L = 3 \cdot 10^2 \text{ см}$,

$$x = L\lambda/\omega = 3 \cdot 10^4 \lambda.$$

Если мы возьмем для λ значение, скажем, $5,7 \cdot 10^{-5} \text{ см}$, получим $x = 1,7 \text{ см}$.

22. Угловое разрешение телескопа зависит от отношения λ/D (длины волны света к диаметру объектива линзы или зеркала). При использовании более коротковолнового света угловое разрешение улучшается, так что можно раздельно видеть звезды, лежащие на сторонах меньшего угла с вершиной на Земле. В задаче 21 мы видели, что источники света, разделенные углом θ , могут быть еще разрешены через щель шириной w , если $\sin \theta = \lambda/w$. Дифракция на крае круглого отверстия диаметра D происходит почти так же, как на щели такой же ширины (в действительности, угловой раскрыв в этом случае в 1,2 раза больше). Поэтому угловое разрешение телескопа определяется условием $\sin \theta = \lambda/D$ (в действительности $1,2\lambda/D$). Паломарский телескоп ($D=5$ м) обладает угловым разрешением приблизительно 0,028 угл. с в белом свете (средняя длина волны $\lambda=5,7 \cdot 10^{-7}$ м) и приблизительно 0,022 угл. с в синем свете ($\lambda=4,5 \cdot 10^{-7}$ м).

27. На фотографии рис. V цветной вклейки видны чередующиеся светлые и темные полосы. Верхняя темная полоса показывает, что толщина в этой части меньше $1/4$ длины волны. Следующая темная полоса находится в области, где толщина пленки составляет $1/2$ длины волны. Если мы возьмем значение $6,5 \cdot 10^{-5}$ см

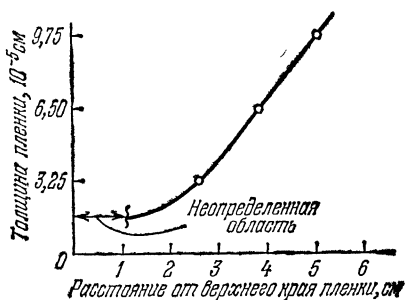


Рис. 168.

для длины волны красного света, то график зависимости толщины от вертикального расстояния, отсчитываемого вниз от верхнего края пленки, будет иметь вид, приведенный на рис. 168. Расстояние от верхнего края измерены здесь вдоль вертикальной прямой, проходящей через центр пленки.

28. в) Один из способов решения этой задачи состоит в том, чтобы начать ее с п. в), заметив, что у того края, где пластины соприкасаются, должен наблюдаться минимум отраженного света. Там, где нет воздушного зазора, нет и отражения. Это означает, что отраженные волны гасят друг друга. Поэ-

тому одна из них должна переворачиваться при отражении. При очень малом воздушном зазоре волны, отраженные от его сторон, будут по-прежнему почти уничтожать друг друга и будет наблюдаться очень мало отраженного света.

а) Из п. в) видно, что у того края, где пластинки касаются друг друга, будет темная полоса. Теперь начинаем считать полосы. Следующая темная полоса будет там, где толщина воздушного клина равна $1/2\lambda$ (полная разность хода λ); следующая темная полоса соответствует толщине λ . Когда мы дойдем до конца, мы насчитаем l полос, а толщина воздушного клина будет составлять $l/2$ длин волн. Однако это равно толщине в 0,09 мм. Если взять для синего света значение $\lambda=4750 \text{ \AA}$, то эта толщина составляет в длинах волн (0,09 мм): $(4750 \cdot 10^{-7})=190\lambda$. Мы насчитаем 380 полос на 10 см; следовательно, расстояние между полосами равно $10/380=0,026$ см.

б) В случае красного света на толщине волоса укладывается меньшее число длин волн ($\lambda=6500 \text{ \AA}$). Теперь будет меньше полос, а интервал между ними будет больше: $(6500 \text{ \AA}/4750 \text{ \AA}) \cdot 0,026=0,036$ см. Число полос, приходящееся на 1 см, обратно величине интервала и составляет 28 полос на 1 см.

г) На основании этого опыта мы не можем сказать, какая из волн переворачивается при отражении.

29. а) Дважды отраженный луч b отстаёт на полную длину волны от проходящей без отражения волны a , так как он дополнительно проходит взад и вперед сквозь пленку.

б) Никакого обращения фазы волн в этом случае не происходит, так как оба отражения имеют место на границе «стекло — воздух». Обращение фазы происходит на границе «воздух — стекло».

в) Гребень дважды отраженной волны выходит снизу тонкой пленки строго в фазе с гребнем волны, не испытывающей отражения.

30. а) Поскольку отражение на границе воздуха и пленки с $n=1,3$ и отражение на границе пленки ($n=1,3$) и стекла ($n=1,5$) по типу одинаковы и оба

сопровождаются обращением фазы, толщина пленки в $1/2\lambda$ дает полную разность хода в $1/2\lambda$, причем обе отраженные волны при интерференции гасят друг друга. Желтый свет в воздухе имеет длину волны 5800 Å. Отношение длин волн в двух различных средах равно относительному показателю преломления $n = \lambda_{\text{возд}}/\lambda_{\text{пл}}$, т.е.

$$\lambda_{\text{пл}} = \lambda_{\text{возд}}/n = 5800\text{Å}/1,3 = 4460\text{Å}.$$

Пленка должна быть толщиной $1/2\lambda = 1100\text{Å}$.

б) Если толщина пленки подобрана таким образом, чтобы происходило интерференционное гашение желтого света, то красный и фиолетовый свет будут в какой-то степени отражаться. Поэтому отраженный свет будет иметь красно-фиолетовый оттенок, т.е. пурпурный тон.

31. Почему при отражении света от оконного стекла обычно полосы интерференции не наблюдаются — тому есть несколько причин. Одна из главных состоит в том, что обычно оконное стекло наблюдается в белом свете. Предположим, стекло имеет толщину 0,3 см. Для света с длиной волны (в стекле) 6000 Å разность хода составляет 10 000 длин волн, и этот свет должен ослабляться при интерференции и потому отражаться не будет. Свет с длиной волны 5999,7 Å имел бы разность хода 10 000,5 длин волн и при интерференции должен был бы усиливаться. Таким образом, многие длины волн, равномерно распределенные по всему спектру, будут испытывать отражение, так что конечным результатом будут не окрашенные интерференционные полосы, а отраженный белый свет.

Если бы использовался свет какой-нибудь одной длины волны, мы могли бы видеть полосы интерференции. Однако для этого пришлось бы выбрать одиночную спектральную линию: даже желтый свет натрия не подошел бы для этой цели, так как он содержит две близко расположенные линии. К тому же, поверхности большинства оконных стекол слишком далеки от плоскости в оптическом смысле, чтобы можно было наблюдать хорошие полосы.

На тонких кусочках стекла (таких, например, как покровные стекла для микроскопии) и при идеальных условиях интерференционные полосы могут быть заметны.

II часть курса настолько тесно переплетается с экспериментами, что при введении новых понятий центр тяжести может быть перенесен на лабораторные работы. Поскольку почти к каждому разделу текста Учебника относится тот или иной лабораторный опыт, здесь особенно полезно гибкое чередование лабораторных работ и бесед в классе (табл. 20).

ТАБЛИЦА 20

Номер	Опыт	Наиболее удобное время выполнения	Очередность
II. 1	Отражение от плоского зеркала	Перед разделом 12.4	***
II. 2	Изображение в вогнутом зеркале	Перед разделом 12.9	**
II. 3	Преломление	Перед разделом 13.3	***
II. 4	Изображения, образованные с помощью собирающей линзы	Перед разделом 13.11	**
II. 5	Преломление частиц	Перед разделом 14.2	***
II. 6	Волны на спиральной пружине	2 раза по полуурока при прохождении гл. 15 или 1 урок в середине главы	***
II. 7	Волновые импульсы в волновой кювете	Введение к разделам 16.1—16.3	***
II. 8	Периодические волны	После раздела 16.4	***
II. 9	Преломление волн	Перед разделом 16.5	***
II. 10	Волны и препятствия	Перед разделом 16.7	**
II. 11	Волны от двух точечных источников	Часть 1 в начале гл. 17, часть 2 после раздела 17.4	***
II. 12	Интерференция и фаза	Перед разделом 17.5	***
II. 13	Опыт Юнга	Перед разделом 18.4	***
II. 14	Дифракция света от одной щели	Сразу после опыта II.13	**
II. 15	Разрешающая способность	При изучении раздела 18.8	*
II. 16	Измерение малых расстояний с помощью интерференции	После раздела 18.9	*

*** — Необходимо

** — Желательно

* — Факультативно

11.1. Отражение от плоского зеркала

Эту работу можно провести до того, как учащиеся прочитали или обсудили раздел 12.4. В процессе работы, они узнают, что падающий и отраженный лучи составляют равные углы с отражающей поверхностью, что изображение в плоском зеркале находится на таком же расстоянии за зеркалом, на каком предмет находится перед зеркалом, и что изображение и предмет имеют одинаковые размеры. Больше того, опыт, приобретенный при установлении положения изображения с помощью параллакса и прослеживании хода лучей, пригодится при выполнении последующих лабораторных работ.

В качестве объектов в этом опыте используются только гвозди и булавки в отличие от треугольников и букв они симметричны, и получение их изображений в плоском зеркале не приводит к вопросу об обращении этих изображений.

При нахождении изображений с помощью параллакса надо использовать достаточно длинные гвозди, чтобы они выступали над зеркалом. Тогда нахождение изображения сводится просто к тому, чтобы «взять на мушку» гвоздь-изображение (см. рис. 12.11).

Зеркало можно укрепить и другим способом, вложив его в пропил, сделанный в деревянном бруске (рис. 169).

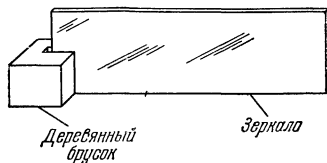


Рис. 169.

Ввиду того, что углы между лучами и отражающей поверхностью непосредственно видны на бумаге, мы сравниваем именно эти углы. Вы можете подождать с введением углов между лучами и нормалью до тех пор, пока вы не пройдете эту тему в классе, или, если вы предпочитаете, обратите на них внимание учащихся в процессе выполнения работы.

Следует подчеркнуть, что чем аккуратнее проводятся линии хода лучей, тем точнее будут результаты. Надо пользоваться твердыми, остро отточенными карандашами.

Лучи зрения, проведенные для установления положения изображения, должны образовывать большой угол друг с другом (не менее 30°). Если углы будут малыми, то лучи зрения будут почти параллельны, и будет трудно определить точку их пересечения. Лучи, углы, отражающая поверхность, предмет, изображение и расстояния до зеркала должны быть тщательно обозначены. Образцы рисунков здесь не приводятся. Это позволяет учащимся самостоятельно открыть для себя ход отраженных лучей.

С помощью описанных принадлежностей учащимся трудно убедиться в том, что отраженный луч, нормаль и падающий луч лежат в одной плоскости; поэтому за доказательством этого следует обратиться к разделу 12.4 и рис. 12.8.

Ответы на вопросы

Когда голова движется влево, ближайший из двух карандашей кажется движущимся направо. Это упражнение освежит в памяти учащихся понятие о параллаксе и с самого начала покажет им, что нет ничего таинственного в установлении положения объектов или изображений с помощью параллакса. Кроме того, наблюдение над тем, что ближайший из двух объектов кажется перемещающимся в сторону, противоположную движению глаза, пригодится учащемуся при установлении положения изображений, помогая ему решить, каким образом двигать его «указатель» параллакса.

Многие учащиеся будут думать, что изображение гвоздя находится в плоскости зеркала. Если они пришли к этому заключению до выполнения измерений, доставьте им удовольствие сделать открытие относительно того, где же в действительности находится изображение.

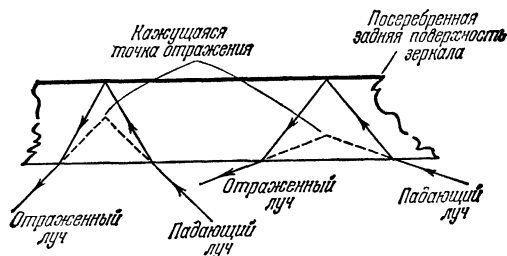


Рис. 170.

Точные измерения с помощью зеркала с посеребренной задней поверхностью покажут, что как предмет, так и его изображение находятся примерно на одном и том же расстоянии от задней отражающей поверхности. Однако преломление

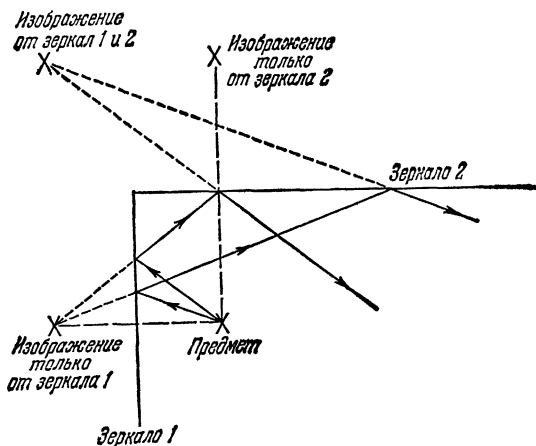


Рис. 171.

делает расстояние до изображения несколько меньше, чем расстояние до предмета (примерно на 1 мм для зеркала 2-миллиметровой толщины), как показано на рис. 170. На этот раз нет необходимости обсуждать это маленькое расхождение.

Изображение и предмет имеют одинаковые размеры, хотя изображение кажется меньше, так как оно дальше находится. Если в качестве указателя (индикатора) параллакса используется гвоздь, тождественный объекту, то ясно видно, что индикатор и изображение одинаковы по своим размерам.

Три изображения, образованные двумя зеркалами, поставленными под прямым углом друг к другу, могут быть получены по схеме, показанной на рис. 171.

Приборы и принадлежности: 1 плоское зеркало (примерно 4×4 см, с наружным покрытием, если удастся достать); 2 гвоздя с плоскими шляпками (примерно от 4 до 7 см длиной); 3 булавки (2,5 см длиной); 3 листа бумаги (21×28 см); 1 лист мягкого картона или подобного материала (21×28 см); 1 твердый остро отточенный карандаш; 1 транспортир или угломер; 1 деревянный брусок ($5 \times 2,5 \times 2,5$ см); 1 резиновое кольцо или резиновая полоска; 1 измерительная линейка.

II.2. Изображение в вогнутом зеркале

В этом опыте учащиеся знакомятся с изображениями в вогнутом зеркале и находят соотношение между s_0 и s_i . Эта работа аналогична лабораторной работе II.4, и мы рекомендуем вам провести только одну из них. Если у вас нет достаточно хороших зеркал, проведите только лабораторную работу II.4; если же у вас есть хорошие зеркала, надо провести этот опыт перед прохождением раздела 12.9.

Поскольку учащихся просят измерить расстояния, на которых находятся предмет и изображение от главного фокуса, то малая ошибка при измерении фокусного расстояния f приведет к большой ошибке при построении кривых, представляющих результаты опыта. Чем с большим фокусным расстоянием используется зеркало, тем более точными будут результаты. Однако если фокусное расстояние превышает 15 см, то потребуется больше рабочего места для его точного определения. Точное определение фокусного расстояния с помощью параллакса может быть произведено в этом случае с помощью определения положения изображения предмета, находящегося не ближе, чем за 5 м от линзы.

Учащимся понадобится для работы площадка около одного метра длиной. Метровая полоска бумажной ленты из отметчика времени (используемого в лабораторной работе I.5), прикрепленная к столу кнопками, может служить «оптической скамьей». Зеркало можно укрепить с помощью пластилина.

Лампочку от карманного фонаря лучше всего крепить в маленьком керамическом патроне, хотя патрон для подсветки шкал, закрепленный на маленькой плоской деревянной планке, также представляет хорошее устройство. Можно также установить лампочку, припаяв к ее цоколю соединительные провода и облепив его затем пластилином, или вдавить цоколь в кусок пластилина так, чтобы лампочка могла стоять в вертикальном положении. Нить накала лампочки и центр зеркала должны находиться на одной высоте над поверхностью стола.

Нахождение изображения с помощью параллакса может представлять трудности для отдельных учащихся. Вы можете быстро проверить правильность их манипуляций, сравнив произведение $s_0 s_i$ с f^2 . Если эти две величины различаются более чем на 5%, наверное, надо оказать индивидуальную помощь в установлении положения изображения. Поскольку одна из целей данной лабораторной работы состоит в том, чтобы учащийся экспериментально изучил соотношение между s_0 и s_i , не надо советовать ему проверять каждую пару измеренных значений этим способом.

Получение результатов с ошибкой вплоть до 5% является типичным при использовании описанных принадлежностей и методики измерений. Хотя тщательность и терпение могут улучшить результаты, опасайтесь утратить цель опыта, настаивая на очень высокой степени точности. Измерение расстояний с точностью до ближайшего полсантиметрового деления даст вполне удовлетворительные результаты.

Удобный указатель параллакса изготавливается из куска проволоки или из обычной булавки, воткнутой в корковую пробку. Булавка достаточно широка,

чтобы прикрыть изображение нити накала, и в то же время она не закрывает ничего лишнего. Это позволяет точно устанавливать положения. Крепление проволоки не существенно, если только внимательно следить за тем, чтобы она была вертикальна. Удостоверьтесь, что учащиеся находят положение изображения нити накала, а не изображение указателя параллакса, когда нить находится между зеркалом и фокальной точкой.

Лампочка от карманного фонаря образует яркое изображение, которое проступает на окружающем фоне. Убедитесь в том, что учащиеся сообразили, что изображение должно находиться перед зеркалом. Обсуждение разницы между действительным и мнимым изображениями следует отложить до тех пор, пока учащиеся не изучат этот материал.

Ответы на вопросы

Изображение перевернуто, когда предмет находится за главным фокусом, и прямое, когда предмет находится между главным фокусом и зеркалом. Изображение

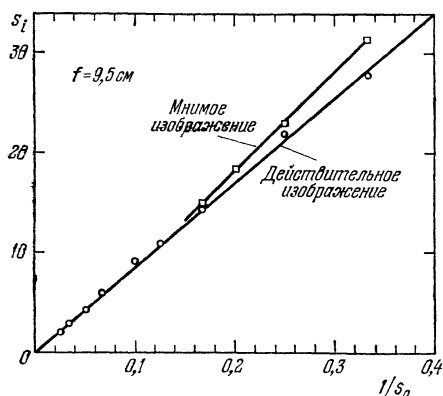


Рис. 172.

будет уменьшенным по отношению к предмету, когда предмет находится на расстоянии, превышающем фокусное расстояние f . Изображение увеличено, когда расстояние до предмета меньше f . Изображение имеет те же размеры, что и предмет, когда расстояние до предмета равно f .

График зависимости s_i от $1/s_o$ представляет прямую линию с наклоном, равным f^2 (рис. 172).

Изображение является резко определенным для всех положений предмета, за исключением его положения в фокусе или в непосредственной близости к нему.

Когда предмет находится в фокусе, его изображение лежит в бесконечности и не может быть увидено.

Пусть учащиеся выберут четыре-пять точек на своих графиках и вычислят $s_0 s_i$.

Приборы и принадлежности: 1 хорошее вогнутое зеркало (диаметром около 5 см, с фокусным расстоянием 10 см); 1 длинная бумажная лента (около 1,5 м длиной, от отметчика времени или от счетной машины); 1 лампочка от карманного фонаря напряжением 2,5 В и керамический патрон; 1 сухой элемент на 1,5 В; 2 соединительных провода (около 30 см длиной); 1 кусок пластилина (около 10 г); 1 твердый остро отточенный карандаш; 1 измерительная линейка; 1 кусок прямой проволоки (около 7,5 см) или булавка; 1 пробка корковая; 1 лист миллиметровой бумаги.

11.3. Преломление

Цель данного опыта — установить закон Снеллиуса экспериментальным путем. Поэтому эту работу лучше всего проделать перед обсуждением раздела 13.3.

Вертикальная линия на плоской стенке пластмассового сосуда лучше видна сквозь жидкость, если ее оттенить с помощью красного карандаша. Если исполь-

зывать миллиметровую бумагу с полярной сеткой координат, то можно непосредственно отсчитывать углы от булавочных уколов с точностью до $0,2^\circ$. Если используется другая бумага, то падающий и преломленный лучи надо строить твердым карандашом, чтобы избежать ненужных ошибок при измерении углов. Подкладывая под бумагу гофрированный или мягкий картон, можно облегчить установку булавок.

Булавку-объект следует располагать приблизительно в 4 см от вертикальной линии на пластмассовом сосуде. В противном случае (при больших расстояниях и больших углах падения) изображение становится расплывчатым и искаженным.

Мы рекомендуем учащимся вычислить отношение синусов соответствующих углов. Этот метод точнее и быстрее, чем определение отношения полухорд. Кроме того, это позволяет учащимся познакомиться с синус-функцией, широко используемой на протяжении материала гл. 13.

Желательно, чтобы учащиеся проделали упражнения с различными жидкостями. В качестве жидкостей, не пачкающих и не растворяющих пластмассовый сосуд, можно применять: глицерин, минеральное масло, машинное масло ($n \approx 1,5$), растворы сахара и соли. Не используйте четыреххлористый углерод, сероуглерод, скипидар, кислоты или основания.

Если эксперимент выполнен тщательно, то отношение $\sin i / \sin r$ оказывается постоянным в большей степени, нежели i/r (рис. 173). Но если учащийся не

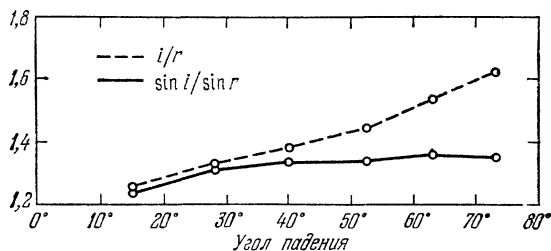


Рис. 173.

сумел получить точных значений при больших углах падения, он не сможет решить, какое из соотношений лучше. В случае сомнений предложите учащемуся повторить некоторые из его измерений при больших углах.

Приборы и принадлежности: 1 полукруглый прозрачный пластмассовый сосуд (радиус 6 см, глубина 3 см); 4 листа миллиметровой бумаги или 2 листа обычной (с прямоугольной сеткой) и 2 листа — с полярной сеткой координат; 1 лист мягкого картона или аналогичного материала размерами приблизительно 21×28 см; 2 булавки $\approx 2,5$ см; минеральное масло (около 75 см^3) или другая подходящая жидкость; 1 твердый остро отточенный карандаш; 1 угольник или транспортир (если не используется бумага с полярной сеткой координат); 1 прямоугольный брусок стекла или пластика с двумя полированными гранями (факультативно); 1 линейка.

II.4. Изображения, образованные с помощью собирающей линзы

В этой работе учащийся знакомится с изображениями, образуемыми собирающими линзами, и находит математическое соотношение между s_0 и s_i . Этот опыт подобен лабораторной работе II.2 и его можно опустить, если работа II.2

уже была проведена. Лучше всего проделать этот опыт перед обсуждением раздела 13.11.

Поскольку учащиеся будут измерять расстояния, на которых находятся предмет и его изображение от главного фокуса, небольшая ошибка в измерении фокусного расстояния f приведет к значительным ошибкам в результатах, используемых для построения графика. Лучше всего взять линзу с фокусным расстоянием около 20 см. Однако если фокусное расстояние превышает 15 см, то для его точного определения потребуется больше рабочего места. Точное определение фокусного расстояния с помощью параллакса может быть проведено, если определить положение изображения предмета, расположенного не ближе чем за 5 м от линзы.

Учащимся понадобится рабочая площадка около 2 м длиной. В качестве «оптической скамьи» можно использовать двухметровую бумажную ленту от отметчика времени или бумагу для счетных машин, прикрепленную к столу с помощью клейкой ленты.

Две измерительные линейки, расположенные вдоль линии на бумаге так, что начало каждой из них находится в соответствующем главном фокусе, позволяют учащимся непосредственно отсчитывать значения s_0 и s_i . Заметим, что s_0 всегда измеряется от главного фокуса, лежащего по ту же сторону от линзы, что и предмет, в то время как s_i всегда измеряется от главного фокуса, лежащего по другую сторону линзы. Чтобы не вводить условия о знаках, как s_0 , так и s_i , оба считаются расстояниями и потому всегда положительны (см. лабораторную работу П.2). Убедитесь в том, что учащийся всегда смотрит на предмет сквозь линзу. Предмет никогда не должен находиться между глазом и линзой. Если это произойдет, то учащийся увидит изображение, образованное отражением от выпуклой поверхности линзы.

Лампочка для карманного фонаря используется в качестве предмета потому, что она яркая и выделяется на общем фоне. Для крепления лампочки лучше всего подходит маленький керамический патрон. Патрон для подсветки шкал, укрепленный на маленькой деревянной планке, также представляет хорошее устройство. Если ничего подобного достать не удастся, лампочку можно укрепить, припаяв к ее цоколю подводящие провода и облепив его затем пластилином (или вдавив цоколь в кусок пластилина) так, чтобы лампочка могла стоять прямо. Нить накала лампочки и центр линзы должны быть расположены на одной высоте над поверхностью стола.

Нахождение изображения с помощью параллакса может вызвать затруднения у отдельных учащихся. Можно быстро проверить, правильно ли они поступают, сравнив произведение $s_0 s_i$ с f^2 . Если эти величины различаются более чем на 5%, вероятно, придется оказать некоторую индивидуальную помощь в определении положения изображения. Поскольку одна из целей данной лабораторной работы состоит в том, чтобы учащийся экспериментально изучил соотношение между s_0 и s_i , не надо советовать ему проверять в процессе измерений каждую пару полученных значений этим способом.

Удобный указатель параллакса изготавливается из куска проволоки или булавки, установленной на основании из пробки. Крепление несущественно, если только заботиться о том, чтобы указатель стоял вертикально. Убедитесь в том, что учащиеся видят, что действительное изображение находится перед линзой, а мнимое — за ней.

Обычно результаты получаются с ошибкой, достигающей 5%. Терпение и аккуратность могут улучшить результаты, но здесь можно перестараться и утратить цель эксперимента. Измерение s_0 и s_i с точностью до ближайшего полсантиметрового деления даст удовлетворительные результаты для большинства положений предмета.

Половинка линзы значительно облегчает нахождение положения мнимого изображения, так как она исключает искажения, связанные со сферической аберрацией, и обладает прямолинейным краем, через который удобно смотреть. Тонкую линзу можно разрезать, проведя царапину по ее диаметру стеклорезом и затем сломав ее пополам. Чтобы не порезаться, нужно сгладить острые края и кромки с помощью наждачной бумаги.

Ответы на вопросы

Изображение уменьшено по отношению к предмету, когда предмет находится за главным фокусом, и увеличено, если предмет расположен между линзой и ее главным фокусом. Изображения не видно, когда предмет находится в главном фокусе или возле него.

Изображение перевернутое, когда предмет находится дальше фокуса, и прямое, когда предмет располагается между линзой и ее фокусом.

График зависимости s_i от $1/s_0$ имеет вид прямой линии с наклоном, равным f^2 .

Приборы и принадлежности: 1 собирающая линза (с фокусным расстоянием около 20 см); 1 длинная полоска бумаги (около $1,5 \times 10$ см); 1 лампочка от карманного фонаря на напряжение 2,5 В и патрон; 1 сухой элемент на 1,5 В; 2 соединительных провода; 1 кусок пластилина (около 10 г); 1 твердый остро отточенный карандаш; 1 измерительная линейка; 1 кусок прямой проволоки (около 7,5 см) или булавка; 1 пробка; 1 лист миллиметровой бумаги.

II. 5. Преломление частиц

Цель большинства наших опытов в том, чтобы учащийся открыл новые физические соотношения. Например, в лабораторной работе II.3 он устанавливает закон Снеллиуса. Здесь нас не интересует само по себе изменение в направлении движения стального шарика, скатывающегося с наклонной плоскости; нас больше занимает конкретный вопрос, описывается ли это изменение направления законом Снеллиуса. Иными словами, учащегося просят проверить гипотезу в отношении света. Эту лабораторную работу полезнее всего провести перед обсуждением раздела 14.2.

Верхняя и наклонная плоскости должны быть сделаны из гладкого твердого материала, вроде мезонита (керамика типа кафеля). Два куса размерами примерно 30×30 см и $7,5 \times 30$ см можно соединить друг с другом с помощью изоляционной ленты. Верхняя плоскость должна быть расположена в 3—4 см над поверхностью стола. Может быть, придется подклеить с помощью ленты лист бумаги к наклонной части, чтобы предотвратить проскальзывание шарика.

Как верхняя плоскость, так и плоскость стола должны быть гладкими и выровненными (горизонтированными). Если стол шероховатый, можно подложить другой кусок мезонита у основания склона. Быструю проверку на глаз необходимости дальнейшего выравнивания можно произвести, медленно катая стальной шарик по верхней и нижней плоскостям. Для горизонтирования обеих плоскостей можно использовать подкладки из бумаги.

Уклон для сообщения шарiku начальной скорости можно сделать из пластмассовой линейки с продольным желобком посередине. 8-сантиметровый и 3-сан-

тиметровый отрезки такой линейки можно склеить друг с другом, как показано на рис. 174. Необходимо придерживать уклон при скатывании с него шарика, чтобы шарик приобретал приблизительно одну и ту же скорость в результате каждой попытки.

Листы бумаги, прикрепляемые к верхней и нижней плоскостям, должны быть расположены таким образом, чтобы их края были параллельны друг другу и чтобы они оставались таковыми при каждой последующей попытке.

С помощью короткого пускового уклона можно получить большие углы падения; однако, может быть, придется смещать бумагу на нижней плоскости вправо или влево, чтобы поймать след.

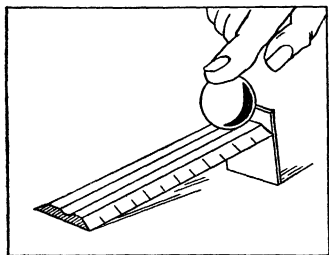


Рис. 174.

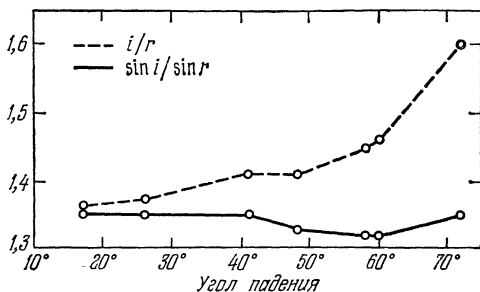


Рис. 175.

У учащихся могут получиться различные значения показателя преломления, так как начальные скорости шарика или высота верхней плоскости у них могут быть разными. Результаты типичной серии измерений приведены на рис. 175.

Ответы на вопросы

Из корпускулярной модели света следует, что скорость света в воде больше, чем скорость света в воздухе.

Можно изготовить «линзу», фокусирующую скатывающиеся шарики, если придать верхнему и нижнему краям наклонной плоскости форму параболы.

Расширение опыта

Вкатывая шарик вверх по наклонной плоскости, можно проиллюстрировать полное внутреннее отражение. Мезонитовую плитку надо расположить на столе рядом с наклонной плоскостью так, чтобы получилась непрерывная поверхность. На обе поверхности надо положить по листу бумаги с наложенной на нее копировкой, как описано выше. Пусковой уклон, сделанный из линейки, положенной одним концом на деревянный брусок, который на 2,5 см выше верхней плоскости, придаст шарiku достаточную скорость, чтобы он смог вкатиться вверх по наклонной плоскости. Далее, можно увеличивать угол падения вплоть до достижения критического угла. Когда угол падения превысит критическое значение, шарик больше не будет достигать верхней плоскости, а будет заворачивать и скатываться обратно вниз.

Приборы и принадлежности: 1 стальной шарик диаметром 2,5 см; 2 куса мезонита толщиной 0,6 см и размерами примерно 30×30 см и 7,5×30 см; 2—4 листа белой бумаги 21×28 см; 2—4 листа копировальной бумаги; линейка с желобком (уклон); деревянный брусок 5×2,5×2,5 см в качестве подставки под линейку для пуска шарика или другое пусковое устройство; угломер; толстая изоляционная лента.

II.6. Волны на спиральной пружине

В гл. 15 появляется много новых понятий и идей, которые будут лучше поняты, если учащиеся имеют возможность изучить их в лаборатории. Этот эксперимент существенным образом охватывает содержание всей главы, и поэтому его надо проводить в течение целого лабораторного занятия, несмотря на то, что он в основном качественный. Если ваш учебный план не позволяет вам потратить на это два раза по полуурока, лучше всего провести эту работу в середине изучения гл. 15.

Отдельные части этой работы можно дать в виде демонстраций в классе. Например, желательно отнести к демонстрациям ту часть, где требуется соединять две различные пружины.

Мы используем в этом опыте спиральную пружину, так как импульсы распространяются вдоль нее настолько медленно, что их легко можно наблюдать. Существенно, чтобы пол был гладким. Комбинация небольшой спиральной пружины из круглой проволоки и большой из плоской проволоки (см. рис. II.6) дает оптимальное разделение импульса на отраженную и проходящую части.

Частичное отражение и прохождение при соединении двух пружин лучше всего видно, если обе пружины растянуты до одинаковой длины. Чтобы достигнуть этого, надо растянуть только около одной трети большой пружины.

В разделе ЛР Учебника не содержится инструкций, каким образом возбуждать импульсы встряхиванием. Мы полагаем, что этому лучше всего научиться, глядя, как это делается. Чтобы получить короткий импульс, требуется быстрое щелкающее движение руки. Надо позаботиться, чтобы при обратном ходе рука не проскакивала первоначальное положение; это позволит вам избежать импульсов сложной формы. При растяжении большой пружины возникает кручение, которое по-разному ослабляет передний и задний фронты импульса, тем самым искажая его. Чтобы избежать этого, пусть ваши учащиеся привяжут к одному из концов пружины нитку (см. рис. II.7) и, растягивая пружину, держат ее за эту нитку. Нить позволяет пружине «раскручиваться», предохраняя, таким образом, от крутящего момента.

Чтобы изучать отражение импульса в месте соединения большой пружины и нити, нить должна быть в несколько метров длиной. Если использовать короткую нить, передний фронт импульса отразится от закрепленного конца нити и наложится на задний фронт, прежде чем тот дойдет до места соединения.

Ответы на вопросы

Импульс явно затухает по мере его распространения вдоль пружины. Только если пол достаточно гладкий, пружина достаточно тугая и кручение отсутствует, можно ожидать, что учащийся придет к заключению, что форма импульса в основном остается неизменной.

Скорость импульса не изменяется по мере его распространения вдоль пружины; она не зависит от размеров импульса в пределах той точности, которой можно достигнуть с помощью секундомера.

Предположение о том, что скорость импульса не уменьшается при каждом отражении, можно проверить, сравнивая время, которое затрачивает импульс, чтобы пройти туда и обратно два или несколько раз, с временем, затрачиваемым им на один проход туда и обратно.

Скорость импульса возрастает при увеличении натяжения пружины. Поэтому две пружины из одного материала, растянутые до различной длины, представляют разные среды.

При столкновении импульсов кажется, что они проходят друг сквозь друга без изменений.

Максимальное смещение пружины при встрече двух импульсов приблизительно равно сумме двух отдельных смещений. Учащиеся могут определить это с точностью примерно от 10% до 20%.

Когда импульс подходит к месту соединения двух пружин, он частично отражается и частично проходит дальше. Импульсы, распространяющиеся вдоль малой пружины, при отражении остаются в той же полярности, а импульсы в большой пружине переворачиваются при отражении.

Импульсы на большой пружине отражаются прямыми, достигая нити; импульсы отражаются перевернутыми от закрепленного конца. Скорость импульса в нити гораздо больше, чем в пружине.

Демонстрации

Для демонстраций можно подвесить снаружи помещения длинный отрезок резиновой трубки или гибкую бельевую веревку. Преимуществом такого подвеса будет малое затухание.

Внутри помещения можно подвесить горизонтально к потолку спиральную пружину, как описано в Приложении 5 на стр. 391. Тем не менее, чтобы по пружине могли распространяться волны изучаемых нами типов, пружина должна находиться под значительным натяжением.

Приборы и принадлежности: 1 спиральная пружина из плоской проволоки 10 см длиной, 7,5 см диаметром; 1 измерительная линейка; 1 длинная нить; 1 спиральная пружина из круглой проволоки 1,75 м длиной, 2 см в диаметре.

II.7. Волновые импульсы в волновой кювете

Эта работа знакомит учащихся с волновой кюветой, и ее лучше всего провести как введение к первым трем разделам гл. 16. Использование периодических волн и волновых возбудителей следует умышленно отложить до следующей работы, чтобы обеспечить плавный переход от импульсов на линии к периодическим волнам в плоскости.

Глубина воды в кювете для всех опытов должна составлять примерно 0,5—0,75 см, если не оговорено противное. (Установка действует гораздо лучше, если после каждого дня работы менять воду и демпферы). Чтобы возбудить прямолинейный импульс, нужна некоторая практика. Позади и впереди основного импульса всегда распространяются меньшие побочные импульсы. Импульсы могут быть искривлены, если возбуждающая их планка движется слишком быстро; при слишком медленном движении импульсы будут настолько слабыми, что их нельзя будет разглядеть. Вместо планки можно воспользоваться линейкой.

Противоположный конец кюветы может служить в качестве прямолинейного отражающего барьера, если стенки кюветы вертикальны. Изменяя направление планки, можно менять угол падения.

Для последней части опыта изогнутая резиновая трубка, показанная на рис. II.9, дает достаточно хорошее приближение к параболе. Круговые импульсы могут быть, очевидно, возбуждены с помощью капель воды, падающих в кювету из глазной пипетки.

Ответы на вопросы

Импульс начинается почти в точке и распространяется кругами; следовательно, скорость его распространения одна и та же во всех направлениях.

Прямолинейные импульсы остаются прямолинейными, распространяясь вдоль кюветы, если они достаточно широки, так что занимают всю кювету. Если импульс не занимает всю кювету, он искривляется на концах. Это особенно заметно после отражения импульса.

Угол отражения, видимо, равен углу падения.

Кажущийся источник круговых импульсов, отраженных от прямолинейного барьера, находится на таком же расстоянии позади барьера, на каком истинный источник находится впереди него. Это можно объяснить только в предположении, что угол падения равен углу отражения. Прямолинейный барьер отражает прямолинейные импульсы аналогично тому, как плоское зеркало отражает параллельный пучок световых лучей; он отражает круговые импульсы аналогично тому, как плоское зеркало отражает расходящийся луч света.

Прямолинейные импульсы, отраженные параболой, собираются в фокусе, что снова можно объяснить только в предположении, что угол падения равен углу отражения.

Направление движения малого отрезка импульса можно указать, начертив направленный перпендикуляр к этому отрезку. Соединив последовательные перпендикуляры, построенные к одному отрезку импульса, мы получим картину, аналогичную картине лучей, изучавшейся в гл. 12 (см. рис. 12.16).

Если круговые импульсы возбуждаются в фокусе параболы, то отраженные импульсы прямолинейны. Не существует других точек, которые давали бы такой же точно результат. Чтобы объяснить все эти явления, необходимо предположить, что углы падения и отражения равны между собой.

Приборы и принадлежности: 1 волновая кювета и демпферы; 1 штатив для волновой кюветы; 1 электролампа 150 Вт с прозрачным баллоном и прямолинейной нитью накала, отражатель и патрон; толстостенная резиновая трубка диаметром около 2 см и длиной 45 см; 4 парафиновых блока; большой экран из белой бумаги в виде квадрата со стороной около 2 м; 4 деревянных клина (1,25×7,5 см).

II.8. Периодические волны

Этот важный опыт лучше всего выполнять после изучения раздела 16.4. Его основная цель — научить учащихся пользоваться соотношением $v=f\lambda$. Этот опыт также показывает, что скорость распространения волн в волновой кювете зависит от глубины воды, и подготавливает, таким образом, почву для проведения лабораторной работы II.9, посвященной преломлению.

Чтобы получить чистые волны, присоединяйте батарею таким образом, чтобы мотор вращался по направлению от кюветы. Устойчивую работу на низкой частоте можно получить, передвинув движок регулировочного реостата немного выше точки остановки мотора. Это даст частоту приблизительно от 5 до 7 колебаний в секунду. Для низкочастотных волн отрегулируйте настроенную гайку на стержне на получение более высокой амплитуды. Прежде чем производить измерения, может потребоваться некоторая практика, чтобы убедиться в том, что возбудитель достаточно долго работает на низкой частоте, чтобы можно было произвести несколько измерений частоты и длины волны. Важно работать на низких частотах. Для частот, превышающих 10 колебаний в секунду, изменение глубины воды от стандартных 0,5—0,75 см до 2 см не приведет к заметному изменению скорости волн. Рис. 176 показывает зависимость скорости водяных волн от частоты и глубины (H — глубина воды).

В процессе возбуждения волн на спиральной пружине и позднее в опытах с волновой кюветой при использовании барьеров большинство учащихся заметит стоячие волны. Желательно рассказать о них вкратце как о частном случае суперпозиции, указав, что с их помощью можно другим способом измерить длину волны. Стоячие волны важны для части IV и более подробно обсуждаются в разделе 34.5.

Если большая и маленькая стальные спиральные пружины связаны друг с другом (см. лабораторную работу II.6), то лучше всего, если растягиваться будет

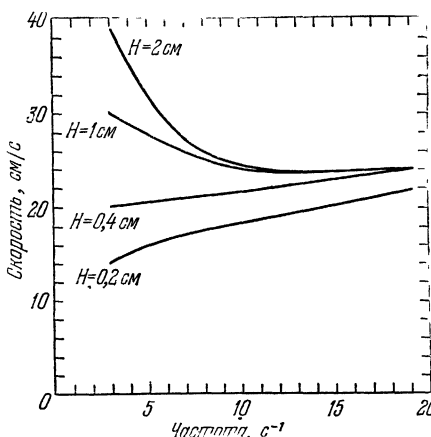


Рис. 176.

только одна треть большой пружины, а остальную ее часть лучше держать в руке.

Ответы на вопросы

Когда волны останавливаются стробоскопом с двумя открытыми щелями, их частота равна удвоенной частоте вращения стробоскопа; при четырех открытых щелях частота волн в четыре раза больше частоты стробоскопа, — если никакое дальнейшее повышение частоты вращения не приводит к остановке волн.

Точность определения скорости можно найти, вычислив сначала среднее значение из всех измерений, затем вычисляя отклонение результата каждого измерения от этого среднего значения и, наконец, среднее значение от абсолютных значений всех этих отклонений. (Этот способ проще, чем нахождение среднеквадратичного отклонения.) Частное от деления среднего отклонения на конечное среднее значение дает относительную ошибку, которая может быть выражена в процентах.

Поскольку изображение волн на экране получается увеличенным, необходимо соответствующим образом пересчитать измеренные значения расстояний с учетом масштаба. Учащиеся могут попытаться представить себе, как определить масштабный множитель. Это можно сделать несколькими способами. Один из них состоит в том, чтобы поместить в кювету непрозрачный брусок известной длины, и сравнить длину его тени на экране с его настоящей длиной. Чтобы избежать нечетких теней, вызываемых водяными менисками у краев бруска, можно держать его снизу вплотную к стеклянному дну кюветы. Другой способ состоит в измерении расстояния от источника света до кюветы и от источника света до экрана и взятии их отношения.

Расстояние между двумя светлыми полосами в картине стоячей волны равно половине длины бегущей волны. Длину волны можно определить по картине стоячей волны, определив расстояние, на котором укладывается, скажем, десять светлых полос, и разделив его на пять.

Оба конца пружины можно считать узлами, поскольку рука, поддерживающая стоячие волны, движется с малой амплитудой. Это будет иметь место только в том случае, если на длине пружины укладывается целое число полуволн. На этой стадии не нужно, чтобы учащиеся находили количественное соотношение между

возможными длинами стоячих волн и длиной пружины; однако если они это сделают, это принесет им большую пользу при изучении энергетических уровней атомов в части IV. Вы можете также упомянуть о стоячих волнах в музыкальных инструментах и других устройствах, издающих звуки.

Если вы используете две связанные между собой спиральные пружины из лабораторной работы II.6, то в обеих частоты будут одинаковы; длина волны в малой пружине будет меньше, чем в большой, следовательно, и скорость волн в малой пружине меньше, чем в большой.

Приборы и принадлежности: 1 полный набор принадлежностей к волновой кювете (он состоит из: 1 волновой кюветы и демпферов, 1 штатива для волновой кюветы, 1 возбудителя волн, 1 подставки для возбудителя, 1 электролампы с прозрачным баллоном на 150Вт с прямолинейной нитью накала, с патроном, отражателем и шнуром, 1 подставки для лампы, 1 сухой батареи на 1,5В, 1 реостата на 6Ом, 1 соединительного провода между реостатом и батареей, 1 бумажного экрана, квадратного, со стороной 2 м, 2 парафиновых блоков); 2 ручных стробоскопа; 1 секундомер или часы с большой секундной стрелкой; 1 измерительная линейка или рулетка; то же, что и для лабораторной работы II.7.

II.9. Преломление волн

Этот эксперимент в основном качественный и должен предшествовать обсуждению раздела 16.5. Производя тщательные измерения, можно установить также и количественное соотношение между углами падения и преломления, однако сделать это с применяемым здесь оборудованием можно рекомендовать лишь небольшому числу учащихся. Основная проблема состоит в поддержании постоянства частоты.

Волны, возбуждаемые с частотой от 5 до 7 колебаний в секунду, будут заметно преломляться, переходя из более глубокой части в более мелкую под некоторым углом. Чтобы получить одинаково резкие изображения волн независимо от их направления, следует пользоваться точечным источником света.

Во время этого опыта очень важно поддерживать вращение мотора таким, чтобы частота оставалась постоянной. Это предотвратит преждевременное обнаружение дисперсии. В конце опыта желательно обратить внимание учащихся на дисперсию, предложив им наблюдать изменение угла преломления при увеличении частоты.

Ответы на вопросы

Преломленные волны являются прямолинейными. И без количественных измерений видно, что угол преломления меньше угла падения. Как длина волны, так и скорость волны в более мелкой части меньше, чем в более глубокой.

Поскольку скорость волны в мелкой воде меньше, волновая модель лучше согласуется с преломлением света, чем корпускулярная.

Углы падения следует выбирать в диапазоне от 20 до 70°. Отношение $\sin i / \sin r$ будет приблизительно постоянно. Однако точность здесь недостаточна для того, чтобы можно было прийти к заключению, что предыдущее отношение более постоянно, чем i/r .

Приложение

Несколько задач из раздела ДКЛ к гл. 16 относится к ситуациям, которые можно легко реализовать в волновой кювете. Ценность этих задач значительно возрастет, если ваши учащиеся решат их в лаборатории.

Задача 7. Удовлетворительный эллипс можно изготовить следующим образом: сначала согните отрезок резиновой трубки в окружность, соединив ее

концы с помощью короткой вставки или кусочка стеклянной трубки. Поместите эту трубку в кювету, сдавив ее для придания эллиптической формы, для чего можно слегка зажать ее между двумя брусками с противоположных сторон.

З а д а ч а 9. Для получения удовлетворительных результатов, убедитесь в том, что отражатели прямолинейны и расположены под прямым углом друг к другу. Любое отклонение будет усилено при отражении.

З а д а ч а 23. Вы можете использовать стеклянную пластинку, одной стороной лежащую на дне кюветы, а другой — на нескольких прокладках. Важно, чтобы наклон пластинки был небольшим, чтобы получить постепенное загибание. Для этого подходит глубина около 0,75 см.

З а д а ч и 25 и 26. Линзу можно выпилить из куска оргстекла. Она должна быть достаточно длинной, чтобы прикрыть не менее половины ширины кюветы, но в то же время она должна быть довольно узкой, чтобы волны не очень сильно затухали над ней. Точная форма линзы не существенна; это могут быть две пересекающиеся дуги или эллипс.

В последнем случае вы можете использовать оставшийся после выпиливания кусок оргстекла в качестве эллиптического отражателя для задачи 7. Глубина воды в глубокой части кюветы должна быть по крайней мере 1,5 см и не больше чем 0,2 см над линзой.

Приборы и принадлежности: 1 полный комплект принадлежностей к волновой кювете (см. лабораторную работу II.8); 1 стеклянная пластинка; подставка под стеклянную пластинку (монеты, шайбы и т. д.); 1 ручной стробоскоп; 1 секундомер или часы с большой секундной стрелкой; 1 измерительная линейка или рулетка.

II.10. Волны и препятствия

Цель этого эксперимента — показать, что волны загибаются, проходя мимо препятствий и что это загибание уменьшается с уменьшением длины волны. Это не исключает волновую модель для света, но наводит на мысль, что длина световой волны очень мала. Лабораторную работу лучше всего проводить перед изучением раздела 16.7.

Чтобы получить чистые волны при высокой частоте, края генератора должны быть гладкими.

Пузырьки воздуха можно удалить, стерев их пальцами с ребра генератора после погружения его в воду. Прежде чем использовать высокочастотные волны с препятствиями, пусть учащиеся проверят их прямолинейность в пустой кювете. Если появятся странные линии и картины, генератор не достаточно гладок. Такая проверка является обязательной.

Края парафиновых блоков, используемых в качестве барьеров, должны быть гладко срезаны под углом 45° , чтобы получились трапецииды, показанные на рис. 177. Скошенные края легко сделать перочинным ножом. Такие края позволяют сформировать четко определенные щели. Набор блоков различных размеров позволяет рассмотреть много щелей с различными просветами. Более длинная грань должна быть обращена к генератору. Парафиновый блок около 5 см длиной представляет хорошее препятствие. При нормальных условиях его видимая длина на экране будет составлять около 10 см.

Ответы на вопросы

Когда длина волны составляет около половины размеров препятствия или превышает ее (обе измеряются на экране), волны сильно загибают за препятствия.

На достаточном удалении позади препятствия волны смыкаются, и присутствие препятствия не может быть обнаружено; блок не отбрасывает резкой тени.

При уменьшении волны тень становится резче.

Диффракция от щели показывает аналогичную зависимость от длины волны. Некоторые картины приведены на рис. 178. Мы изобразили только центральный

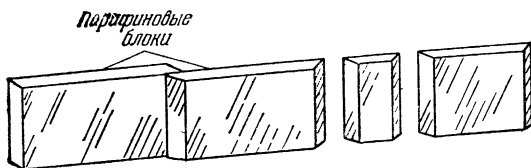


Рис. 177.

максимум каждой картины. В некоторых случаях учащиеся будут наблюдать вторичные максимумы. (Еще не время рассматривать подробную структуру дифракционной картины от одной щели. Это сделано в гл. 18.) Сейчас достаточно упомянуть, что вторичные максимумы очень слабые и что при уменьшении длины волны они также появляются под меньшими углами к первоначальному направлению распространения.

При постоянной длине волны постепенное сужение щели приводит к увеличению загибания. Изменения картины, связанные с уменьшением ширины щели, можно скомпенсировать уменьшением длины волны. Количественное рассмотрение показало бы, что картина определяется отношением длины волны к ширине щели. Неразумно пытаться сделать это в волновой кювете, так как качество изображения волн, наблюдаемого на экране, изменяется с частотой. Подробности, заметные при одной частоте, могут быть не видны при другой, хотя отношение λ/w будет тем же самым.

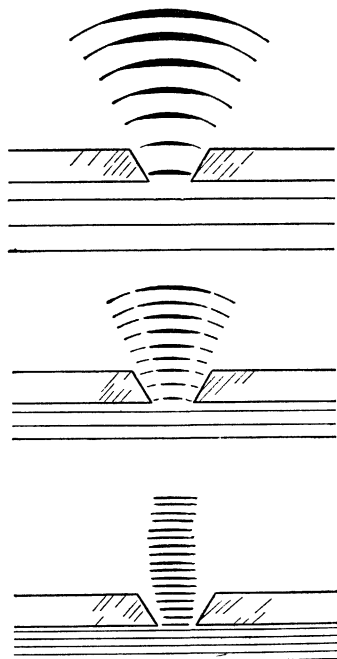


Рис. 178.

Приборы и принадлежности: 1 полный набор принадлежностей к волновой кювете (см. лабораторную работу II.8); 1 малый барьер (парафиновый); 4 парафиновых блока; 1 ручной стробоскоп; 1 измерительная линейка или рулетка.

II.11. Волны от двух точечных источников

Эта работа разделена на две части: первая часть качественная и служит введением к гл.

17; вторая часть количественная и должна следовать за обсуждением раздела 17.4.

Достаточно всего лишь нескольких секунд, чтобы посмотреть на интерференционную картину, однако для того чтобы разобраться в ее подробностях и быть в состоянии ее описать, нужно гораздо больше времени. Умение описывать наблю-

даемое является важной составной частью науки. Этот опыт нельзя заменить демонстрацией!

Для начала хорошо взять длину волны, имеющую на экране около 2 см.

Нас в первую очередь интересует картина на большом удалении от источников. В силу этого желательна большая амплитуда. Чтобы наблюдать волны вблизи источников, надо уменьшить амплитуду с помощью регулировочной гайки и расположить генератор таким образом, чтобы бусинки едва касались воды.

Ответы на вопросы

1. Главные особенности картины таковы: волны распространяются наружу от источников; волны разделены полосами, где возмущение отсутствует (узловыми линиями); вдали от источников эти линии являются прямыми и кажутся расходящимися из точки, расположенной посередине между источниками; ближе к источникам они искривляются. «Остановка» волн с помощью стробоскопа показывает, что волны, разделенные линиями отсутствия возмущения, «идут не в ногу»: по обеим сторонам от каждого гребня располагаются две впадины. При малых амплитудах между источниками могут наблюдаться стоячие волны.

При уменьшении длины волны число линий отсутствия возмущения возрастает. Картина всегда оказывается симметричной относительно перпендикуляра, восстановленного в середине отрезка, соединяющего источники. Вдоль этого перпендикуляра мы всегда видим бегущие волны. При увеличении расстояния между источниками число узловых линий возрастает.

Надо, чтобы учащиеся делали зарисовки на экране при ответе на эти вопросы.

Во второй части эксперимента вычисляется длина периодической волны, исходя из результатов измерений над интерференционной картиной и из расстояния между источниками. Затем результат этого вычисления проверяется с помощью прямого измерения на экране, чтобы учащиеся удостоверились в правильности метода, который они будут применять в лабораторной работе II.13 для измерения длины волны красного света.

Убедитесь, что ваши учащиеся измеряют x , L и d на экране, что даст им длину волны, измеряемую также на экране.

2. Результаты двух измерений согласуются с точностью от 5% до 10%. Основные источники ошибок заключаются в изменении частоты мотора и в невозможности «остановить» волны на достаточно длительное время, чтобы точно измерить их длину.

Учащимся не нужно повторять все измерения с различными щелями: им следует только получить картину, чтобы убедиться, что они могут измерить с ее помощью длину волны.

Чтобы получить достаточно широкую дифракцию, ширина щели должна быть меньше одной длины волны. Если, с другой стороны, щели будут слишком узкими, сквозь них не пройдут волны достаточной интенсивности. 5-сантиметровый блок, использованный в работе II 10, может служить разделительным барьером между двумя щелями. На рис. 179 показано расположение щелей (блоки можно передвигать для регулировки ширины щели). Картина интерференции может возникнуть

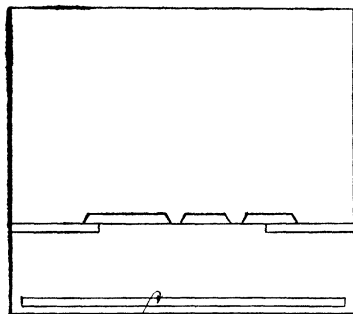


Рис. 179.

только там, где волны от двух щелей перекрываются, что наиболее отчетливо видно в центральной зоне.

Можно предложить учащимся прикрыть одну из щелей и посмотреть, что получится. Они повторят это со светом в лабораторной работе II.14.

Приборы и принадлежности: 1 полный комплект принадлежностей к волновой кювете (см. лабораторную работу II.8); 1 ручной стробоскоп; 1 измерительная линейка или рулетка; 1 малый барьер (парафиновый); 4 парафиновых блока.

II.12. Интерференция и фаза — —

Понимание влияния фазы на интерференционную картину необходимо при обсуждении интерференции света. Поэтому этот эксперимент подготавливает почву для раздела 18.3. Его лучше всего провести в начале обсуждения раздела 17.5.

Работа состоит из двух частей, в которых используются разные возбудители волн. Надо стремиться к тому, чтобы они выполнялись в том порядке, какой указан на стр. 186, однако ущерб будет невелик, если полкласса начнет с первой части, а другая половина — со второй.

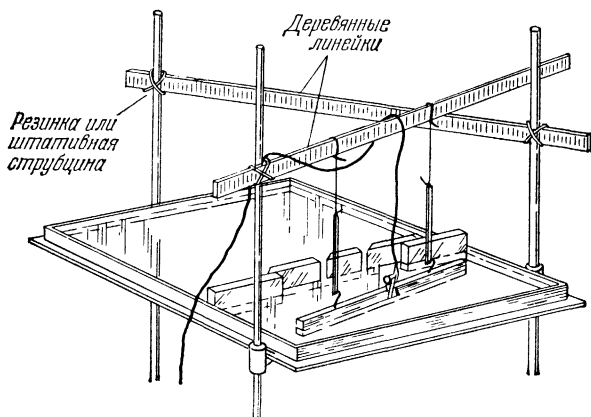


Рис. 180.

Каждая из проволочных вешалок, показанных на рис. 2, зажата между двумя металлическими пластинками (стандартные пластинки от тисок), свинченными вместе и прижатыми к стулу струбциной. Расстояние от места изгиба проволоки до металлических пластинок равно 10—15 см. Для увеличения частоты надо уменьшить это расстояние.

Ответы на вопросы

Когда правый источник запаздывает по отношению к левому, картина смещается вправо. Когда, например, это отставание по фазе равно $1/2$ первая узловая линия слева занимает положение центрального максимума синфазной картины; первая узловая линия справа перемещается в положение, лежащее примерно посередине между первой и второй узловыми линиями синфазной картины. Когда отставание по фазе возрастает до 1, источники снова оказываются в одинаковой фазе; первая узловая линия передвинулась в положение второй и т. д.

Изменение фазы при работе генераторов приводит к веерообразному замещающему движению узловых линий и их искривлению в направлении, противоположном направлению движения. Это действительно наблюдается во второй части опыта, когда два генератора не имеют в точности одинаковой частоты. («Два источника с одинаковой частотой, но изменяющейся фазой» в действительности означает «два источника с почти одинаковой частотой»).

Когда мы держим за концы проволоки, разность фаз между источниками резко изменяется, а вместе с ней и картина интерференции. Если такие изменения происходят очень быстро, следует ожидать полного размывания интерференционной картины.

На рис. 180 показан другой способ возбуждения волн с регулируемой разностью фаз. Расположение парафиновых блоков такое же, как на рис. 179. Ширина щелей должна быть меньше одной длины волны, так чтобы они приблизительно представляли точечные источники. Поворот возбудителя изменяет фазу обоих источников (щелей). Если очень медленно поворачивать подставку генератора, не возмущая его колебаний, то можно наблюдать влияние изменения разности фаз.

Приборы и принадлежности: 1 полный комплект принадлежностей к волновой кювете (см. лабораторную работу II.8); 1 ручной стробоскоп; 1 возбудитель волн с регулируемой фазой; 1 сухой элемент на 1,5В; 2 провололочные вешалки; 4 металлические пластинки; 2 зажима типа «крокодил» с припаянными бусинками; 2 штативные струбцины; 2 скользящих грузика; 2 деревянные линейки; 1 малый барьер (парафиновый); 4 парафиновых блока.

II.13. Опыт Юнга

Этот эксперимент в некотором смысле представляет кульминационную точку изучения волн. Его лучше всего выполнить перед изучением раздела 18.4.

При изготовлении щелей наилучшие результаты получаются при использовании покровных стекол для микроскопа, покрытых водной суспензией коллоидного графита. Тонкий непрозрачный слой суспензии можно наложить с помощью мягкой кисточки. Щели надо изготовлять по методу, показанному рис. II.17, через час после высыхания покрытия.

Покровные стекла можно также закоптить. Для этого нужно подержать их над пламенем свечи, пока на них не отложится тонкий слой сажи. Попытки приготовить хорошие щели на покровных стеклах, покрытых другого рода веществами, были безуспешными; покрытие отслаивается при проведении царапин.

Два чистых лезвия безопасной бритвы, слегка наклоненных вперед, как показано на рис. II.17, позволяют изготовить щели с расстоянием между ними, равным толщине одного лезвия.

40-ваттная лампа с прозрачным баллоном для освещения витрин является хорошим источником света, так как она имеет длинную прямолинейную нить накала. Если ее нельзя достать, можно использовать лампу от волновой кюветы или более слабую лампу с прозрачным баллоном и прямолинейной нитью. В любом случае щели должны быть параллельны нити накала.

По-видимому, стоит иметь во время этого опыта одну установку с волновой кюветой. Сходство и различие между измерениями направлений узловых линий в волновой кювете могут тогда быть увязаны с измерениями, производимыми со светом. Заметим, что в этом опыте глазной зрачок охватывает всю картину интерференции световых волн. Аналогичная ситуация в волновой кювете потребовала бы «глаза» величиной с кювету.

Ответы на вопросы

Свет от лампы, проходя сквозь узкие щели, дифрагирует. Свет от двух щелей перекрывается, создавая интерференционную картину. Темные полосы наблюдаются вдоль узловых линий, а светлые — вдоль направлений максимального возмущения.

Полосы по краям картины будут окрашены, если составляющие белый свет цвета представляют волны различной длины. Такие волны будут иметь максимумы и узловые линии в различных направлениях.

Когда лампа закрыта красным целлофаном, другие цвета обрезаются, оставляя более резкую картину красных и темных полос. При этом большее число полос становится различимым.

Из рис. II.18 видно, что θ_n равен половине расстояния между $2n$ узловыми линиями, деленной на расстояние между линейкой и щелями. (Поскольку θ_n мал, расстояние от щелей до линейки вдоль любой узловой линии будет одним и тем же, в пределах экспериментальных ошибок.)

Длина волны красного света может быть определена с точностью приблизительно от 10 до 20%. Основные ошибки вносятся при измерении x и расстояния между щелями. Следует помнить, что даже самые точные измерения приводят к значениям, зависящим от интервала длин волн, пропускаемого светофильтром.

В синем свете мы увидим чередующиеся светлые и темные полосы, расположенные ближе друг к другу, чем полосы в красном свете; таким образом, синий свет имеет более короткую длину волны.

Картина интерференции расширяется при поворачивании покровного стекла в горизонтальной плоскости так, чтобы оно составляло угол приблизительно в 30° с лучом зрения. Это вызвано эффективным уменьшением расстояния между щелями (рис. 181).

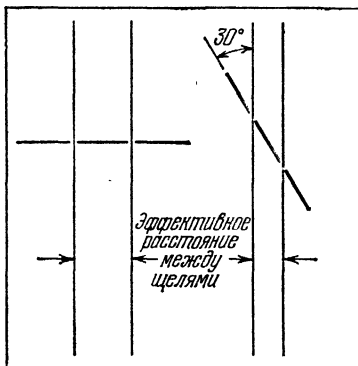


Рис. 181.

Приборы и принадлежности: 1 витринная прозрачная лампа на 40Вт; 1 патрон и шнур; 1 покровное стекло для микроскопа ($2,5 \times 7,5$ см); 2 обоюдоострых лезвия безопасной бритвы; 1 лист красного целлофана (10×10 см); 1 лист синего целлофана (10×10 см); 2 резиновых колечка; 1 штатив; 1 держатель для бюретки; 1 линейка; 2 метки для линейки; суспензия коллоидного графита или свеча-коп-тилка; изоляционная или целлофановая лента.

II.14. Дифракция света от одной щели

Первая часть этого эксперимента служит введением к изучению интерференции от одной щели. Здесь подчеркивается сходство и различие в картинах интерференции от одной и двух щелей. Ее лучше всего сделать сразу же вслед за лабораторной работой II.13, возможно даже на том же уроке. Вторая часть может быть выполнена после обсуждения раздела 18.6 и является менее важной.

Для изготовления одиночных щелей надо приготовить покровные стекла по методу, описанному в лабораторной работе II.13.

Одну из пары щелей можно заблокировать, медленно двигая лезвие бритвы вдоль стекла до тех пор, пока его край не прикроет одну из щелей.

Ответы на вопросы

Очень узкая щель, сделанная лезвием бритвы, дает широкую светлую полосу. Щель, сделанная иглой, дает картину светлых и темных полос. Центральная полоса вдвое шире, чем находящиеся по обе стороны от нее, и гораздо ярче. (В случае узкой щели виден только центральный максимум дифракционной картины.)

Темные полосы, видимые в случае двойной щели, пропадают, оставляя широкую дифракционную полосу от одной щели. Темные до этого места становятся светлыми! Корпускулярная модель света не могла объяснить этого.

Ширина щели w может быть вычислена из отношения $\lambda/w = x/L$, где x — половина ширины центрального максимума, отсчитанная по шкале, и L — расстояние между щелью и шкалой.

При более широких щелях точность определения x может быть увеличена путем измерения расстояния между узловыми линиями по обеим сторонам вторичных максимумов и делением этого расстояния на четыре.

Ошибка определения ширины щели составляет около 50%.

Для сравнения прямой способ измерения ширины отдельной щели состоит в проектировании ее на экране с помощью диапроектора. Увеличение может быть найдено, если вставить в проектор на место щели плоскую прозрачную шкалу.

Демонстрации

На рис. 182 показано простое устройство, которое вы можете использовать для демонстрации того, что много точечных источников, расположенных близко друг к другу, создают такую же дифракционную картину, как и прямолинейный источник позади щели (к разделам 18.5 и 18.6).

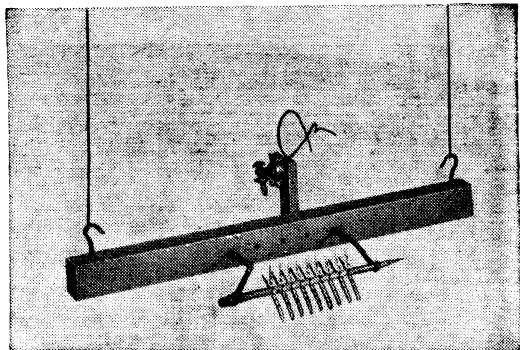


Рис. 182.

Расположите парафиновые блоки таким образом, чтобы образовалась щель с шириной, равной ширине «многоточечного источника». Покажите картину дифракции от прямолинейного генератора, отметив направления узловых линий на экране. Затем поместите ряд точечных источников в щель и отрегулируйте длину волны, чтобы она была такой же, как прежде. Сравните направления узловых линий с отмеченными на экране.

Приборы и принадлежности: те же, что и для лабораторной работы П.13; 1 швейная игла или прямая булавка; оборудование волновой кюветы.

II.15. Разрешающая способность

Этот эксперимент показывает, как влияет дифракция на малой апертуре на разрешение двух близко расположенных в пространстве источников света. Опыт не требует целого занятия в лаборатории, и его лучше всего выполнить при изучении раздела 18.8.

Лучший способ изготовить малые апертуры состоит в том, чтобы положить фольгу на гладкую твердую поверхность и прокалывать в ней отверстия, вонзая острие булавки или иглки на разную глубину.

Необходимо располагать нить накала лампы с прозрачным баллоном непосредственно позади двух дырочек, чтобы сквозь них проходило достаточно света, позволяющего уверенно наблюдать дифракционные кольца. Сквозь некоторые из отверстий будет видно не менее четырех-пяти концентрических колец вокруг обеих дырочек.

Рябые картины или неправильные кольца, вращающиеся при повороте отверстия, вызываются нерегулярностями в отверстиях. Этого трудно избежать, особенно при малых апертурах, однако это не мешает проведению опыта. Учащиеся с плохим зрением и при отсутствии коррекции (очков) могут испытывать затруднения, разрешая источники на умеренном расстоянии без отверстий.

В этом опыте не наблюдается картины интерференции даже при перекрытии двух источников; свет, проходящий через дырочки, исходит из разных частей нити накала и не имеет поэтому стабильной разности фаз.

Ответы на вопросы

Две отдельные светлые точки могут быть разрешены глазом с расстояния в несколько метров. Размеры апертуры совпадают с размерами глазного зрачка и составляют примерно 0,5 см.

Два источника, вероятно, будут разрешены с помощью одного из отверстий среднего размера с расстояния от 1 до 2 м, в зависимости от размеров отверстия. По мере возрастания расстояния края двух источников постепенно сближаются, пока они, наконец, не начинают перекрываться.

При увеличении расстояния от источников происходит уменьшение угла между двумя направлениями, в которых мы видим центры источников. Центральные максимумы дифракционных картин от источников представляют конусы, расходящиеся от апертуры. Эти конусы в конце концов перекрываются, когда угол между направлениями на источники становится меньше угла при вершине конуса.

При уменьшении размеров апертуры угловая ширина дифракционных конусов центральных максимумов возрастает, пока конусы не начинают перекрываться.

Красный свет дифрагирует сильнее, чем синий, так как он имеет большую длину волны. Таким образом, дифракционные конусы красного света шире и источники перекрываются раньше.

На разрешение двух источников не влияет изменение их размеров, если минимальное расстояние между ними поддерживается постоянным, поскольку именно дифракция света от внутренних краев определяет разрешающую способность.

Если есть возможность использовать источник монохроматического света вроде натриевой лампы, то можно провести количественное исследование максимального удаления от источников, при котором еще наблюдается их разрешение, в зависимости от расстояния между источниками. Графическое представление результатов показывает линейную зависимость.

Приборы и принадлежности: 1 лампа накаливания с прозрачным баллоном (150-ваттная лампа от волновой кюветы); 1 патрон и шнур для лампы; 1 штатив и держатель бюретки (или другое устройство для крепления лампы); 1 рамка из тонкого картона (для укрепления алюминиевой фольги, приблизительно $7,5 \times 15$ см); 1 булавка или игла; красный целлофан (или другой красный светофильтр); синий целлофан (или другой синий светофильтр); 1 измерительная линейка или рулетка; алюминиевая фольга; клейкая лента.

II.16. Измерение малых расстояний с помощью интерференции

В этом опыте, как и во второй части лабораторной работы II.14, знание длины световой волны используется для измерения очень малых расстояний. Его лучше всего провести после изучения раздела 18.9.

Лучшими для этой цели являются очень ровные и тщательно очищенные стеклянные пластинки шириной около 3 см и длиной 20 см.

Поместите одну чистую пластинку поверх другой под монохроматическим источником света. Та пара, на которой видно меньше всего темных и светлых полос, является достаточно плоской, чтобы ее можно было использовать в данном эксперименте.

Лучше всего здесь подходит монохроматический источник света вроде натриевой лампы. Свет от прозрачной газосветной трубки также дает хорошие результаты. Если ни того, ни другого достать не удастся, то желтый или зеленый светофильтр, помещенный перед обычной лампой дневного света, приведет к образованию полос, число которых можно подсчитывать.

С помощью этого устройства можно измерять различные тонкие материалы, вроде тонкого нейлона, используемого в опытах по изучению закона Кулона. При толщинах порядка 10^{-3} см этот метод не уступает по точности измерениям с помощью микрометра.

Ответы на вопросы

Неправильные светлые и темные полосы образуются в результате интерференции между светом, отраженным от нижней поверхности верхней пластинки и от верхней поверхности нижней пластинки. Расстояние между ними будет изменяться от точки к точке вдоль поверхности соприкосновения.

Когда одна полоса заменяется другой, верхняя пластинка на $\frac{1}{2} \lambda$ приближается к нижней.

Расстояние между пластинками отличается на полволны между двумя соседними светлыми полосами.

Диапазон толщин, которые могут быть измерены с помощью этих пластинок, ограничен нашей способностью различать и подсчитывать полосы. Нижний предел определяется полировкой и чистотой пластинок.

Приборы и принадлежности: 2 стеклянные плоскопараллельные пластинки ($20 \times 5 \times 1$ см); 2 круглые резинки; 1 флуоресцентная лампа (по крайней мере 25 см длиной) с арматурой и шнуром или другой источник монохроматического света; тонкие материалы (маленькие кусочки 5 см длиной, около 1 см шириной, толщиной от 0,002 до 0,006 см); 1 линейка; микрометр.

1. Множественные изображения

Сведения о множественных изображениях, создаваемых зеркалами, расположенными под углом друг к другу, приводятся для облегчения задачи преподавателя по формулировке ответов на возможные вопросы. Данную тему нельзя считать подходящей для разбора перед всем классом; она слишком сложна и ее значение недостаточно, чтобы оправдать затраты времени на попытки сделать вопрос понятным хотя бы для небольшой части учащихся. Предлагаемый материал может оказаться полезным, однако, для беседы с наиболее успевающими учащимися на факультативных занятиях.

Простой способ нахождения положения множественных изображений заключается в том, чтобы искать «изображения изображений». Эта процедура, способная запутать многих учащихся, не должна, разумеется, предлагаться всему классу.

Рис. 183 иллюстрирует этот метод. Показано два зеркала, расположенных под углом 60° . Точечный объект P даст пять показанных на рисунке изображений: I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 . Все они могут быть найдены путем следующих операций.

1. Продолжите линии сечения двух зеркал, указывая, с какой стороны находится отражающая поверхность. Например, на прилагаемой схеме отражающими являются правая сторона продолжения зеркала 2 и нижняя сторона продолжения зеркала 1.

2. Используя обычную технику, найдите изображение точки P , создаваемое зеркалом 1. Получается точка I_1 , для которой $PO_1 = I_1O_1$, где PO_1 — перпендикуляр к зеркалу 1.

3. Затем найдите изображение точки I_1 , создаваемое зеркалом 2. При опускании перпендикуляра из I_1 на плоскость зеркала 2 он падает на отражающую поверхность этого зеркала. Продолжая перпендикуляр дальше на расстояние O_2I_2 , равное I_1O_2 , получаем I_2 .

4. Продолжая ту же процедуру, можно попытаться найти изображение точки I_2 в зеркале 1. Опускаем перпендикуляр из I_2 на продолжение зеркала 1, т. е. до точки O_3 , и продолжаем его на отрезок O_3I_3 , равный I_2O_3 . Поскольку точка I_2 расположена со стороны отражающей поверхности зеркала 1, точка I_3 является законным мнимым изображением.

5. Нечто иное получается при попытке найти изображение точки I_3 в следующем зеркале, которым служит продолжение зеркала 2. На этот раз, если опустить перпендикуляр на продолжение зеркала 2, то окажется, что он падает со стороны неотражающей поверхности. Таким образом, точка I_3 уже не имеет изображения и является последним изображением в этой последовательности.

Тем не менее, хотя эта последовательность и обрывается, возможно образование и других мнимых изображений. Мы уже видели, что I_3 есть последнее из

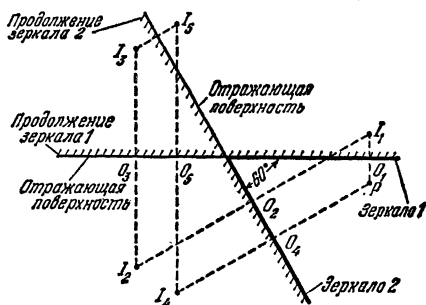


Рис. 183.

изображений, создаваемых светом, идущим из точки P и падающим сначала на зеркало 1. Существуют, однако, другие изображения, создаваемые светом, падающим сначала на зеркало 2.

1. Первое из изображений точки P , образуемых зеркалом 2, обозначено символом I_4 . Оно аналогично изображению I_1 , создаваемому зеркалом 1.

2. Далее, точка I_5 есть изображение точки I_4 , образуемое зеркалом 1. Оно аналогично изображению I_2 , хотя и проходит не через само зеркало, а через его продолжение.

Возникает интересная ситуация при попытке найти изображение точки I_5 в зеркале 2. Если опустить перпендикуляр, получится еще одно изображение, и притом вполне законное, но это изображение, которое можно обозначить I_6 , в точности совпадает с I_3 . Для доказательства последнего утверждения потребуются исключительно точный чертеж или же сложные геометрические рассуждения. В связи с этим полезно знать, что все изображения располагаются на одной общей окружности, содержащей и точку P , с центром в точке пересечения плоскостей зеркал. Простая формула для числа изображений существует только для значений угла между зеркалами, содержащих целое число раз в 180° . Если этот угол равен $180^\circ/n$, то число изображений составляет $2n-1$.

2. Радуга

Во многих учебниках содержатся схематичные, неполные и только отчасти правильные объяснения радуги, которые зачастую скорее запутывают, нежели разъясняют положение вещей. Ниже проводится подробный последовательный анализ образования радуги. Он правилен, как мы полагаем, в том объеме, в котором он здесь приводится; последний шаг (вычисление интенсивности каждого цвета радуги) выходит за рамки этой попытки объяснения явления и поэтому он не приводится.

Почему радуга имеет форму дуги? Оставим пока в стороне цвет. Будем думать, например, о чисто желтом свете, чтобы понять, каким образом возникает дугообразная форма.

Когда луч (желтого) света падает на водяную каплю, некоторое количество света входит в каплю, преломляется и отражается. Отразившись (пока неважно, каким образом), этот свет выходит из капли по многим направлениям. Сейчас для нас важно только то, что свет, выходящий из капли обратно под углом 42° к направлению падающего луча, будет особенно ярким. Он будет ярче, чем идущий под углом 41° или 43° , или в любом другом близлежащем направлении.

Рис. 184 частично иллюстрирует происходящее. Яркие отраженные лучи выходят по всем направлениям, составляющим угол 42° с направлением входящего в каплю луча. Поэтому они образуют световой конус с вершиной в капле (рис. 185).

Где должен быть расположен такой конус света, чтобы идущие вдоль его поверхности лучи попадали прямо к вам, т. е. чтобы вы могли его видеть? Лучи конуса, вершина которого находится прямо перед вами, будут идти вокруг вас во все стороны и никак не попадут в вас. Если лучи конуса приходят к вам, то его вершина должна быть отклонена на 42° от направления «прямо перед вами» (рис. 186).

В пространстве есть много точек, в которых могли бы находиться водяные капли, посылающие к вам отраженные от них лучи, — это любая точка, направление на которую составляет 42° с направлением «прямо перед вами». Все такие капли лежат на конусе с вершиной в вашем глазу, а вам кажется, что они лежат на окружности. Поскольку вы находитесь на поверхности Земли, ни одна из капель не посылает к вам свет из-под Земли, и вы видите самое большее половину окружности — радугу! Если некоторые области на небосводе не содержат необходимых капель, вы можете видеть только небольшой участок или несколько несвязанных между собой частей радуги *).

*) В тексте не оговорено, что наблюдатель подразумевается стоящим спиной к Солнцу. В противном случае ось конуса (и направление на центр радуги) не будет направлена «прямо перед вами». Более строго можно утверждать, что центр радуги лежит на продолжении прямой, проведенной от Солнца к наблюдателю. (Прим. перев.).

Схема радуги в поперечном сечении

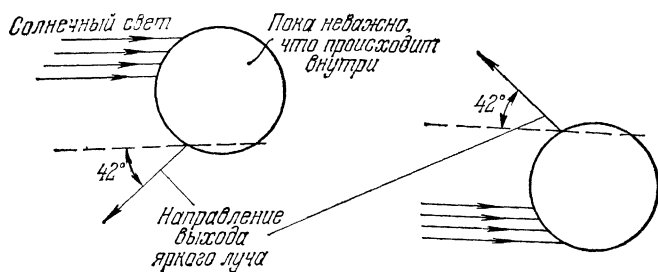


Рис. 184.

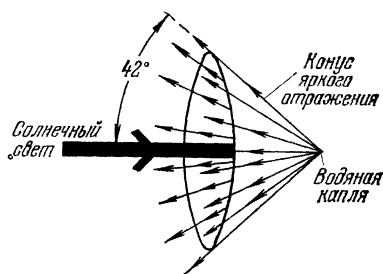


Рис. 185.

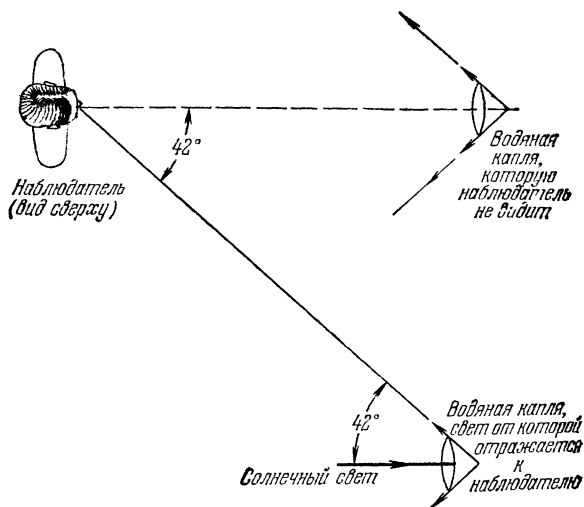


Рис. 186.

Почему одиночная сферическая капля дождя образует яркий конус света? Проведем сечение сферы плоскостью, проходящей через ее центр, и рассмотрим полученную окружность, причем плоскость сечения выберем таким образом, чтобы в ней лежал какой-нибудь из лучей, идущих от Солнца. Один из путей, по которому может распространяться свет, входит в окружность, преломляясь при переходе из воздуха в воду, отражается обратно от задней стороны окружности и выходит из нее, вторично преломляясь при пересечении поверхности (рис. 187).

Если на каплю падает узкий пучок параллельных лучей (намного уже ширины капли), то для большинства точек вхождения он превращается на выходе из капли в расходящийся пучок (рис. 188, а).

Поскольку выходящий из капли свет расходится, то если смотреть на нее, она не кажется намного ярче остального неба. Однако на поверхности капли имеется

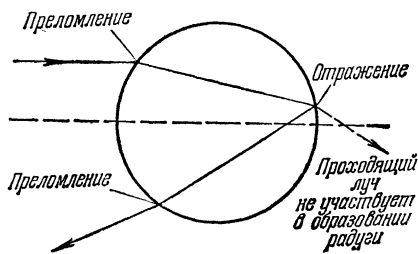


Рис. 187.

кольцо (или две точки на ее поперечном сечении), входя через которое лучи и после выхода из капли также образуют узкий пучок.

Только малая часть световых лучей, входящих в каплю и выходящих из нее, ответственна за образование яркого 42-градусного конуса (рис. 188, б).

Можно проверить, что это действительно так, если выполнить достаточное количество точных чертежей; все, с чем тут приходится иметь дело, — это преломление и отражение, и при достаточной аккуратности и то

и другое можно рассмотреть графически. Поскольку водяная капля представляет не окружность, а сферу, яркие лучи выходят из нее по 42-градусному конусу, как было отмечено выше.

Почему радуга цветная? Напомним, что все предыдущие рассуждения проводились для желтого света. Показатель преломления воды несколько изменяется при изменении окраски света. Если вы снова выполните проведенные выше построения для различных цветов, вы увидите, что, в то время как желтый свет концентрируется вдоль направления, составляющего 42° , красный свет концентрируется под углом 43° , а голубой — под углом 41° (приблизительно), как это показано на рис. 189 (углы между цветами для наглядности преувеличены).

Какой цвет сверху? Поскольку выходящий из капли красный цвет концентрируется под углом 43° ($42,37^\circ$, т. е. в действительности ближе к 42°), а голубой под углом 41° ($40,6^\circ$), из каждой капли выходят 43-градусный конус красного света и 41-градусный голубого, а все другие цвета образуют конусы, лежащие между ними (рис. 190).

Следовательно, мы видим красный свет под углом 43° к линии, идущей прямо от нас (на наружном крае радуги), а голубой — под углом 41° (на внутреннем крае). Капли, посылающие к нам любой из цветов, лежат на части конуса с вершиной в нашем глазу и, таким образом, кажутся лежащими на части окружности. Следовательно, каждая первичная радуга имеет в ширину около 2° .

Каков ход лучей в сферической капле? Геометрия на приведенном выше рис. 190 гораздо проще, чем можно было бы ожидать (рис. 191). Поскольку BA , BC и BD являются радиусами, все они имеют одну и ту же длину. Следовательно, треугольники ACB и CDB — равнобедренные. Ввиду этого угол BAC равен углу ACB . Более того, так как радуга является в то же время и нормалью к окружности, закон отражения требует, чтобы углы ACB и DCB также равнялись друг другу. Следовательно, все четыре острых угла в этих треугольниках равны между собой и равны углу преломления. Поэтому треугольники равны. Из их равенства следует, что хорды AC и CD имеют одинаковую длину — факт, полезный для упрощения точного графического построения. Найдя точку C с помощью закона Снеллиуса, примененного в точке A , точку D можно построить, сделав засечку циркулем с центром в C радиусом AC . Затем можно построить угол выхода луча i , равный углу, под которым входит свет, и измерить угол d . К тому же результату можно

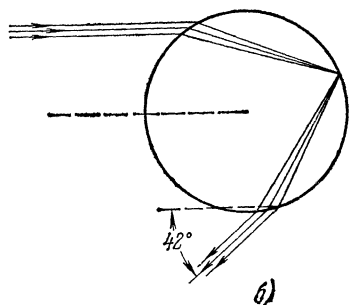
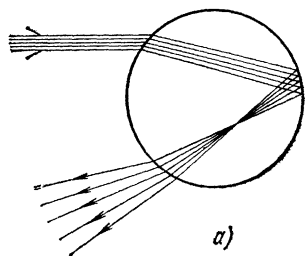


Рис. 188.

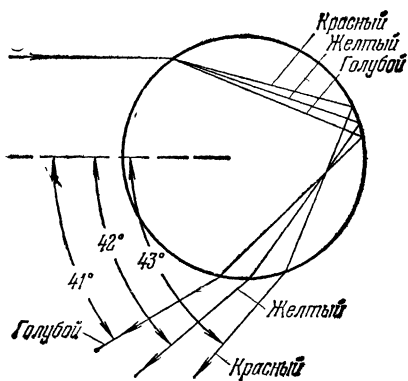


Рис. 189.

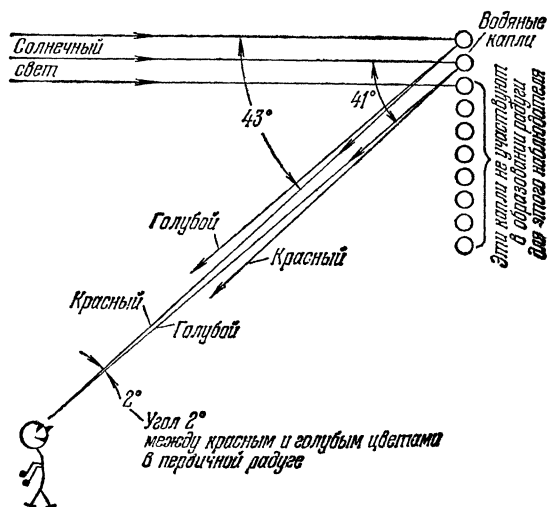


Рис. 190.

прийти, вычисляя угол d с помощью легко доказываемого соотношения

$$d = 2r - 2(i - r) = 4r - 2i.$$

Можно заметить простую закономерность в общей картине выходящих лучей, получающихся из параллельного пучка, падающего на верхнюю половину капли. Луч, идущий вдоль диаметра сферы (для которого расстояние y на рис. 191 равно нулю), проходит через центр и отражается по тому же самому направлению. При увеличении расстояния y точка D движется вдоль окружности против часовой

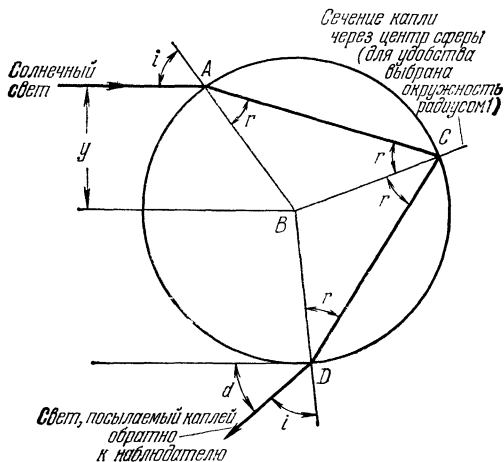


Рис. 191.

стрелки. Сначала угол d возрастает. Однако по мере того как свет входит в окружность все выше и выше, в некоторой точке угол d перестает увеличиваться и начинает убывать. Максимальное значение угла d для желтого света равно приблизительно 42° . В этом можно убедиться с помощью измерений на чертеже или путем вычислений, которые показывают, что d достигает максимума при

$$\cos i = \sqrt{(n^2 - 1)/3}.$$

На рис. 192 показан ход пяти лучей сквозь каплю. Обратите внимание, что лучи 3, 4 и 5 на этом рисунке приводят к совершенно различным значениям угла d . Не все лучи вносят свой вклад в сильно окрашенный свет радуги. В действительности в образовании радуги участвует гораздо более узкий пучок лучей, прилегающих к лучу 4. Напомним, что вся радуга имеет ширину всего лишь 2° , так что каждый цвет концентрируется в угловой области, значительно меньшей 2° . (Если учащиеся занимаются подробным изучением радуги, им следует изобразить на чертеже ход нескольких лучей в водяной капле.) Луч, образующий наибольший угол с горизонтальной линией, называется лучом *наименьшего отклонения*.

В табл. 21 (в обозначениях рис. 193) приведены точные значения углов и расстояний.

Каков ход лучей разного цвета в водяной капле? Именно вдоль луча наименьшего отклонения виден яркий возвращающийся свет. Наброски в предыдущих рассуждениях показывают причину того, что свет концентрируется в области, прилегающей к лучу наименьшего отклонения. При углах, меньших предельного, интенсивность возвратного света быстро падает. (Мы не рассматриваем здесь подробно, насколько быстро происходит это падение.)

Для $n = 4/3$ минимальное отклонение происходит при $y \sin i = 0,8606$, или $i = 59^\circ 23'$. Эти значения относятся к желтому свету. Ход лучей для фиолетового или красного света выглядит так же, как и для желтого. Некоторые основные данные,

которые упрощают построение предельных лучей для красного и фиолетового света, содержатся в табл. 22 (обозначения соответствуют рис. 194).

Ввиду того, что каждый цвет выходит из капли в узком интервале углов, происходит некоторое смешение цветов. Это еще одна тема из тех, которые мы здесь подробно не рассматриваем.

Геометрическое рассмотрение поведения света в дождевой капле проводилось выше для поперечного сечения, проходящего через центр сферы. Любой луч света,

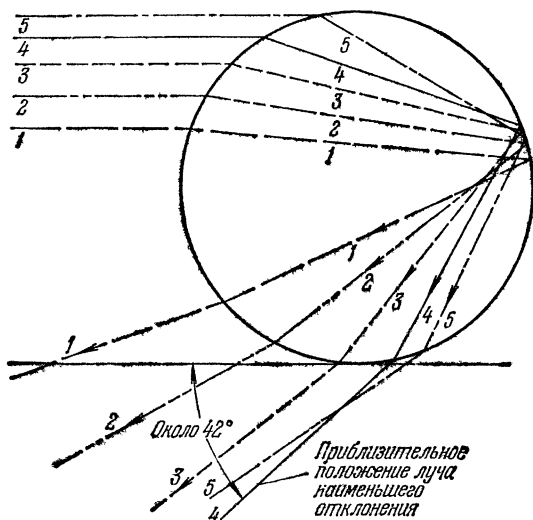


Рис. 192.

падающий на сферу, все время остается в плоскости, определяемой этим лучом и нормалью к сфере в точке падения. Все такие плоскости проходят через центр сферы *), так что проведенное выше рассмотрение остается в силе. Таким образом, мы действительно получаем конус света для каждого цвета с углом при вершине, половина которого равна углу наименьшего отклонения для этого цвета.

ТАБЛИЦА 21

$y \sin i$	i	r	$\sin r$	d	$y \sin i$	i	r	$\sin r$	d
0	0°	0°	0		0,6	36°52'	26°45'	0,45	33°16'
0,1	5°44'	4°18'	0,075	5°44'	0,7	44°26'	31°40'	0,525	37°44'
0,2	11°32'	8°37'	0,15	11°24'	0,8	53°08'	36°52'	0,60	41°12'
0,3	17°27'	13°00'	0,225	17°06'	0,8606	59°23'	40°12'	0,6455	42°02'
0,4	23°35'	17°27'	0,3	22°34'	0,9	64°09'	42°27'	0,675	41°30'
0,5	30°00'	22°01'	0,375	28°04'	1,0	90°	48°35'	0,75	14°20'

Интенсивность света под углом наименьшего отклонения для каждого цвета. Вычисление интенсивности радуги представляет собой крайне сложную задачу.

*) Так как нормаль к сфере совпадает с радиусом. (Прим. перев.)

	Фиолетовый свет	Красный свет
Длина волны λ	3968 Å	6563 Å
Показатель преломления n	1,3435	1,3311
<i>Данные на окружности капли:</i>		
Координаты входа луча наименьшего отклонения	$y = 0,855$ $x = -0,518$	$y = 0,862$ $x = -0,507$
Координаты точки отражения этого луча от задней поверхности	$y = 0,347$ $x = +0,938$	$y = 0,361$ $x = +0,932$
Координаты выхода луча из капли	$y = -0,987$ $x = 0,163$	$y = -0,979$ $x = 0,206$
Угол падения i	58°48'	59°31'
Угол преломления r	39°33'	40°21'
$i - r$	19°15'	19°10'
d	40°36'	42°22'

Если размер капель превышает размеры частиц тумана, то распределение интенсивности зависит не только от угла, но и от показателя преломления, размеров

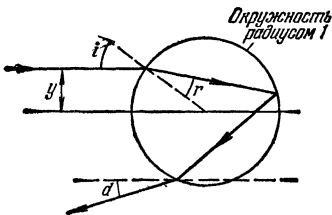


Рис. 193.

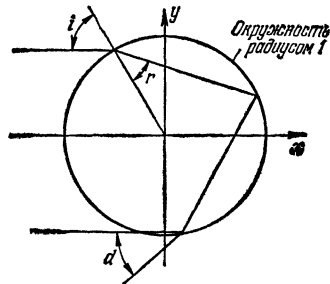


Рис. 194.

капли и длины световой волны. (Интенсивность значительна только в непосредственной близости к углу наименьшего отклонения, так что изменения отражательной способности не играют роли.) Если капли по своим размерам сравнимы с частицами тумана, то приходится проводить сложные вычисления, основанные на электромагнитной теории, выходящие за рамки данного курса.

3. Вывод формулы линзы

В приводимом выводе не используется ничего, кроме закона Снеллиуса, геометрии и радианной меры углов.

Поскольку все лучи, параллельные главной оптической оси линзы пересекают эту ось в одной точке (главный фокус), при выводе этой формулы необходимо рассмотреть только один из этих лучей.

На рис. 195 область прохождения лучей сквозь линзу имеет очень малые размеры, поэтому необходимо увеличить эту область, а также несколько гипертрофировать углы в этой области (рис. 196).

Преломление рассматриваемого луча на обеих поверхностях A и B описывается соответственно законом Снеллиуса в виде

$$a) \sin 1 = n \sin 2, \quad б) \sin 4 = n \sin 3.$$

В случае тонкой линзы все эти углы очень малы, так что вместо синусов можно взять значения соответствующих углов в радианной мере:

$$\text{а) } \angle 1 = n \cdot \angle 2, \quad \text{б) } \angle 4 = n \cdot \angle 3.$$

Следующий шаг состоит в том, чтобы свести эти уравнения к одному соотношению, содержащему только углы 1, 5 и 7. На рис. 196 проведены дополнительные линии, параллельные оси линзы, и получившиеся таким образом одинаковые углы для

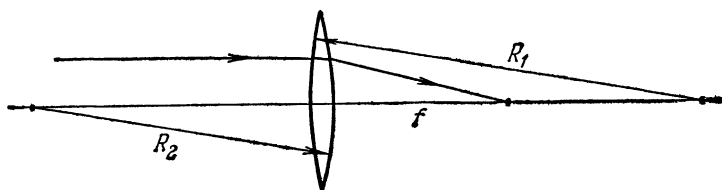


Рис. 195.

простоты обозначены одинаковыми цифрами. Сложение а) и б) дает $\angle 1 + \angle 4 = n(\angle 2 + \angle 3)$, однако поскольку $\angle 4 = \angle 5 + \angle 7$ и $\angle 3 = \angle 5 + \angle 6 = \angle 5 + \angle 1 - \angle 2$, это уравнение после подстановки принимает вид $\angle 1 + \angle 5 + \angle 7 = n(\angle 2 + \angle 5 + \angle 1 - \angle 2)$. Приведя подобные члены и перенося часть из них из левой части в правую, получим $\angle 7 = (n-1)(\angle 5 + \angle 1)$. Из рис. 195 можно видеть, что отрезки, обозначенные на рис. 196 буквами s и s' , настолько близки к соответствующим дугам, что их можно считать равными длинами этих дуг и приблизительно равными

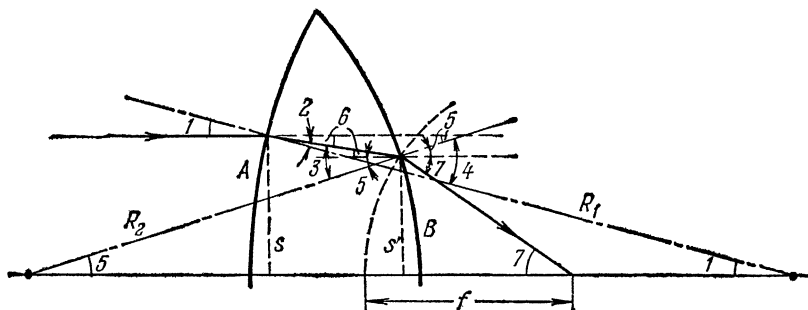


Рис. 196.

между собой. Далее, поскольку в случае тонкой линзы не имеет значения, от какой точки линзы измерять фокусное расстояние f , мы проведем удобную для рассмотрения дугу с центром в фокусе и измеряем f до этой дуги. Таким образом, подставляя значения углов в радианной мере, т. е. отношения соответствующих дуг к радиусам, получаем следующее уравнение:

$$s'/f = (n-1)(s'/R_2 + s/R_1),$$

откуда искомая формула получается почленным делением на любую из равных друг другу величин s или s' :

$$1/f = (n-1)(1/R_2 + 1/R_1).$$

Следует заметить, что в приведенном выводе n обозначает относительный показатель преломления вещества линзы и среды, в которую она помещена. Таким образом, если по разные стороны линзы находятся различные среды, то при выводе

нельзя будет вынести за скобки общее значение n . На рис. 197 приведены схемы построения лучей для различных комбинаций сред ($n_{\text{возд}} = 1,00$, $n_{\text{вод}} = 1,33$, $n_{\text{стек}} = 1,5$).

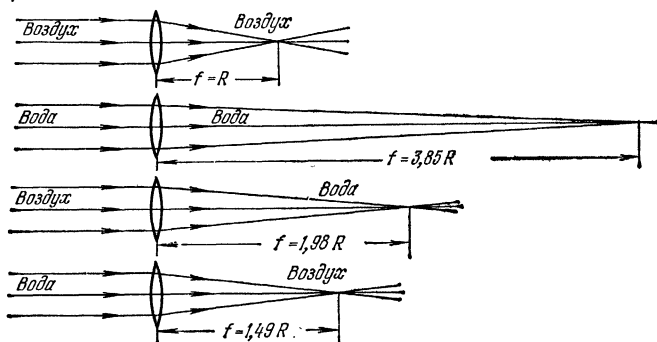


Рис. 197.

4. Принцип Ферма

Принцип Ферма представляет интересный материал для внеклассной беседы с учащимися.

Ниже проводится обсуждение вопроса о времени распространения света из произвольной точки A в другую точку B .

Принцип Ферма в том виде, как он его сформулировал, применим к распространению света в однородной среде или к отражению и преломлению света на отдельной плоской поверхности. Согласно этому принципу, при распространении света между A и B он выбирает такой путь, на котором время перехода будет меньше, чем по любому соседнему пути.

С временем перехода связан и тот факт, следующий из обобщения принципа Ферма, что оно будет одним и тем же для всех световых лучей, идущих сквозь оптическую систему от одной точки объекта к соответствующей точке на изображении.

Принцип Ферма (в его ограниченной форме гласящий, что путь света является минимальным для плоских поверхностей) может быть непосредственно использован для вывода следующих утверждений:

1. В однородной среде свет распространяется по прямой линии.

2. Законов отражения (доказательство дано ниже).

3. Законов преломления (доказательство в этом случае проводится непосредственно, но либо требует вычислений, либо приводит к довольно сложной алгебре и потому здесь не воспроизводится).

Если вы просто упомянете об этом принципе и обо всем, что из него следует, это подольстнет воображение многих учащихся. Одни заинтересуются, откуда взялся этот мощный принцип и не имеет ли он более глубокого, даже философского значения. Другие могут спросить, каким образом Ферма открыл его. Вы можете начать интересную внеклассную беседу по любому из этих вопросов.

Сначала можно рассмотреть вопрос, является ли принцип Ферма более правильным или более фундаментальным, нежели прямолинейное распространение света и законы отражения и преломления. Многие учащиеся оценят элегантную простоту одного правила, которое приводит к трем другим, являющимся лишь эмпирическими закономерностями (несмотря на то, что они объясняют множество явлений). Вы можете продолжить это обсуждение, пока не убедитесь, что учащиеся понимают отличие принципа Ферма от модели; он в большей мере аналогичен законам отражения и преломления.

Предположим, что вы не сможете дать точный рецепт, по которому Ферма открыл этот принцип, в таком случае учащиеся с удовольствием подумают о том, какого рода вопросы должны были служить для него мотивом. Вопрос о том, чем выделяется один особый путь, является типичным представителем плодотворного класса научных вопросов. Один из способов проникнуть в причину того, почему

что-либо происходит, состоит в том, чтобы подумать, почему не происходит что-нибудь другое. Заметьте, что в случае Ферма он вряд ли продвинулся бы вперед, спрашивая себя, почему свет выходит в данном направлении или почему угол отражения равен углу падения. Вместо этого он задал себе довольно косвенный вопрос: если свет собирается пройти из A в B (возможно, сначала коснувшись зеркала), то почему он вообще выбирает один особый путь? Принцип Ферма не способствует решению вопроса, приходит ли свет из A в любую произвольную точку B ; он просто утверждает, что если свет совершает этот переход, он выбирает некоторый путь среди всех возможных.

Проверить принцип Ферма графически или аналитически нелегко, если только не быть крайне точным и аккуратным. Вместо того чтобы обсуждать числовые примеры, можно попробовать рассмотреть два других приложения.

1. Рассмотрите качественно путь преломленного луча, идущего из точки A , находящейся в воздухе, в точку B , лежащую в среде с большим показателем преломления (относительно низкой скоростью). Удостоверьтесь, что учащиеся качественно убедились в том, что для скорейшего прохождения свет должен выбрать путь, на котором он будет дольше находиться вне среды, чем если бы он двигался по прямой линии. Заметим, что это обсуждение позволит учащимся сделать вывод, отклоняется ли свет при преломлении от нормали или изгибается по направлению к ней?

2. Рассмотрите кинематическую задачу следующего вида: «Какой путь должен избрать мальчик, если он хочет попасть из точки A в точку B , причем A лежит в области, где он может двигаться вдвое быстрее, нежели в области нахождения точки B ». Например, точка A может лежать на земле, а B — на воде (рис. 198). Человек может двигаться по земле со скоростью 6 км/ч, а в воде — 3 км/ч. Простейший способ решения состоит в том, чтобы подумать о свете, использовать «показатель преломления», равный отношению скоростей, и попробовать найти путь с помощью закона Снеллиуса. Быстрейший путь лежит где-то между показанными штриховыми линиями на рисунке. Используйте закон Снеллиуса с показателем преломления $4/2=2$, чтобы найти точку на берегу реки, для которой

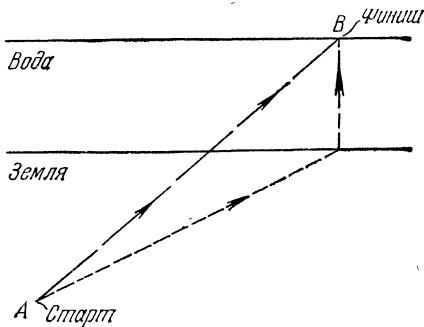


Рис. 198.

$$\frac{\sin(\text{угла между направлением движения по земле и нормалью})}{\sin(\text{угла между направлением движения в воде и нормалью})} = 2.$$

Рассматривая время прохождения света сквозь оптическую систему, видимому, следует остановиться подробнее на следующем. Если оптическая система фокусирует свет от одной точки объекта в одну точку на изображении (т. е. если оптическая система свободна от aberrаций и дисторсий), то свет, идущий от точки объекта в соответствующую точку изображения, затрачивает в точности одно и то же время, независимо от того, по какому из множества возможных путей он распространяется, даже если длины этих путей, «измеренные линейкой» значительно различаются между собой. Отметим, что вы можете использовать этот интересный факт для предсказания того, каким образом будет преломляться свет, проходя сквозь линзу. Поскольку свет движется в стекле медленнее, луч, проходящий сквозь более толстую часть линзы, тратит там много времени; за это избыточное время, которое он проводит в стекле, свет, проходящий сквозь более тонкую часть линзы, проходит большее расстояние в воздухе. Чтобы сделать эти два времени равными, луч, проводящий больше времени в воздухе, должен преломиться по направлению к лучу, проходящему сквозь большую толщу стекла.

Принцип Ферма приводит к законам отражения. Первый закон отражения, согласно которому лучи падающий, отраженный и нормаль лежат в одной плоскости, является простым результатом принципа Ферма в евклидовом пространстве.

Второй закон отражения, согласно которому угол отражения равен углу падения, можно доказать с помощью геометрии. Поскольку свет при отражении остается в той же самой среде, показатель преломления, а следовательно, и скорость света можно считать постоянными на всем пути от A до B . Это значит, что путь, на котором свет тратит наименьшее время, просто совпадает с тем, для которого расстояние между A и B будет наименьшим. Кратчайшее расстояние от A до B имеет прямая, соединяющая эти точки, однако под минимума мы понимаем в этом случае минимальный путь между A и B , который касается (отражается от) зеркала. Именно это свойство мы должны доказать для пути, образующего равные углы с зеркалом.

Поскольку кратчайшее расстояние между двумя точками определяется по прямой линии между ними, мы должны ожидать, что путь света от точки A до отражающей поверхности, так же как и путь от отражающей поверхности к точке B , будет прямолинейным (рис. 199).

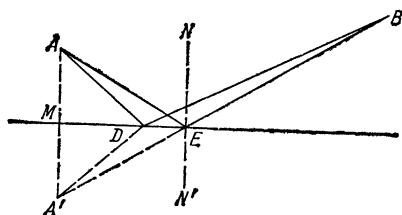


Рис. 199.

$= A'D + DB$. Положение точки D , при котором расстояние $A'DB$, а следовательно, и расстояния ADB будут наименьшими, совпадает с точкой E , лежащей на прямой, соединяющей A' и B . Из такого же равенства треугольников, как и прежде, мы имеем $\angle AEM = \angle MEA'$, и поэтому, если NN' — нормаль к поверхности в точке E , $\angle AEN = \angle A'EN'$. Однако углы $A'EN'$ и NEB равны как вертикальные; следовательно, $\angle AEN = \angle NEB$. Это и есть второй закон отражения: падающий и преломленный лучи образуют равные углы с нормалью к поверхности в точке падения.

Попытка доказать, что любой близлежащий путь длиннее «равноугольного» пути, с помощью прямого

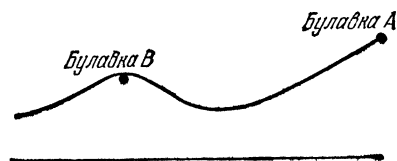


Рис. 200.

Мы находим точку, где отраженный луч падает на поверхность, с помощью вспомогательной точки A' , которую строим таким образом, чтобы линия, представляющая поверхность, совпала с перпендикуляром к середине отрезка AA' . Тогда для любой точки D на линии, представляющей поверхность, $AD = A'D$, что легко показать из равенства соответствующих треугольников. Однако расстояние, которое проходит свет, равно как раз $AD + DB =$

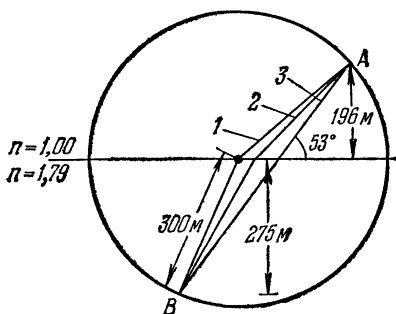


Рис. 201.

сравнения их длин, т. е. путем выражения их разности как функции расстояния между точками, где они касаются отражающей поверхности, закончилась бы неудачей. При этом пришлось бы трижды возводить в квадрат неравенство.

Непосредственное использование математического анализа для нахождения минимального пути приводит к «равноугольному» пути, а также к прямолинейному пути между A и B .

Простую физическую демонстрацию того, что если отраженный луч проходит кратчайший из всех возможных путей, то $\angle i = \angle r$, можно провести с помощью двух булавок и нити (рис. 200).

Привяжем нитку к одной из булавок. Свободный конец ее обернем вокруг второй булавки. Будем натягивать нить с помощью карандаша по направлению

к линии, представляющей поверхность, позволяя свободному концу нити проскальзывать вокруг булавки *В*. Постараемся сравнить с булавки как можно меньше нити, так, чтобы карандаш смог коснуться линии в какой-нибудь точке. Отметим точку, где происходит это касание, построим в ней перпендикуляр и измерим углы падения и отражения. Рис. 201 иллюстрирует применение принципа Ферма для изучения преломления и показывает, какая высокая точность необходима для установления того, что время минимально.

При тех положениях точек *А* и *В*, которые показаны на рис. 201, путь 1 соответствует закону Снеллиуса. Он составляет с нормалью угол $49,2^\circ$. Путь 2 проходит вблизи действительного пути света 1, определяемого законом Снеллиуса, но составляет с нормалью угол 45° в воздухе и угол 30° в плотной среде. Время, которое затрачивает свет на прохождение из *А* в *В* по истинному пути 1, равно

$$\frac{300 \text{ м}}{c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} + \frac{300 \text{ м}}{c/n = 1,68 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = (10^{-6} + 1,79 \cdot 10^{-6}) \text{ с} = 2,79 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Время, которое он затратил бы на прохождение из *А* в *В* вдоль пути 2, было бы почти таким же:

$$\frac{(275/\sin 60^\circ) \text{ м}}{c/n = 1,68 \cdot 10^8 \text{ м/с}} + \frac{(196/\sin 45^\circ) \text{ м}}{c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 1,89 \cdot 10^{-6} + 0,92 \cdot 10^{-6} = 2,81 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Даже для пути 3 — прямой линии между *А* и *В* — время перехода не очень отличалось бы от истинного:

$$t = \frac{(275/\sin 53^\circ) \text{ м}}{c/n = 1,68 \cdot 10^8 \text{ м/с}} + \frac{(196/\sin 53^\circ) \text{ м}}{c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = (2,05 \cdot 10^{-6} + 0,82 \cdot 10^{-6}) \text{ с} = 2,87 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

5. Устройство подвеса из спиральной пружины

Наиболее удовлетворительной пружиной для этих целей является спиральная пружина тройной длины «Слинки» (входит в лабораторный комплект КСИФ). Приблизительно каждый пятый-шестой виток должен поддерживаться нитью. Сделайте разбивку, отметив, скажем, каждый пятый виток, и прикрепите в соответствующих местах нити. Чтобы создавать волны большой амплитуды, которые

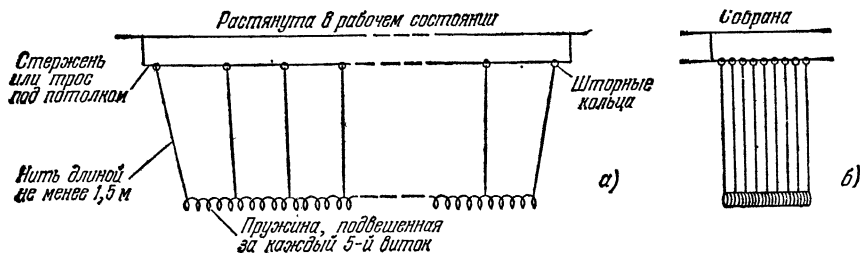


Рис. 202.

были бы хорошо видны всему классу, поддерживающие нити должны быть не менее 1,5 м длиной. При пользовании пружиной ее следует растянуть приблизительно до 6 м в длину (рис. 202, а). В большинстве случаев желательно иметь возможность собирать ее в компактном виде, для чего следует привязать отдельные нити подвеса к шторным кольцам, которые могли бы скользить по стержню или туго натянутому тросу под потолком (рис. 202, б).

Для удобства наблюдения спиральная пружина должна находиться на уровне пояса. Она может быть расположена несколько выше, если необходимо обеспечить подход к столам или скамьям. Если для скольжения колец вы пользуетесь тросом, висящим над головой, он должен быть довольно тяжелым и туго натянутым. Натянутая бельевая веревка едва ли может быть использована даже в крайнем случае. Это связано с тем, что волны в спиральной пружине вызывают волны в поддерживающем тросе, которые в свою очередь влияют на волны в спиральной

пружины. Если закрепить поддерживающий трос в нескольких точках, то бельевая веревка подойдет, однако тогда нельзя будет компактно собирать спиральную пружину в нерабочем состоянии, так как крепление не позволит сдвинуть скользящие кольца. Другое предостережение: коль скоро вы растянули спиральную пружину до 6 м или около того, не допускайте, чтобы ее витки сцепились между собой. Они могут так переплестись и перекрутиться, что единственным выходом будет хирургическое вмешательство.

Чтобы удерживать пружину растянутой до 6 м, к ней необходимо приложить некоторую горизонтальную силу. На рис. 202, а концевые нити направлены диагонально. Такие наклонные подвески не в состоянии поддерживать спиральную пружину в растянутом состоянии. Ее концы надо удерживать. В случае неподвижного конца это нетрудно. Используйте стол или стопку керамических блоков,

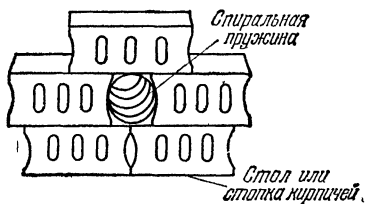


Рис. 203.

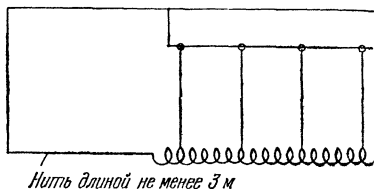


Рис. 204.

чтобы прочно закрепить этот конец, «зажав» его между ними (рис. 203). Керамические блоки, начинающиеся либо от пола, либо от стола, особенно удобны ввиду того, что они позволяют прочно захватить конец спиральной пружины, не повреждая ее.

Человек, возбуждающий импульсы, становится на другом конце. Встряхиванием импульс посылается по пружине; он распространяется вдоль нее, доходит до закрепленного конца и отражается обратно (возвращаясь перевернутым). Если вы хотите, чтобы импульс отразился снова от ваших рук, вы должны держать конец пружины как можно тверже (укрепив локти на столе и т. д.). Однако вам все равно не удастся удержать пружину столь хорошо, как это делала бы другая стопка кирпичей. Тем не менее, держа руками один из концов, вы все же сможете проследить, как одиночный импульс распространяется туда и обратно от шести до десяти раз. Чтобы наблюдать эти волны, учащиеся должны сгруппироваться около концов пружины. Учащийся, находящийся у середины пружины, не сможет наблюдать волну столь же успешно, как находящийся у края.

Реализовать свободный конец труднее, чем закрепленный, если у вас нет довольно длинной комнаты. В идеале свободный конец можно реализовать, удерживая его с помощью длинной нити не менее половины длины растянутой пружины (рис. 204).

Если у вас нет достаточно длинной комнаты для растянутой пружины и ее открытого конца, вам придется пойти на компромисс, экспериментировав с укороченной пружиной, чтобы увеличить длину нити у ее открытого конца.

Поскольку естественное затухание в подвешенной пружине очень мало, одна из первых проблем, с которой вы встретитесь, состоит в том, как заставить «возмущенную» пружину быстро вернуться к состоянию покоя. Большинство попыток заставить ее успокоиться «голыми руками» приводит лишь к увеличению ее общего возбуждения. (Если вы научитесь «ловить» волну у одного из концов, вы сможете довольно быстро погасить ее амплитуду.) Что вам необходимо — так это найти способ удалять энергию из пружины. Попробуйте свободно держать большой кусок картона или аналогичного материала у середины пружины. Каждый раз, как волна проходит мимо картона, пружина будет скрести по нему туда и обратно. При этом движение быстро замирает. Если картон удерживается около пружины настолько плотно, что она не может двигаться, движение не будет быстро замирать. Экспериментируя с различными материалами и различными прижимающими усилиями, вы найдете в конце концов метод быстрого поглощения энергии.

6. Динамика волн

При обсуждении в классе гл. 15 надо всемерно избегать вопроса о том, почему волны движутся именно так, а не иначе. На этой стадии учащиеся еще не обладают необходимой подготовкой по механике, чтобы разбирать с ними хотя бы простейшие случаи. Однако приводимые рассуждения могут оказаться полезными для преподавателя, обеспечивая его основной информацией по этим вопросам.

Распространяясь по шнуру направо, волна, показанная на рис. 205, а, проходит точку P .

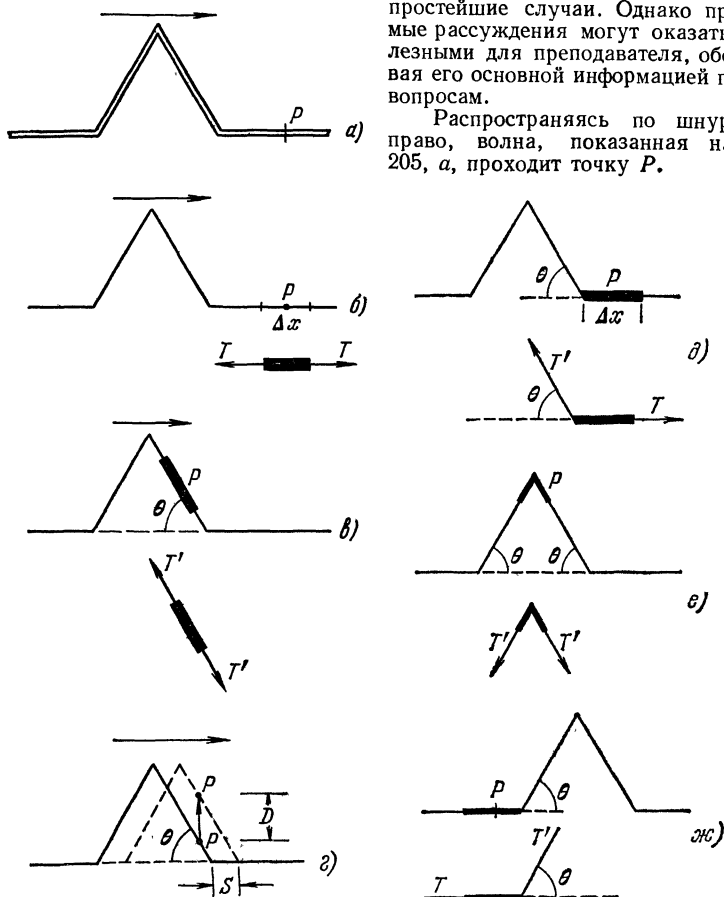


Рис. 205.

Участок шнура в точке P сначала поднимается, а затем опускается. Вернувшись в первоначальное положение, он мгновенно останавливается. Почему он не совершает перелет и не опускается ниже своего первоначального положения?

На этот вопрос можно дать два ответа. Один состоит в том, что ни одна из точек реального шнура или трубки, передающих волну, не останавливается мгновенно. Все реальные волны имеют закругленные углы. Частицы трубки лишь постепенно ускоряются и возвращаются к состоянию покоя. Это только отчасти удовлетворительный ответ, так как чем более гибкий шнур или трубка используются, тем более острыми могут быть «углы» у волны. Однако можно избежать разговора в классе на эту тему, используя в качестве примера гладкие волны без острых углов.

Второй ответ мы находим, рассматривая механику волны, по мере того как она проходит некоторую точку P . Рассмотрим на рис. 205, б малый участок шнура

длиной Δx , лежащий около точки P . Предположим, что натяжение шнура равно T ньютон. Это значит, что шнур растягивается в точке P силами T , действующими и налево, и направо, как показано на вставке к рис. 205, б. Результирующая сила, действующая на участок шнура в точке P , равна нулю. Согласно принципу инерции Галилея этот участок шнура должен оставаться в покое или двигаться с постоянной скоростью. Поскольку волна еще не пришла в точку P , мы знаем, что он постоит.

Рассмотрим затем более поздний момент времени, показанный на рис. 205, в, когда импульс уже пришел в рассматриваемую точку. Здесь уже шнур растянут несколько сильнее в точке P , чем на рис. 205, б, и следовательно, его натяжение равно T' . Оставим на время вопрос о связи T' с T (натяжением в невозмущенной части шнура). Мы снова видим на вставке, что на участке шнура в точке P в одну сторону действует такая же сила, как и в противоположную, так что точка P снова должна быть в покое или двигаться равномерно.

Обращаясь к рис. 205, г, мы видим волну, изображенную в один момент времени сплошной линией, а в более поздний момент — штриховой. За это время t волна прошла расстояние S , а точка P поднялась на расстояние D . Скорость волны равна, таким образом, $v=S/t$, а точка P движется вверх со скоростью $D/t=V$. Разделив эти два соотношения одно на другое, легко получить $V=vD/S$ или, поскольку $D/S=\operatorname{tg} \theta$, $V=v \operatorname{tg} \theta$. Более того, мы можем убедиться, что все точки на переднем склоне волны движутся с той же самой скоростью V . Аналогично, если волновой импульс симметричен, все точки на заднем его склоне движутся вниз со скоростью V . Таким образом, точка P на рис. 205, в движется вверх с постоянной скоростью V , как это и должно быть ввиду равенства нулю результирующей силы, действующей на нее.

На рис. 205, б точка P была в покое. Через некоторое время на рис. 205, в она уже двигалась вверх со скоростью V . Очевидно, в некоторый промежуточный момент она испытывала ускорение. Это ускорение происходило при прохождении через точку P угла волны. На рис. 205, д волна только что пришла на участок шнура в точке P . Вставка показывает, что на этот участок действует направо сила натяжения T . Однако теперь шнур слева не просто «уравновешивает» эту силу. Если мы имеем дело с идеализированной волной, в которой точка P движется только вверх и вниз (это идеализация, потому что в случае реального шнура обычно происходит некоторое продольное движение тоже), то $T' \cos \theta = T$, так как в горизонтальном направлении сумма сил должна равняться нулю. Вертикальная компонента этой силы равна $T' \sin \theta$, что в то же время равно $T \operatorname{tg} \theta$. Эта вертикальная компонента и дергает шнур вверх, переводя точку P из состояния покоя в состояние движения, когда волна проходит мимо.

Разумеется, если мы рассматриваем достаточно малый участок шнура, эта сила действует недолго. Она действует лишь в течение времени, за которое волна перемещается на расстояние Δx .

Когда сила действует на какое-нибудь тело в течение короткого интервала времени, то удобным способом решения проблем является метод импульсов (см. часть III курса). Изменение количества движения тела равно произведению силы, действующей на тело, на время ее действия. Шнур в точке P начинает двигаться из состояния покоя, и под действием силы $T \operatorname{tg} \theta$ приобретает конечную скорость $V=v \operatorname{tg} \theta$. Его начальное количество движения равно нулю, а конечное — произведению массы на скорость V . Хотя масса шнура в точке P равна нулю, масса его участка длиной Δx составляет $\mu \Delta x$, где μ — масса шнура на единицу его длины *). (Если весь однородный шнур имеет массу M и длину L , то $\mu=M/L$.) Таким образом, изменение количества движения равно

$$(\text{масса}) \cdot V = \mu \Delta x \cdot v \operatorname{tg} \theta.$$

Импульс, действующий на этот участок шнура, равен силе $T' \sin \theta = T \operatorname{tg} \theta$, умноженной на время $\Delta x/v$, так как именно это время требуется углу волны, чтобы пройти участок шнура длиной Δx . Окончательно имеем

$$T \operatorname{tg} \theta \cdot \Delta x/v = \mu \Delta x \cdot v \operatorname{tg} \theta.$$

*) Линейная плотность. (Прим. перев.)

Производя сокращение, получим $T/v = \mu v$. Заметим, что Δx сокращается, так что неважно, какой длины малый участок мы рассматриваем. Поскольку наш выбор Δx был произвольным, так и должно было случиться. Переписывая последнее уравнение, мы находим $v^2 = T/\mu$, откуда $v = \sqrt{T/\mu}$. Эта формула показывает, что скорость волны увеличивается при увеличении натяжения и уменьшается при увеличении массы на единицу длины. Тот факт, что угол θ не вошел в окончательное выражение, очень важен, так как в противном случае волны различной формы распространялись бы с различными скоростями, а волны сложной формы, включающие много значений θ , не сохраняли бы свою форму при распространении вдоль шнура.

Раз мы разобрали количественно силы, действующие на переднем изломе волны, мы легко можем увидеть, что происходит в других точках. На рис. 205, *е* изображен момент, когда точка P находится на вершине волны. Вставка показывает действующие при этом силы. Горизонтальные компоненты снова уравновешивают друг друга. Теперь, однако, действуют две вертикальные компоненты $T'\sin\theta$. Импульс, сообщаемый участку шнура в точке P , как раз вдвое больше, чем на переднем крае волны. Поэтому участок шнура P не только останавливается, но и поворачивает обратно, приобретая в конце концов скорость V , направленную вниз.

Затем, как показано на рис. 205, *ж*, точка P переходит в задний угол, где сила $T'\sin\theta$ действует на нее в таком направлении, чтобы остановить этот участок шнура. Сообщаемый при этом импульс имеет как раз нужное значение, чтобы намертво затормозить этот участок шнура, не допуская перелета.

Мы рассмотрели механику прохождения самого простого типа волн. Результирующие силы действовали на частицы шнура только в местах изломов. Следовательно, поскольку они действуют на малые участки шнура, они создают огромные ускорения. Эти ускорения продолжаются только в течение очень коротких интервалов времени и происходят таким образом, что вызывают гладкое волновое движение. Волновой импульс, в общем случае искривлен гладко. Силы, действующие на участки шнура, имеют наибольшее значение в тех местах, где наибольшей величины достигает кривизна шнура. Полное рассмотрение волнового движения вдоль шнура включает решение дифференциального уравнения в частных производных, и мы не будем его здесь рассматривать.

7. Скорость водяных волн

Содержащийся здесь материал не предназначен для расширения классных или лабораторных бесед. В наши намерения входило лишь помочь учителю в ответах на вопросы и в планировании лабораторных занятий.

Для любой отдельной жидкости скорость поверхностных волн сложным образом зависит от их частоты и от глубины сосуда.

Скорость поверхностных волн может быть вычислена просто, только если:

1) вязкость жидкости (а следовательно, и потери энергии) пренебрежимо мала;

2) волны создаются без завихрений (движения в жидкости должны быть «простыми и гладкими»);

3) амплитуда волн A гораздо меньше как длины волны, так и глубины сосуда.

Если любой из этих факторов — вязкость, турбулентность или амплитуда волн — начинает играть заметную роль, найти скорость теоретически становится крайне затруднительно.

К счастью, все эти эффекты обычно пренебрежимо малы в волновых кюветах, и аналитические формулы в этом случае весьма близки к экспериментальным результатам. Главная причина расхождений между экспериментальными наблюдениями и теоретическими предсказаниями заключается обычно в амплитуде волн, которая не является пренебрежимо малой по сравнению с их длиной. Если амплитуда составляет всего лишь 7% от длины волны, скорость увеличивается на 10% по сравнению со скоростью, полученной в приближении «малых амплитуд». Хотя такие амплитуды используются в большинстве опытов с волновой кюветой, это не мешает учащимся наблюдать различные волновые явления. Сравнительно большими амплитудами могут объясняться различия, наблюдаемые при использовании

различных возбудителей волн. Они же наверняка приводят к разнице между результатами точных экспериментальных измерений и данными, приводимыми ниже.

Все последующие формулы выведены для волн пренебрежимо малой амплитуды.

Если слой воды достаточно глубокий (глубина $\lambda/2$ приводит к ошибке, не превышающей 1%), скорость волн v зависит от суммы двух членов следующего вида:

$$v^2 = (gv/2\pi f + 2\pi f T/\rho r),$$

где g — ускорение силы тяжести, f — частота волн, T — поверхностное натяжение и ρ — плотность. Если мы хотим получить v в см/с, то для воды нужно использовать следующие значения входящих сюда констант:

$$g = 980 \text{ см/с}^2, \quad \rho = 1 \text{ г/см}^3 \quad \text{и} \quad T = 72,8 \text{ дн/см (или } 72,8 \text{ эрг/см}^2\text{)}.$$

С помощью этих значений мы получаем следующее выражение для скорости волн на поверхности воды:

$$v^2 = (156 \ v/f + 457 f/v).$$

Из этого выражения можно найти, что v имеет минимальное значение, равное 23,4 см/с при $f = 13,5$ колебаний в секунду. При гораздо меньших значениях f $v = 156/f$ см/с.

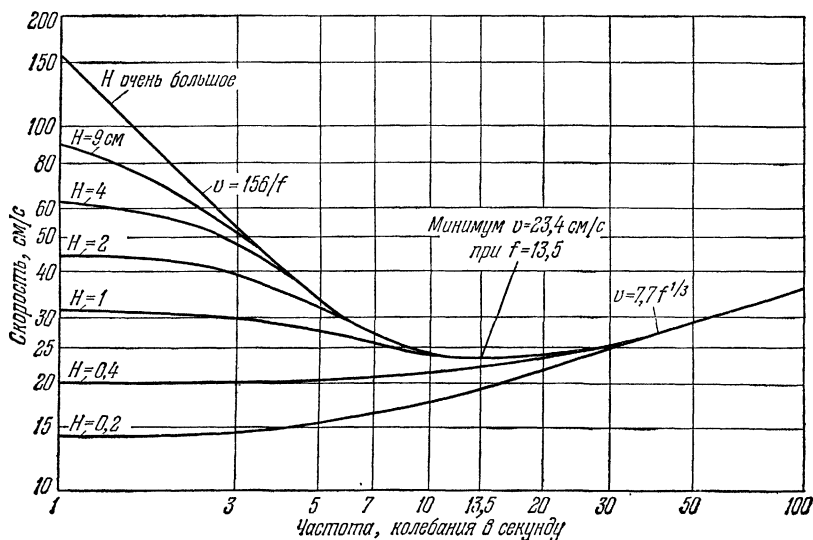


Рис. 206.

Однако в этом случае λ велика и может стать больше глубины сосуда. В предельном случае, когда λ становится гораздо больше глубины H , скорость зависит только от H :

$$v^2 = gH.$$

Приведенный на рис. 206 график показывает, что при некоторой глубине H между 0,4 и 1 см скорость волн будет практически постоянной и равной приблизительно 23,4 см/с, хотя частота f изменяется от одного до 10 колебаний в секунду. С другой стороны, эта независимость v от f (т. е. отсутствие дисперсии) приводит к повышенной чувствительности v от H , так что для обеспечения постоянства v H должна быть совершенно постоянна.

Для частот, значительно превышающих 13,5 колебаний в секунду, скорость дается выражением $v^2 = 457 f$ или $v = 7,7 f^{1/3}$.

Хотя эти приближенные формулы полезны для качественного представления о поведении водяных волн при различных крайних частотах, они не годятся для предсказания подробностей явлений, происходящих в волновых кюветах, так как обычно используются промежуточные частоты и относительно мелкие сосуды. Полная формула, включающая влияние глубины водяного слоя, имеет вид

$$v^2 = \left(\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi T}{\lambda\rho} \right) \operatorname{th} \left(\frac{2\pi H}{\lambda} \right), \quad \text{или} \quad v^2 = \left(\frac{gv}{2\pi f} + \frac{2\pi f T}{v\rho} \right) \operatorname{th} \left(\frac{2\pi f H}{v} \right),$$

где th обозначает гиперболический тангенс:

$$\operatorname{th}(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}.$$

При x больших $\operatorname{th}(x)$ стремится к 1, при x малых $\operatorname{th} x$ стремится к x . Для воды

$$v^2 = \left(156\lambda + \frac{457}{\lambda} \right) \operatorname{th} \left(\frac{2\pi H}{\lambda} \right),$$

где расстояния λ и H выражены в см, и скорость получается в см/с.

На графике, представленном на рис. 206, приведены кривые, показывающие зависимость скорости волн на поверхности воды (в см/с) от частоты (в колебаниях в секунду). Каждая кривая относится к определенному значению глубины воды H .

При планировании опытов с волновой кюветой особенно интересны следующие черты поведения волн, отраженные в формулах и на графике.

1. Чтобы свести к минимуму дисперсию (т. е. зависимость скорости от частоты), глубина воды должна быть малой. Вы можете выбрать значение, соответствующее тому интервалу частот, который вы собираетесь использовать. Например, если вас интересуют частоты от 2 до 10 колебаний в секунду, особенно хорошо взять H равной 0.5 или 0.6 см. Если же вам желательно использовать частоты от 7 до 20 колебаний в секунду, то лучше взять значение $H = 0.9$ см.

2. Чтобы успешно продемонстрировать преломление, скорость должна сильно зависеть от глубины. Для этих целей низкочастотные волны обнаруживают гораздо больший эффект, чем высокочастотные.

Обычно наилучшие результаты по преломлению получаются в тех случаях, когда более мелкая часть кюветы содержит настолько тонкий слой воды, насколько это вообще возможно. Напомним, что когда вы пытаетесь создать большую, крайне мелкую область, вам бывает очень трудно обеспечить постоянство глубины в столь мелкой воде. Если же глубина неоднородна по сосуду, то вы получите странный «береговой» эффект (см. рис. 16.24).

3. Для других приложений оптимальная глубина воды в волновой кювете очень сложным образом зависит от подробностей формы волн. Если бы волны были чисто синусоидальными, они содержали бы только одну частоту, и дисперсия была бы несущественна. Однако периодические волны почти всегда содержат высшие гармоники, а отдельные импульсы всегда содержат широкий спектр частот. Влияние дисперсии на получаемую картину зависит от пропорции, в которой присутствуют различные частоты, и от способности таких волн фокусировать свет на экране. Единственный практический способ сделать какой-нибудь выбор состоит в экспериментировании. Если картина волн нечеткая, можно подобрать амплитуду волн, положение экрана, детали возбuditеля волн или глубину воды.

4. Для относительно низких частот поверхностное натяжение будет не очень существенно. Однако для высоких частот, с помощью очень малой добавки мыла, можно во много раз уменьшить поверхностное натяжение, таким образом уменьшая и скорость.

8. Вывод формулы линзы с помощью волновой теории

Когда свет от источника фокусируется линзой, различные участки одного и того же волнового гребня должны сходиться в фокальной точке в один и тот же момент времени. Именно таким образом там собирается свет. В противном случае, как мы знаем на основе изучения интерференции, суперпозиция гребней и впадин, приходящих одновременно, приводит к их ослаблению. Предположим, что на

схеме, приведенной на рис. 207, источник света находится очень далеко слева. Тогда гребень волны, прибывший от источника, будет занимать в некоторый момент положение, показанное на рисунке сплошной линией. По мере того как волна перемещается вправо, различные участки гребня проходят различные пути, и в конце концов те участки гребня, которые прошли сквозь линзу, собираются в фокальной точке справа. Поскольку эти участки приходят в фокальную точку в один и тот же момент, они должны затратить одно и то же время на переход от прямой линии до фокальной точки.

Чтобы найти связь между формой линзы и фокусным расстоянием f , мы рассмотрим два пути. Можно проследить движение волнового гребня по любому пути сквозь линзу, однако для определения искомого соотношения достаточно двух из них. Выбранные нами пути указаны на рис. 207 штриховыми линиями. Один проходит через центр линзы, а другой через ее внешний край. Как видно из рис. 207,

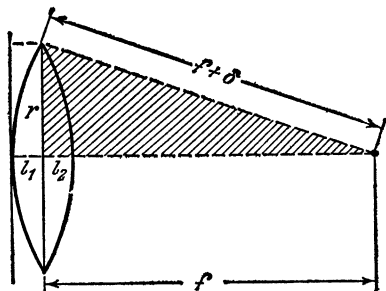


Рис. 207.

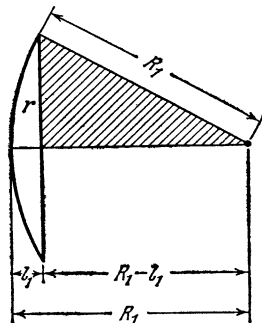


Рис. 208.

участок гребня, проходящий через внешний край линзы, весь свой путь проходит в воздухе. Расстояние, которое он проходит, равно $l_1 + f + \delta$; таким образом, время, которое он тратит на достижение фокальной точки, равно

$$(l_1 + f + \delta)/v_{\text{возд}},$$

где $v_{\text{возд}}$ — скорость волны в воздухе. С другой стороны, участок гребня, движущийся через центр линзы, проходит расстояние $l_1 + l_2$ в стекле, а затем достигает фокуса, пройдя расстояние $f - l_2$ в воздухе. Время, в течение которого он движется в стекле, равно

$$(l_1 + l_2)/v_{\text{стек}},$$

где $v_{\text{стек}}$ — скорость волны в стекле; а время, которое он затрачивает на прохождение оставшегося расстояния, составляет

$$(f - l_2)/v_{\text{возд}}.$$

Сумма этих двух времен (времени движения в стекле и в воздухе) должна равняться времени, затрачиваемому на пути, проходящем через край линзы, т. е.

$$\frac{l_1 + f + \delta}{v_{\text{возд}}} = \frac{l_1 + l_2}{v_{\text{стек}}} + \frac{f - l_2}{v_{\text{возд}}}.$$

Умножая обе части этого равенства на $v_{\text{возд}}$ и приводя подобные члены, получаем

$$\delta = (v_{\text{возд}}/v_{\text{стек}} - 1)(l_1 + l_2). \quad (1)$$

Поскольку $f + \delta$ есть расстояние от края линзы до фокальной точки, δ представляет превышение этого расстояния над фокусным расстоянием. Таким образом, последнее соотношение связывает это превышение расстояния с толщиной линзы $l_1 + l_2$.

Фокусное расстояние линзы само может быть определено с помощью радиуса линзы r и превышения расстояния δ (рис. 208). Радиус линзы r и фокусное расстояние f образуют катеты прямоугольного треугольника с гипотенузой $f + \delta$. Этот

треугольник заштрихован на рисунке. Теорема Пифагора позволяет нам найти связь между δ , радиусом линзы и ее фокусным расстоянием. Так как квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов, мы имеем

$$(f + \delta)^2 = f^2 + r^2.$$

Левая часть этого равенства может быть записана в виде

$$f^2 + 2f\delta + \delta^2.$$

Сокращая f^2 с обеих сторон равенства, получаем

$$\delta(2f + \delta) = r^2.$$

Пока радиус линзы мал в сравнении с ее фокусным расстоянием, δ также будет мала по сравнению с f . Таким образом, ею можно пренебречь в скобках, стоящих в левой части последнего равенства. На этом пути мы получаем хорошее приближенное значение для δ . Оно равно

$$\delta = r^2 / 2f. \quad (2)$$

Мы можем также связать толщину линзы в центре l_1 и l_2 с ее радиусом r и с радиусами R_1 и R_2 поверхностей, образующих линзу. l_1 определяется радиусом левой поверхности, а l_2 — правой. Искомая связь получается почти тем же самым путем, каким мы вывели соотношение между δ и фокусным расстоянием f . Рис. 208 показывает, каким образом можно связать l_1 и R_1 . Из него видно, что R_1 является гипотенузой прямоугольного треугольника, один из катетов которого совпадает с радиусом линзы r , а другой равен $R_1 - l_1$. Применение теоремы Пифагора дает

$$R_1^2 - (R_1 - l_1)^2 = r^2.$$

Подставляя вместо $(R_1 - l_1)^2$ его выражение

$$R_1^2 - 2R_1l_1 + l_1^2,$$

получаем в результате

$$l_1(2R_1 - l_1) = r^2.$$

Пока l_1 мало в сравнении с R_1 (так как мы имеем тонкую линзу), мы можем пренебречь l_1 по сравнению с $2R_1$ в скобках в левой части последнего равенства. Поэтому мы получаем следующее хорошее приближенное значение для l_1 :

$$l_1 = r^2 / 2R_1. \quad (3)$$

Точно такие же рассуждения дают

$$l_2 = r^2 / 2R_2, \quad (4)$$

где R_2 — радиус правой поверхности линзы.

Теперь мы можем переписать равенство (1), подставляя в него выражение (2) для δ и выражения для l_1 и l_2 , даваемые соотношениями (3) и (4). Получим

$$\frac{r^2}{2f} = \left(\frac{v_{\text{возд}}}{v_{\text{стек}}} - 1 \right) \left(\frac{r^2}{2R_1} + \frac{r^2}{2R_2} \right).$$

Сокращая обе части равенства на $r^2/2$, получаем

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{v_{\text{возд}}}{v_{\text{стек}}} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Это — формула линзы, выражающая ее фокусное расстояние через радиусы кривизны ее поверхностей.

Мы видим, что показатель преломления автоматически выступает здесь как отношение скорости света в воздухе к скорости света в веществе линзы.

Ч А С Т Ь Ф И З И К А

II О П Т И К А И В О Л Н Ы

Под редакцией
А. С. Ахматова

М., 1973 г. 400 стр. с илл.

Редактор *Л. И. Гладнева*
Техн. редактор *С. Я. Шкляр*
Корректоры *О. А. Бутусова,*
Н. Б. Румянцева

Сдано в набор 7/III 1973 г. Подписано к печати
4/IX 1973 г. Бумага 60×90¹/₁₆. Физ. печ. л. 25 +
вкл. 0,25. Условн. печ. л. 25,25. Уч.-изд. л. 29,64.
Тираж 130 000 экз. Цена книги 1 р. 18 к.
Заказ № 221

Издательство «Наука»
Главная редакция
физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография им. А. А. Жданова
Союзполиграфпрома при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли,
Москва, М-54, Валовая, 28

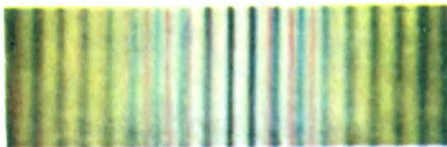


Рис. 1. Интерференционная картина, образуемая белым светом, прошедшим сквозь две узкие щели.

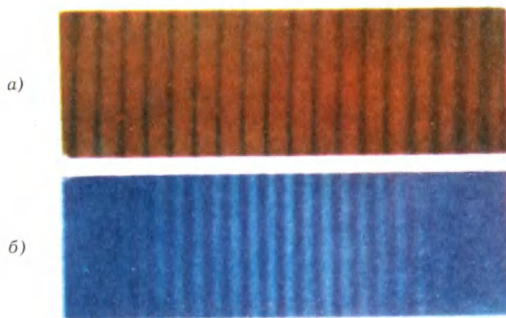


Рис. 11. Интерференционные полосы, сфотографированные в красном (а) и сине-фиолетовом (б) свете с помощью той же установки, которая применялась при получении фотоснимка в белом свете, показанного на рис. 1.

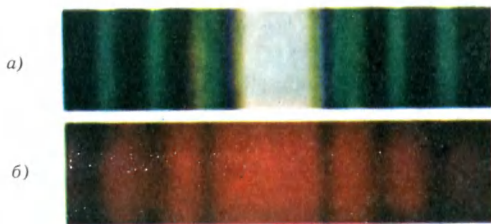
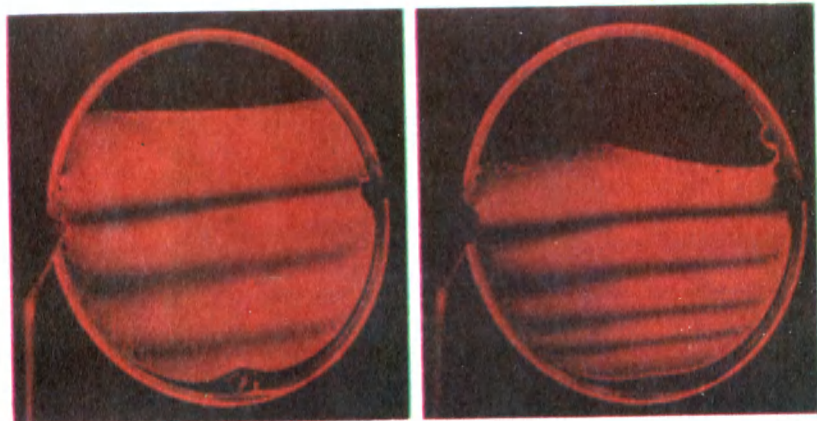


Рис. 111. а) Фотоснимок одной щели, освещавшейся белым светом. б) Фотоснимок, полученный на той же установке, но с заменой белого света красным. Эти снимки называются дифракционными картинами от одной щели.



Рис. IV. Интерференция при отражении белого света тонкой мыльной пленкой. Пленка заполняет круглую рамку. Снимок сделан вскоре после стекания пленки до такой степени, что в верхней части ее толщина стала меньше четверти длины самой короткой волны видимого света.



а)

б)

Рис. V. Интерференция при отражении красного света той же пленкой, что и на рис. IV. а) Снимок, полученный почти одновременно со снимком на рис. IV. б) Снимок, сделанный несколько позже первого. Поскольку пленка продолжала стекать, верхняя темная область расширилась вниз.

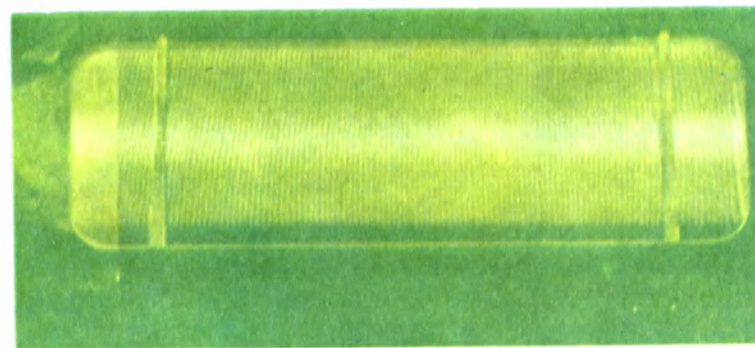


Рис. VI. Интерференционная картина, появляющаяся при отражении света определенного спектрального цвета от обеих поверхностей воздушного клина, ограниченного стеклянными пластинками, между которыми у левого конца зажат лист тонкой бумаги.

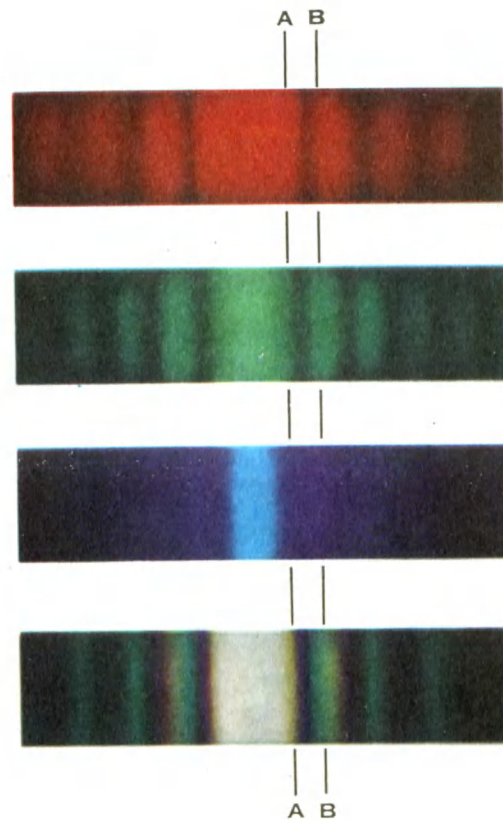


Рис. VII. Дифракционные картины от одной и той же щели в красном, зеленом, голубом и белом свете. Проследив общую среднюю линию этих дифракционных картин, можно убедиться, что на ней свет каждого спектрального цвета имеет максимум яркости. Взаимное наложение этих разноцветных максимумов дает белый цвет. Проследим теперь линию AA сверху вниз. Красный свет на ней умеренно яркое; зеленый гораздо темнее; голубой совершенно отсутствует. При освещении же щели белым светом в этом месте виден красный цвет. Чуть левее линии AA на трех верхних снимках к красному прибавляется немного более зеленого и синего цветов, и в этом месте при белом освещении получается желтый цвет. Правее линии AA в некотором месте красный свет исчезает, но голубой появляется. Что вы видите в этом месте при освещении щели белым светом? Исследуйте теперь спектры по линии BB, расположенной несколько правее. Здесь красный свет почти отсутствует, зеленый яркий, а голубой почти исчез. Получающийся при белом освещении желтоватый цвет относится к желто-зеленой части спектра. Проследите образование цветов при белом освещении щели по другим вертикальным линиям по вашему выбору.