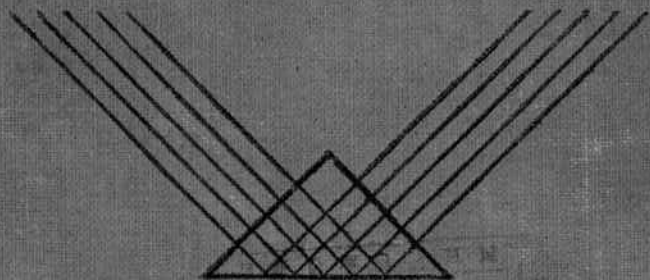


В. Б Р Э Г Г

МИШП
СВЕТА



12587 P

О Н Т И

89

Депозитарий

В. БРЭГГ

Проз. 1965

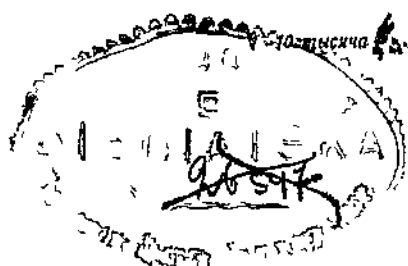
X

МИР СВЕТА

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО

В. А. ПУЛЬВЕРА

ПРОВЕРЕНО
1950



ЗЕРКАЛО

№ 12587-1

ПРОВЕРЕНО
1966 г.

Всесоюзная библиотека
НКТП СССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОЙ И ЮНОШЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

ОСКВА

1935

ПРЕДИСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКА

Предлагаемая вниманию читателей книга в значительной степени заполняет пробел, существующий в научно-популярной литературе по физике. Блестящий стиль, отличающий все произведения автора, уже известные нашему читателю, делает эту популярную книгу интересной и для специалистов.

Название подлинника „The Universe of Light“ гораздо глубже, чем русское, что видно из заключительного абзаца автора. Однако мы остановились на заглавии „Мир света“, опасаясь его излишней громоздкости. При переводе мы исправили несколько неточностей, хотя и не влияющих на смысл, однако нежелательных, а также сделали пояснение в одном или двух местах, изложенных слишком лаконично.

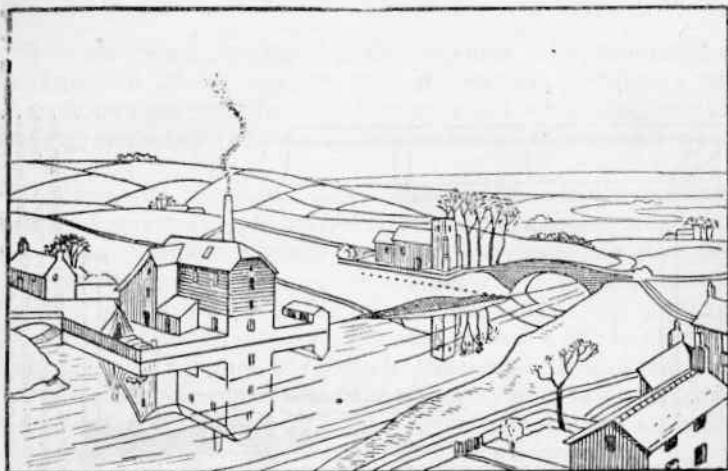
В. Л. Пульвер

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

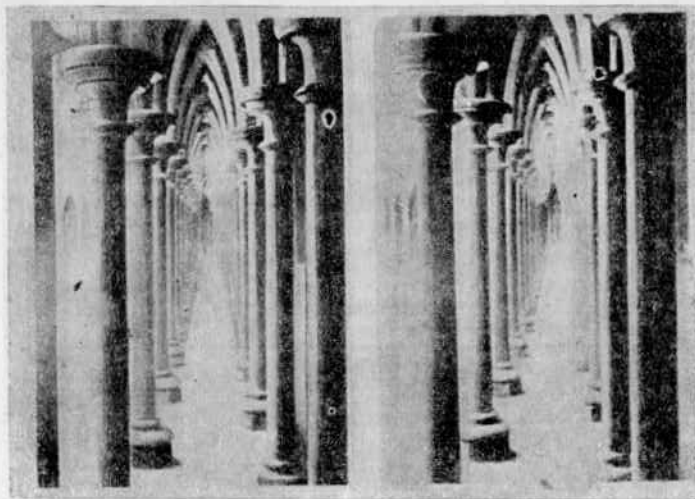
Последние успехи физики привлекают широкое внимание главным образом потому, что интереснейшие проблемы, к которым они приводят, прекрасно изложены многими авторами. Мне казалось, что для популяризации этих новых идей будет полезно, если я напишу небольшой очерк более ранних исследований, из которых возникла современная наука. На опытах и выводах Ньютона и Гюйгенса, Юнга и Френеля, Крукса и Томсона и многих других ученых строилась дорога, ведущая к нашим современным позициям. Мы не сможем охватить полностью значения этих позиций, если не будем иметь некоторых сведений о пути, пройденном нашими предшественниками.

В качестве путеводной нити книги я взял старое соперничество между двумя теориями света, которое явилось одним из наиболее мощных факторов развития науки. Корпускулы и волны, связанные соответственно с именами Ньютона и Гюйгенса, поочередно казались окончательно победившими. Результат борьбы между этими двумя представлениями является совершенно неожиданным откровением. Этот результат заключается в примирении обеих гипотез, казавшихся прежде взаимно исключающими друг друга; он предостерегает от опасности предполагать, что какие-либо наши представления могут быть окончательными. Нам еще трудно понять, каким образом эти две теории могут быть одновременно правильными; однако мы вынуждены притти к этому заключению на основании ряда фактов, взаимно подтверждающих друг друга. Мы приходим к заключению, что явления, находившиеся когда-то за пределами нашего понимания, впоследствии становятся ясными не только вследствие накопления фактов, но также из-за того, что наш мыслительный аппарат приспособляется к новому образу мышления.

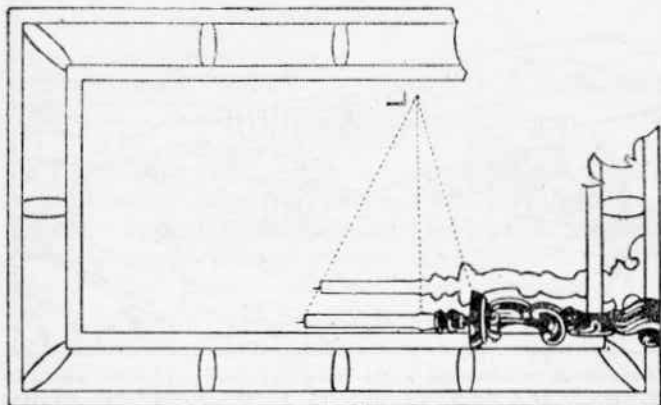
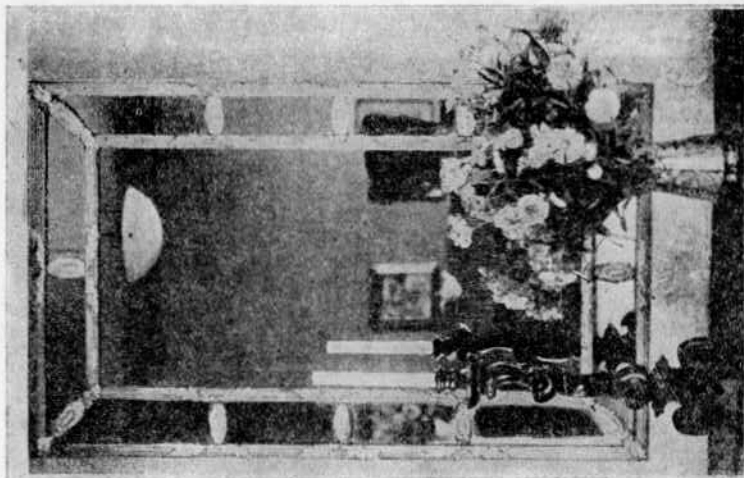
ТАБЛИЦА I



А. Вертикальная линия, соединяющая любую точку на этом рисунке с ее изображением в воде, пересекается уровнем воды посередине, в точке, лежащей под отражающимся предметом. Художник имел в виду нарисовать эти уровни так, чтобы их можно было легко проследить. Например, уровень воды под дорогой, проходящей вблизи группы деревьев, недалеко от середины рисунка, является продолжением линии, соединяющей точки, в которых обращенная к зрителю сторона арки моста, перекинутого через реку, соприкасается с водой (стр. 23).



В. Стерeosкопическая фотография колоннады в соборе св. Михаила. Фотографии сняты со слегка различных точек зрения (стр. 29).



Отражение в плоском зеркале. Изображение фотографического аппарата смутно заметно справа над цветами. Прямая линия, соединяющая объект аппарата с его изображением, перпендикулярна зеркалу. Это относится ко всем перспективам. Все эти линии в центре перспективы". Рисунок

добным линиям, в частности к той, которая соединит верхнюю часть сечи с ее изображением. Все эти перпендикуляры пересекаются в одном центре перспективы". Рисунок

Без сомнения, будущие исследования, построенные на объединении обеих старых теорий, окажутся такими же плодотворными, какими эти теории были в прошлом, когда они существовали и совершенствовались на основе противоречия.

Собственно говоря, под светом обычно понимают крайне ограниченный круг обширного класса явлений излучения. Однако законы оптики применимы для гораздо более широкого круга вопросов, и работы основоположников этой науки имели более общее значение, чем думали они сами. Длины световых волн заключены в очень тесных пределах; но законы волнового движения относятся как к мельчайшим волнам рентгеновских лучей, так и к длинным радиоволнам. Светом пользуются в огромном количестве различных исследований. С ним имеют дело и при изучении далеких глубин пространства — в астрономии, и при наблюдении мельчайших деталей объектов, сложное строение которых также недоступно для нашего глаза; причем и в том и в другом случае всегда возникает масса вопросов, имеющих глубочайший интерес.

Больше того, оказалось, что лучи, имеющие несомненно корпускулярное строение, например пучки электронов, протонов или атомов, легко получаемые сейчас в лаборатории, подчиняются в некоторых отношениях тем же законам, что и свет. Волны и частицы являются скорее различными проявлениями одной и той же сущности, чем различными сущностями.

В слове „свет“ заключена вся физика и тем самым все науки. Это — одна длинная повесть, и предлагаемая читателю книга имеет в виду дать краткое изложение некоторых ранних глав этой повести, для того чтобы можно было легче оценить последующие.

Название книги совпадает с названием курса рождественских лекций, который я прочел в 1931 г. в Королевском институте. Такие лекции устраиваются ежегодно уже в течение более чем целого века для аудитории, состоящей главным образом из молодежи. Сам Фарадей прочел их не менее девятнадцати. Простота и ясность его изложения и склонность к наглядным опытам были, как до сих пор пишется в официальных отчетах, особенно „приспособлены для юношеской аудитории“. Преемники Фарадея старались следовать его примеру. Рождествен-

ские лекции 1931 г. сопровождались большим числом опытов как старых, так и новых.

Я пользуюсь ими в этой книге, но, конечно, я описываю эти опыты и выводы, вытекающие из них, значительно глубже, чем это позволяют лекционные демонстрации.

В. Брэн

Глава I

ПРИРОДА СВЕТА

Свет приносит нам вести вселенной. Лучи Солнца и звезд сообщают нам о положении этих светил, их движениях, составе и многих других их свойствах. Лучи, исходящие от предметов, окружающих нас в повседневной жизни, позволяют установить наше место в мире; мы любуемся цветами и формами, открывающимися перед нами, мы пользуемся ими для обмена сведениями и мыслями. Если значение слова „свет“ понимать более широко, а есть все основания подразумевать под ним также все разнообразные виды излучений, весьма сходные со светом и невидимые глазу, тогда „свет“ можно рассматривать как мощное средство передачи из одного места вселенной в другое того вида энергии, который мы называем „лучистым теплом“. Радиопередача охватывается этим термином так же, как и рентгеновские лучи, лучи радиоактивных веществ и, возможно, космические лучи, привлекающие в последнее время так много внимания. Все эти весьма различные явления связаны общим принципом, удивительная универсальность которого становится все яснее и яснее по мере того, как мы изучаем природу света.

Мы можем пойти даже дальше. За несколько последних лет стало очевидным, что электрон, — мельчайший атом электричества, — обладает свойствами, родственными свойствам излучений, из которых свет является типичным и наиболее знакомым нам примером. Даже сами атомы вещества, повидимому, в некоторых отношениях могут быть причислены к этой большой категории явлений.

Итак, свет в широком смысле этого слова переносит энергию, которая является основой жизни и дает всему

живущему могущество наблюдения, и в то же время он родствен материи, из которой состоит все и живое и не живое. Вселенная есть арена, на которой проявляется его деятельность. Мы не преувеличиваем, когда говорим о „мире света“.

Мы рассмотрим сначала свет в узком смысле слова, а именно тот свет, который постоянно воспринимают наши глаза.

Свет, излученный Солнцем, через определенное время доходит до нас. При этом он претерпевает ряд испытаний.

Он пронизывает слои раскаленных газов, окружающих Солнце, и атмосферу Земли. Он, вероятно, отражается много раз и, наконец, попадает к нам в глаз от предмета, который мы видим. Это последнее отражение является для нас наиболее важной частью его пути, потому что оно позволяет нам судить о том, где находится данный предмет и что он собой представляет. Но наше зрение дает нам еще больше: привычка позволяет нам узнавать первичный источник, от которого свет исходит. Мы не смешаем солнечный луч с лучом искусственного света. Если же мы применим приборы, анализирующие солнечный свет, можно будет пойти еще дальше. Мы сможем тогда узнать те испытания, которые свет встретил на своем пути: мы откроем состав и состояние атмосфер, пронизанных светом, а в некоторых случаях и тел, от которых он отражался.

Когда смотрят на океанский пароход, медленно плывущий по окончании путешествия в док, его внешний вид одновременно говорит и о пункте отправления и о странствовании парохода, а если мы взойдем на борт, то по предметам, находящимся у пассажиров и лежащим вокруг, можно определить, в каких портах судно побывало. Этими деталями написана история путешествия.

Точно так же луч света, по прибытии в глаз, приносит с собой повесть о своих испытаниях; некоторые из них прочесть легко, другие — труднее. Известия, распознаваемые глазом, касаются в большинстве случаев последнего отражения испытанного светом в конце его путешествия, — это то, что позволяет глазу „видеть“ предмет, на котором это отражение имело место.

ВОЛНОВАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА

Мы, естественно, приходим к вопросу относительно природы этого „почтальона“ и способа его передвижения от одного места к другому. В наше время эти явления значительно легче понять, чем несколько лет тому назад. Передача по радио, или как мы обычно говорим, — радиовещание, знакомит нас с представлением о возникновении и распространении возмущений, передающихся в виде волн радиостанции, принимаемых близкими и дальними приемниками. Солнце посылает свои волны так же, как передающая радиостанция: наши глаза воспринимают волновые движения, достигающие их, так же как радиоприемники воспринимают волны из „студии“.

Нет никакой разницы в природе тех и других волн: они отличаются только размерами. Они движутся совершенно одинаковым образом; и если один из них передается посредством какой-нибудь среды, то и другие также должны передаваться посредством среды. Единственная разница кроется в том, что световые волны следуют одна за другой через значительно меньшие интервалы, чем радиоволны. Это отличие не остается без последствий, и в некоторых отношениях свет и радиоволны ведут себя различным образом. Однако следует иметь в виду, что в основном эти явления — одной природы.

Такое тождество природы явлений чрезвычайно полезно и интересно. Волновая теория света всегда представляла большие трудности для понимания вследствие неожиданности основной идеи. Теперь мы ежедневно видим в газетах сведения о длине волн, посылаемых различными станциями, и, таким образом, представление о волнах стало вполне обычным. Это, конечно, не значит, что теперь мы знаем, какова среда, передающая эти волны, и как эта среда рассеяна в пространстве вселенной. Точно так же мы не знаем, происходят ли движения в ней вперед и назад или вверх и вниз, и вообще, какого рода движения здесь аналогичны хорошо знакомым нам волновым движениям воды на поверхности моря. Большинству известно только, что в радио существуют волны, длину которых можно измерить, и что приемники могут быть настроены на длину волны, посылаемой определенной станцией. Но этот факт весьма полезен для понимания волновой

теории света. Мы видим, что радиотехник ежедневно пользуется в своей работе волновым представлением. Это представление постепенно делается менее смутным и становится сугубо практическим, хотя, несмотря на это, если мы внимательно рассмотрим сущность дела, то окажется, что мы сейчас знаем немногим больше того, что знали прежде. Мы начинаем лучше понимать только потому, что значительное различие в поведении обоих видов волн весьма поучительно. В дальнейшем мы будем часто пользоваться сравнением радио- и световых волн.

Длина радиоволн, излучаемых станцией Давентри, составляет 1 554,4 м, или 155 440 см. /лина волны красного света несколько меньше одной десятитысячной доли сантиметра. Мы предполагаем произвести опыты, наглядно иллюстрирующие некоторые свойства волн. Ясно, что радиоволны слишком длинны, а световые волны слишком коротки для этой цели. Мы должны воспользоваться каким-нибудь волновым движением подходящего масштаба и поэтому останавливаем свой выбор на водяных волнах; при помощи волн на поверхности воды мы выясним общие свойства волнового движения, которые в данном случае такие же, как и в других случаях, так как, длинные или короткие, все волны в основном ведут себя сходным образом.

ОПЫТЫ С ВОЛНАМИ НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

Мы воспользуемся неглубоким сосудом со стеклянным дном, представленным на рис. 1. Он налит водой до глубины около 1 см. Рябь, бегущая по поверхности воды при возмущении последней, плохо видна при обычных условиях. Поэтому мы пользуемся направленным пучком света и проектируем тени волн при помощи зеркала на экран.

Мы встряхиваем сосуд и вызываем этим появление волн, параллельных его краям. Они двигаются поперек сосуда в двух противоположных направлениях, и обе системы волн встречаются посередине. Они пронизывают одна другую, и каждая достигает, наконец, стенки, противоположной той, от которой она исходит. Здесь волны отражаются и двигаются обратно. Эти простые наблюдения иллюстрируют два основных свойства волнового движения.

Первое заключается в том, что две системы волн пронизывают одна другую, оставаясь неизменными. Этот факт — общеизвестен, несмотря на то, что мы обычно не обращаем на него внимания. Если бы дело было иначе, то происходило бы много странных явлений. Предположим, что кто-нибудь смотрит на свечу; последняя посылает свет в глаз наблюдателя. Пусть еще один наблюдатель смотрит на другую свечу так, что луч его зрения

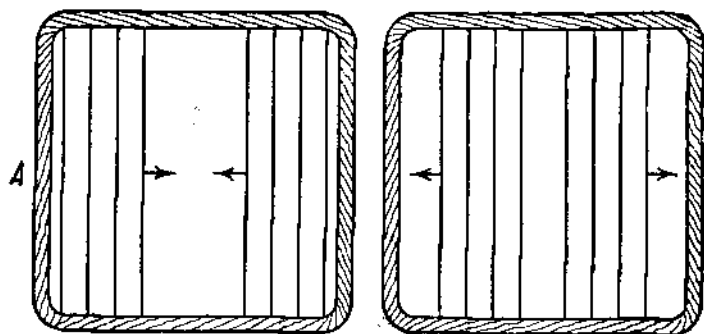


Рис. 1. Толчок, данный сосуду, вызывает появление волн, проходящих по поверхности воды. Две системы волн, возникающих у противоположных краев сосуда, встречаются на первом рисунке и уже пронизали друг друга на втором

пересекает луч зрения первого наблюдателя. Каждый наблюдатель видит свечу, на которую он смотрит, так, как если бы другой свечи не было вовсе и если бы это было иначе, то этот факт сказывался бы очень сильно.

Подумайте, как было бы удивительно если бы лучи света, рассеянные различными предметами в комнате, гасили друг друга при многочисленных встречах, которые они испытывают. В смешении лучей ничего нельзя было бы различить; вся комната стала бы не более, чем темным пятном. Точно так же и лучи различных радиостанций не влияют друг на друга при встрече. Явление, известное под названием интерференции, происходит при совершенно особых условиях, которые мы изучим позднее.

Когда один наблюдатель, например в Лондоне, принимает радиостанцию, находящуюся в Кардиффе, а другой в Саусэмптоне слушает Давентри, никто из них не страдает от того, что две системы волн пересекают друг

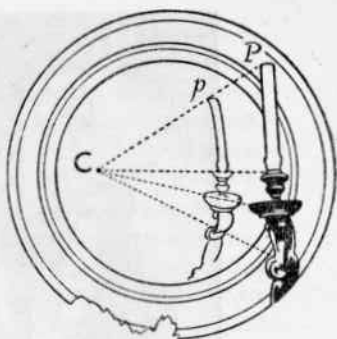
друга, так же как если бы оба слушателя находились где-нибудь около Оксфорда. При пересечении лучей имеет место сложное движение, представляющее взаимное наложение систем волн, распространяющихся независимо друг от друга, так, как если бы они никогда не встречались. Волны проходят друг через друга без всякого влияния, и этому обстоятельству следует несомненно приписать огромную роль в объяснении могущества нашего зрения.

В прежние времена, а, может быть, отчасти и теперь, трудно было себе представить, что лучи света пересекаются безо всякого влияния друг на друга. Это относится в особенности к представлению о свете, как о потоке корпускул, сторонником которого являлся Исаак Ньютон. Этой гипотезе выставлялось возражение, согласно которому два человека не должны были бы видеть один глаза другого, так как корпускулы, летящие навстречу, сбивали бы друг друга и падали бы на землю. Это не являлось сильным возражением, так как можно было предположить, что корпускулы столь малы, что столкновения происходят крайне редко. Интересно, однако, отметить, какими аргументами в свое время оперировали философы, пытаясь проникнуть в тайну природы света.

ГИПОТЕЗЫ НЬЮТОНА И ГЮЙГЕНСА

В эпоху Ньютона существовали две враждебные теории: корпускулярная, предложенная самим Ньютоном, и теория импульсов, предложенная Гюйгенсом, который явился предвосхитителем современной волновой теории. Гюйгенс, так же как и Ньютон, предполагал существование мельчайших световых корпускул. Ньютон, однако, считал свет потоком летящих корпускул, тогда как Гюйгенс представлял корпускулы находящимися в покое и плотно заполняющими все пространство. Распространение света согласно этой гипотезе заключается в передаче ударов от частицы к частице. Гюйгенс пишет в своем „Трактате о свете“:

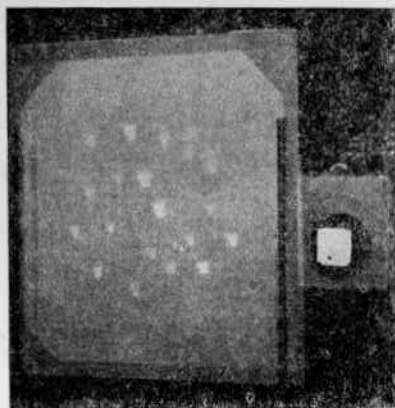
„Если взять некоторое число одинаковых шаров, сделанных из очень твердого вещества, и расположить их прямолинейным рядом так, чтобы они соприкасались, то при ударе такого же шара в крайний движение пере-



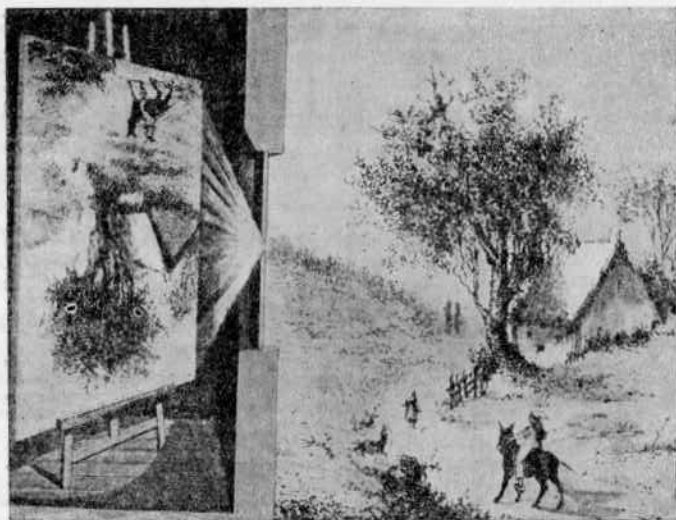
А. Отражение в выпуклом зеркале. Изображения предметов, находившихся в помещении, где производилась съемка, получились неперевернутыми, уменьшенными и искаженными. Изображение фотоаппарата видно слева.

Зеркало является частью сферической поверхности, центр которой находится в C . Прямая линия, проведенная через объектив аппарата и его изображение, проходит через C , потому что луч, идущий от объектива по направлению к C , должен вернуться после отражения тем же путем. Таким образом центр C на фотографии должен находиться за изображением объектива. На рисунке, содержащем основные черты фотографии,

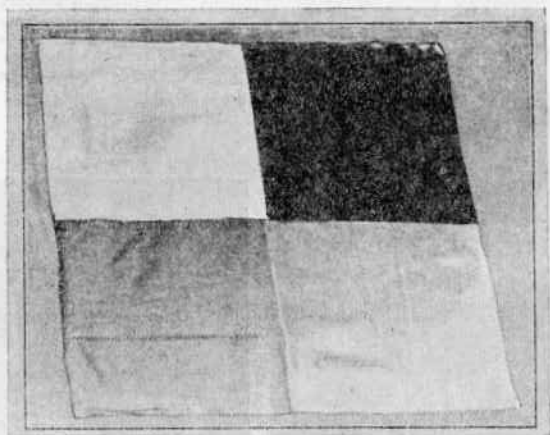
точка C отмечена. Пунктирные линии показывают, что прямые, соединяющие каждую точку рисунка с ее изображением, например P с p , проходят через C , потому что любая линия, соединяющая точку с ее изображением, должна проходить через объектив (стр. 24).



Б. и В. Опыт, показывающий принцип действия камеры обскуры. Объяснение дано в тексте (стр. 3



А. Действие камеры обскуры (стр. 31).



В. Четыре куска одного и того же сатина разложены на столе так, что их волокна расположены в различных направлениях. Наблюдатель смотрит на стол, освещая его из-за своей спины. Различные куски имеют неодинаковую яркость (стр. 32).

дается в одно мгновение последнему шару и он отскакивает, в то время как остальные остаются неподвижными, так же как и тот, который ударил. Отсюда видно, что движение передается с большой скоростью, тем большей, чем больше твердость вещества, из которого сделаны шары.

В то же время не вызывает сомнения, что эта передача движения не мгновенна; она происходит последовательно и поэтому должна занимать некоторое время. Ибо, если бы движение или склонность к движению, если таковая существует, не проходило последовательно через все шары, последние приходили бы в движение все одновременно, чего не происходит“.

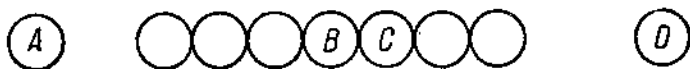


Рис. 2. Рисунок, взятый из „Трактата о свете“ Гюйгенса. Шар А, ударяющий в один конец ряда шаров, останавливается, тогда как шар в противоположном конце отскакивает

Гюйгенс указал, что его импульсы не обязательно должны следовать друг за другом через одинаковые интервалы. Таким образом он отказался от периодичности, которая является существенной особенностью волнового движения; этой особенностью успешно воспользовались в начале XIX в. Юнг и Френель, положив основание новейшей теории света. Мы рассмотрим позже развитие принципа интерференции Юнга и принципа поперечных волн Френеля; Гюйгенс был, однако, в состоянии объяснить при помощи своих импульсов простейшие световые явления, в том числе отражение и пересечение световых лучей без взаимного ослабления. Последнее он объяснял с помощью рисунка, который здесь воспроизведен (рис. 2).

Если твердые шары А и D двигаются в противоположных направлениях так, что они одновременно ударяются в ряд шаров, то они отскакивают так, как если бы они ударились о твердое тело. Импульсы проходят через шары в противоположных направлениях: таким образом движение А передается к D и наоборот (рис. 2).

Опыт может быть поставлен иначе. Шары располагаются на столе, как показано на рис 3. Их прямолиней-

ное расположение сохраняется при помощи неглубоких желобков, вырезанных в столе. Если теперь *A* катится по направлению к *B*, а *D* к *E* так, что они ударяются одновременно, *A* и *D* останавливаются вплотную к *B* и *E*, тогда как *C* и *F* отскакивают. Два импульса пересекаются в центре фигуры, не влияя друг на друга.

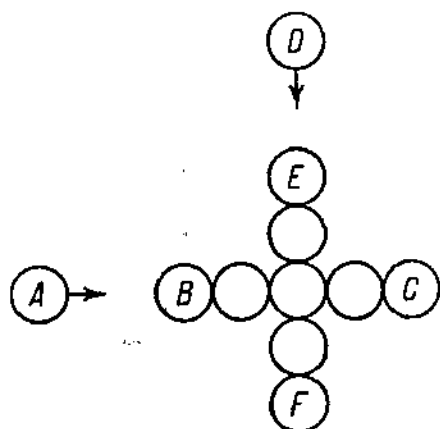


Рис. 3. Видоизменение последнего опыта. Шары *A* и *D* ударяют одновременно *B* и *E* и останавливаются. Шары *C* и *F* отскакивают.

После Ньютона корпускулярная теория потеряла почву, и наступило торжество волновой теории, так как после работ Юнга и Френеля, которые видоизменили и развили эту теорию, она позволяла объяснять не только явления, известные во времена Ньютона и Гюйгенса, но и многие другие свойства света, обнаруженные позже. Мы увидим, что волновая теория до сих пор не

потеряла своего могущества; мы будем широко пользоваться ею и почерпнем много иллюстраций из поведения водяных волн, которыми мы уже пользовались. Интересно отметить, однако, что в последние годы были открыты факты, которым волновая теория не в состоянии дать отчетливого толкования; эти факты как будто говорят о возврате к корпускулярной теории, подобной ньютоновской. В последние годы был найден путь, примиряющий опытные факты, казавшиеся абсолютно противоречащими друг другу; в истории науки никогда еще не было столь оживленного периода, как настоящий, когда напряженность в стремлениях к знанию, кажется, достигает крайнего предела.

Рассмотрение этого совершенно особого вопроса мы до поры до времени отложим. При изучении менее запутанных свойств света волновая теория нам будет служить достаточно хорошо. Имея в виду, что впереди нас ожи-

дают более трудные вопросы, которые мы спокойно откладываем для более позднего рассмотрения, мы можем сейчас двигаться с полной уверенностью, что, встречаясь вначале с простыми вопросами и пытаясь объяснить их с помощью теории, справедливой лишь в определенных рамках, мы не потеряем времени даром.

ОТРАЖЕНИЕ ОТ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Второе свойство, которое мы обнаруживаем у волн на поверхности воды в нашем сосуде, это—их отражение. Мы видели, что дуг волн, подходящих к стенке сосуда, возвращался обратно. Если теперь вызвать движение волн под углом к стенке, то мы увидим ряд отраженных волн, составляющих со стенкой тот же угол, что и падающие. Это соответствует хорошо известному свойству света: давно установлено, что падающий и отраженный лучи составляют с отражающей поверхностью одинаковые углы (рис. 4).

Уместно рассмотреть здесь связь между терминами „луч“ и „дуг волн“. Мы пользуемся словом „луч“, когда описываем, например, яркий пучок солнечного света, проходящий через отверстие в стене в затемненную комнату. Он также является дугой волн; но световые волны невозможно изобразить на рисунке в натуральную величину. Для этого следовало бы нарисовать ряд параллельных линий, как на рис. 4, представляющих

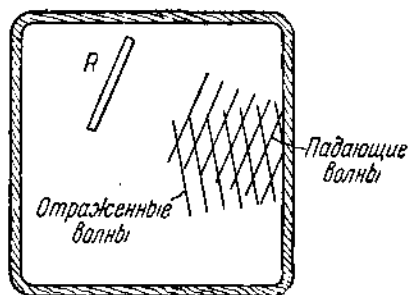


Рис. 4. Отражение водяных волн от стенки сосуда

являющихся последовательные волны, и в правильном масштабе они расположились бы столь часто, что в 1 см их умещалось бы около 15 000. Тем не менее, из рассмотрения нашего рисунка можно вывести одно важное свойство: концы волн в действительности не должны быть ограничены так резко, как проведенные по линейке линии, соответствующие границам луча. Мы

должны ожидать, что волны рассеиваются в стороны, и края луча становятся размытыми.

Это действительно так и происходит с лучами света, и это явление, как мы увидим позже, имеет большое

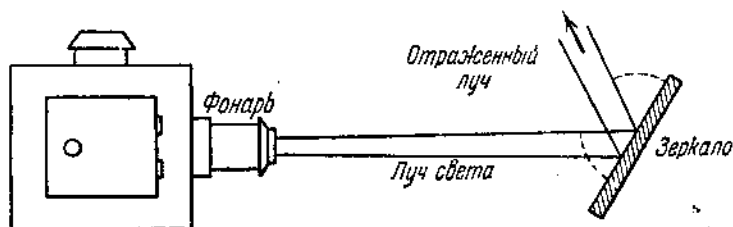


Рис. 5. Падающий и отраженный лучи составляют с зеркалом равные углы

теоретическое значение. Однако практически оно заметно очень слабо и в большинстве случаев с ним можно вообще не считаться, так что мы в праве рассматривать „лучи“ света, ограниченные резко определенными границами. Направление луча, конечно, перпендикулярно волнам.

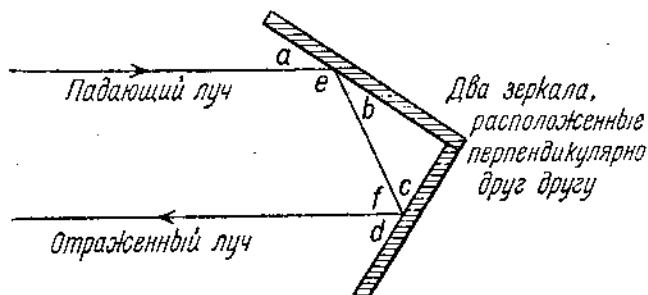


Рис. 6. Двойное отражение от зеркал, расположенных под прямым углом, одно к другому. Падающий и отраженный лучи параллельны, и линия пересечения зеркал перпендикулярна им, это получается потому, что $a + d = b + c = 90^\circ$, откуда $e + f = 360^\circ - (a + b + c + d) = 180^\circ$

Сделаем несколько опытов, иллюстрирующих отражение света от плоской поверхности. Фонарь посылает узкий прямолинейный луч (рис. 5), зеркало отражает его, и даже без точных измерений легко видеть, что закон отражения выполняется; мы можем быть уверены, что самое точное измерение не обнаружит отклонения от

этого закона. Теперь усложним опыт, взяв два зеркала, расположенные перпендикулярно друг к другу, и установив их так, чтобы линия пересечения зеркал была вертикальной. Горизонтальный луч падает на одно зеркало и, отразившись от него, на другое. После двойного отражения луч возвращается по направлению, параллельному тому, из которого он пришел. Как видно из рис. 6, это справедливо при любом расположении зеркал. Если, однако, линия пересечения зеркал не вертикальна, дважды отраженный луч уже не будет параллелен первоначальному (рис. 7). Мы можем получить еще одну интересную в практическом отношении иллюстрацию законов отражения, если расположим взаимно перпендикулярно три зеркала, как это представлено на рис. 8. Падающий

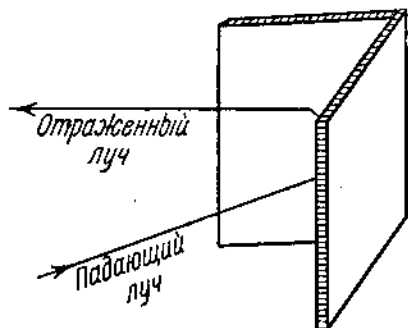
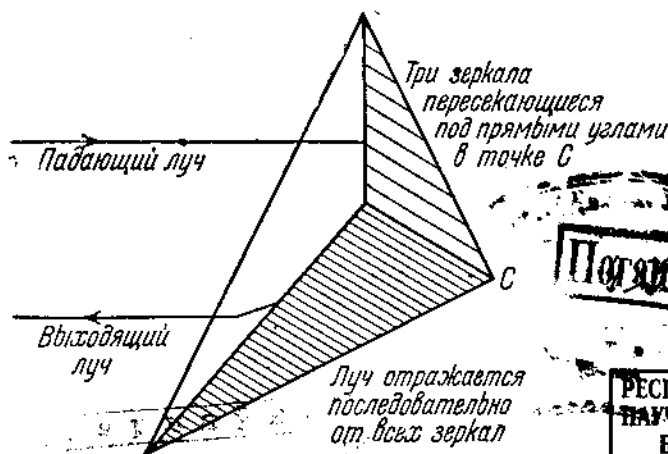


Рис. 7. Лучи не параллельны друг другу, если условия предыдущего опыта не соблюдены



Падающий

РЕСПУБЛИКАНСКИЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ
БИБЛИОТЕКИ

Рис. 8. Отражение от трех взаимно перпендикулярных зеркал. Как бы ни была расположена система зеркал, падающий и отраженный лучи параллельны

луч после отражения всеми тремя зеркалами возвращается обратно по его первоначальному направлению при любой ориентировке системы зеркал. Подобное устройство применяется во многих случаях и оно оказывается часто чрезвычайно полезным. Так, например, велосипед, снабженный таким приспособлением, посылает лучи автомобильных фар обратно к автомобилю, нагоняющему его. Для этой цели было испытано много рефлекторов различного устройства, но ни один из них не отражал в нужном направлении достаточно интенсивного светового пучка. К лучшим из испытанных рефлекторов принадлежал описанный выше зеркальный четырехгранник, изображенный на рис. 8. Этот рефлектор представляет обычно пирамиду из красного стекла с плоским основанием и тремя взаимно перпендикулярными боковыми гранями. Свет автомобильных фар входит через основание пирамиды, отражается от ее боковых граней и выходит обратно через основание; отраженные лучи возвращаются при этом по пути падающего света, т. е. в направлении автомобиля, что и требуется.

РАССЕЯНИЕ СВЕТА

Мы отличаем отражение света от его рассеяния. Важно заметить, что этими двумя терминами обозначают не различные явления, а различные условия, при которых происходит одно и то же явление. Когда на пути света встречается препятствие, лучи меняют направление движения. Если предмет гладкий, новое волновое движение подчиняется простому закону, зависящему от формы поверхности предмета. Мы называем такое явление отражением. Если же поверхность предмета неправильная, свет разбрасывается по всем направлениям, и мы говорим тогда о рассеянии. Когда морские волны ударяются в облицованную набережную, получается правильное отражение; но если они встречают скалистый берег, наблюдается беспорядочное движение, в котором не видно ни одного дуга отраженных волн.

Когда луч света пересекает комнату, его след заметен, потому что воздух комнаты содержит взвешенные частицы пыли, которые заставляют некоторое количество света отклоняться в сторону и попадать к нам в глаз. Но если бы

пыли не было, луч не был бы виден сбоку. Для того, чтобы показать это, мы воспользуемся камерой, сквозь которую проходит луч света, входящий через одно стеклянное окошко и выходящий через другое (рис. 9)



Рис. 9. Свет проходит сквозь воздух, свободный от пыли без заметного рассеяния

Стеклянная стенка камеры позволяет видеть ее внутренность.

Стенки камеры вычернены изнутри и покрыты глицерином за несколько дней до опыта, для того чтобы вся пыль осела на них и воздух был почти совершенно чистым. При этом замечен луч как входящий, так и выходящий из камеры, но внутри нее пучка не видно. Разумеется, это соответствует нашей гипотезе. Ибо, если луч света

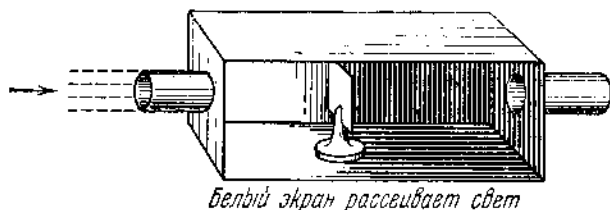


Рис. 10. Кусок белой бумаги, помещенный на пути света, рассеивает последний, и сам делается ярким вторичным источником света

состоит из ряда волн и если глаз является органом, реагирующим на попадающий в него свет, то пока волны нашего луча не „сбиваются“ со своего пути пылью, до тех пор мы не видим никакого луча. Можно пользоваться лучом любой интенсивности, входящим в комнату в одно отверстие и выходящим из другого, и мы будем находиться в полной темноте, если только

комната не освещается каким-либо другим способом и если воздух совершенно свободен от пыли. Наша камера представляет подобие такой комнаты. Если же поместить на пути лучей кусок белой бумаги, камера ярко освещается (рис. 10).

В некоторых случаях полезно иметь в виду, что таким способом можно направить в сторону много света. Если, например, кому-нибудь понадобится сменить ночью автомобильную шину, находясь на неосвещенном шоссе, то не имея переносного фонаря, можно устроить прекрасное освещение при помощи куска белой бумаги, укрепленного перед фарой. Все это делается вполне понятным, если рассматривать световые лучи как цуг волн.

Мы нашли два характерных свойства водяных волн, соответствующих хорошо знакомым нам свойствам света, а именно то, что эти волны свободно проходят сквозь друг друга и отражаются от поверхности тел так же, как это делает свет. Примем в качестве возможной гипотезы что свет есть волновое движение. Можно спросить тогда—в чем? И нужно признаться, что мы ничего не знаем о той среде, в которой эти волны движутся. Воздух не может служить для этой цели, потому что лучи солнца идут к земле через пространство, в котором воздуха нет. Однако тот факт, что мы до сих пор ничего не знаем об этой среде, не запрещает нам предполагать ее существование. Во всяком случае для настоящих целей нам это удобно.

Мы можем также спросить, всегда ли передаются эти волны одной и той же средой? Может быть, они передаются воздухом, проходя в нем, стеклом, проходя сквозь стекло, и чем-нибудь неизвестным на земле, когда свет проходит кажущуюся пустоту пространства? Ответ на этот вопрос мы можем дать такой: мы получим правильную картину о том, что происходит во всех этих случаях если предположим, что среда, являющаяся носителем световых волн, наполняет все пространство, включая и те области его, где находится воздух, стекло или любое другое вещество; мы должны представить себе, что все тела, которые мы видим или чувствуем, как бы взвешены в мировом океане. Мы называем этот океан эфиром. Когда свет проходит пространство, в котором находится какое-нибудь материальное тело,

волны передаются эфиром; но тем не менее вещество оказывает некоторое влияние: оно может замедлить движение волн или даже остановить его. Мы скоро обратимся к этим свойствам света.

Но существует ли эта среда в действительности? Этот вопрос остается открытым. И обсуждая возможный ответ на него, мы начинаем сомневаться: имеет ли он какой-нибудь реальный смысл, правильно ли он поставлен? Мы рискуем забраться в темные дебри, если начнем детально его разбирать, но, к счастью, у нас нет в этом необходимости.

Мы не будем заниматься этим вопросом, потому что это заставило бы нас отвлекаться от нашей основной задачи, заключающейся в накоплении сведений о свойствах света и в нахождении связи их друг с другом. Мы обнаруживаем, что многие из этих свойств укрепляют в нас представление о волнах, распространяющихся в среде, и, таким образом, оправдывают введение этого понятия. Может оказаться, однако, что не все световые явления допускают это представление, и мы действительно встретимся с явлениями, которые не укладываются в эту схему. Но сейчас это не имеет значения. Когда нам встретятся факты, для которых первоначальные представления окажутся недостаточными, мы видоизменим их или заменим новыми. До этого они, повидимому, наиболее полезны и удобны.

РАССЕЯНИЕ СВЕТОВЫХ ВОЛН

Можно высказать возражение, что если пучок света, пересекающий комнату, состоит из длинного ряда волн, катящихся в эфире, то луч должен постепенно рассеиваться в стороны и края пучка не должны быть такими резко определенными, какими они нам кажутся. Это возражение вполне естественно, и такое рассеяние действительно существует, но оно настолько мало, что в опытах, подобных нашему, не наблюдается. Однако так происходит не всегда: в некоторых условиях рассеяние играет очень важную роль, вызывая самые поразительные и, пожалуй, самые прекрасные явления природы. Условия, при которых наблюдается рассеяние светового луча, определяются соотношением между длиной волны и шириной пучка. Длина волны света, который мы видим глазом,

составляет около десятитысячной сантиметра. Эта величина очень мала по сравнению с шириной пучка. Тенденция волн рассеиваться в стороны становится заметной, как мы увидим ниже, только если ширина пучка составляет малую долю сантиметра. Предположим, что местный шторм вызвал появление волн в какой-нибудь части океана и гонит их вперед. Если путь шторма достигает по ширине сотен километров, постепенное распространение волн в стороны сравнительно мало. Можно наблюдать это явление в значительно меньшем масштабе на неподвижной поверхности пруда, когда дуновение ветра поднимает рябь, движущуюся вперед и ограниченную со всех сторон спокойной водой. Даже в этих случаях соотношение между длиной волны и шириной луча значительно больше, чем в случае световых волн.

ИЗОБРАЖЕНИЯ

Рассмотрим теперь другие явления, которые также можно иллюстрировать волнами в нашем сосуде с водой. Прикосновение пальца к воде вызывает появление хорошо знакомых всем волн, расходящихся кругами. Они прибли-

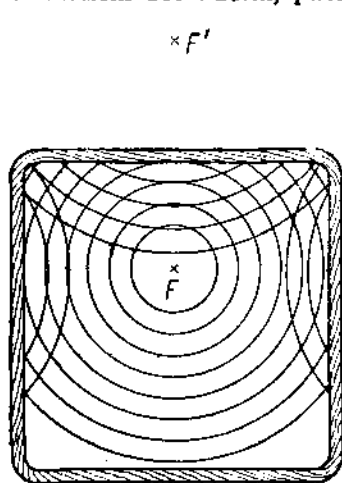


Рис. 11. Отражение круговых волн от стенки сосуда. Волны, расходящиеся первоначально из точки F , после отражения расходятся из F'

жаются к краю сосуда, затем отражаются, и мы видим, что их кольцевая форма все еще сохраняется; но центр новой системы кругов находится в точке вне сосуда. Если мы проведем прямую линию, соединяющую эту точку с той, в которой мы прикоснулись к воде пальцем, стенка сосуда пересечет эту линию под прямым углом. Отраженные волны кажутся расходящимися из новой точки (рис. 11).

Точно так же, когда волны расходятся во все стороны от источника света, например свечки, и падают на плоскую полированную поверх-

ность зеркала, волны, идущие от любой точки свечи, кажутся расходящимися от соответствующей точки за зеркалом. Когда некоторые из этих волн попадают в глаз, нам кажется, что они как будто исходят из этой точки и вследствие того, что таким образом отражается каждая точка свечи, а сам свет ничем не отличается от света настоящей свечи, нам кажется, что там помещена свеча; поэтому мы говорим про „изображение“ в зеркале, находящееся за ним на том же расстоянии, на котором сама свеча находится перед зеркалом.

Где бы мы ни находились, воспринимая эти отраженные волны, они кажутся нам исходящими всегда из одной и той же точки, потому что их форма, сферическая (в сосуде движение волн на поверхности воды происходит в одной плоскости и волны круговые) и они исходят из изображения как из центра. Когда мы двигаем глаз перед плоским зеркалом или смотрим на отражение в спокойной воде, нам кажется, что отраженные предметы сохраняют свое положение. Каждая точка изображения находится за отражающей поверхностью или за ее продолжением в точности на таком же расстоянии, как соответствующая точка предмета перед зеркалом. Прилагаемые рисунки (табл. I А, табл. II) разъясняют это.

ОТРАЖЕНИЕ ОТ КРИВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Когда волны отражаются от кривого зеркала, происходящие явления сложнее. В выпуклых зеркалах, которые часто применяются для декоративных целей, мы видим предметы комнаты тесно сгруппированными и уменьшенными; кроме того изображения несколько искажены и смещаются, когда мы двигаем головой. Можно опять применить наш сосуд с водой для иллюстрации этого явления.

В сосуд помещена изогнутая стенка, отражающая волны; ее выпуклость направлена внутрь сосуда. Мы видим теперь, что если на стенку падает, как и прежде, система круговых волн, то система отраженных волн искривлена сильнее, чем первая. Они также кажутся исходящими из точки за „зеркалом“, но расстояние этой точки от отражающей поверхности меньше, чем расстояние источника волн от той же поверхности (рис. 12). То же

явление происходит в случае света; его иллюстрирует рис. 13. Из этого опыта видно, что, когда мы смотрим на изображение в выпуклом зеркале, оно представляется нам значительно меньшим, чем сам предмет, потому что различные точки изображения, соответствующие точкам

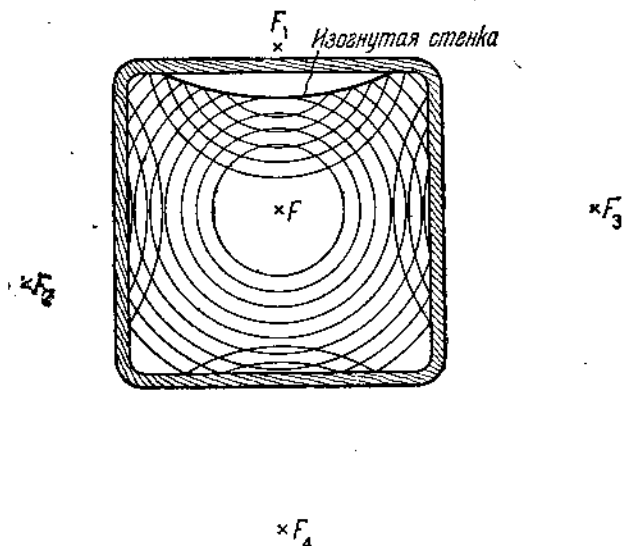


Рис. 12. Отражение волн от выпуклой поверхности. Центр отраженных волн F' теперь значительно ближе к отражающей поверхности, чем источник F . Отраженные волны в этом случае лишь приблизительно круглые, но их отличие от кругов заметно только, если взять в качестве отражающей поверхности большую дугу окружности

предмета, расположены более тесно. В выпуклом зеркале, висящем на стене, мы видим всю комнату в миниатюре (табл. III А).

Если отражающая поверхность искривлена в обратном направлении, результат отражения получается совсем другим (рис. 14). Волны, расходящиеся кругами, как и прежде, отражаются приблизительно круговыми; но при достаточной кривизне поверхности они уже больше не кажутся исходящими из точки за зеркалом. Напротив, они сходятся в точке перед ним. Если источник волн находится в центре круговой отражающей поверхности, волны возвращаются после отражения в исходную точку,

проходят через нее и затем расходятся. Если место возникновения волн расположено ближе центра отражающей

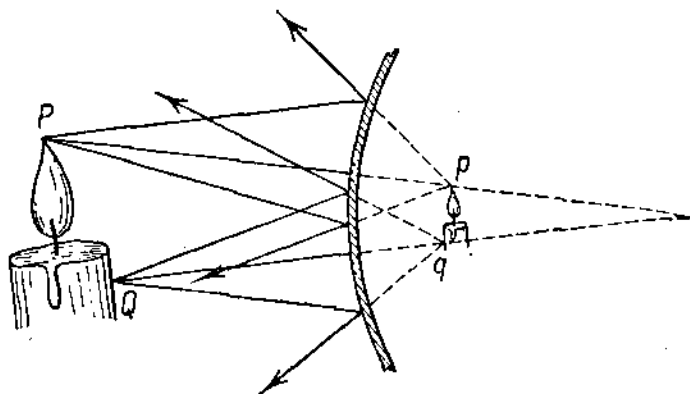


Рис. 13. Отражение от выпуклого зеркала. Лучи от точек P и Q после отражения кажутся исходящими от P' и Q' . Глаз, воспринимающий часть отраженных лучей, видит уменьшенное изображение свечи $P'Q'$

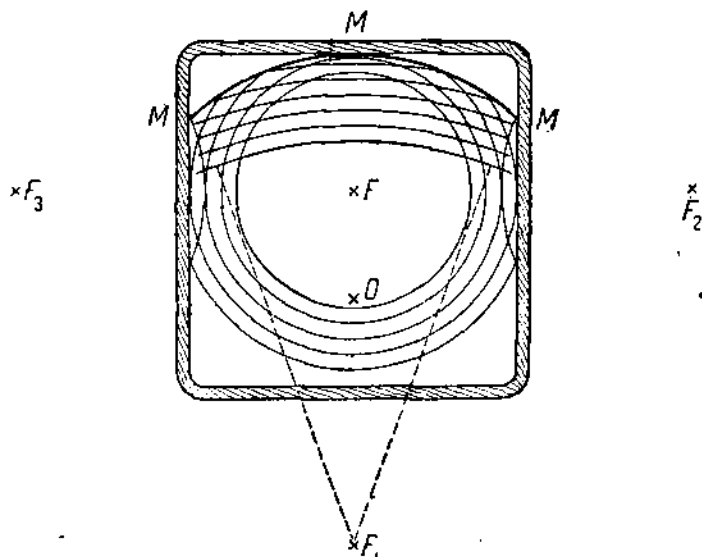


Рис. 14. Отражение волн от вогнутой поверхности

поверхности, точка встречи волн, или изображение, удаляется, и наоборот. Таким же образом, если мы

помещаем светящуюся точку в центре поверхности вогнутого зеркала, представляющей часть сферы, изображение получается также в центре; если мы двигаем источник к зеркалу, изображение удаляется от него, и наоборот (рис. 15). Точно так же, если мы смещаем источник кверху, изображение сдвигается вниз, и наоборот. Если поместить свечу перед зеркалом, изображение фитиля приходится

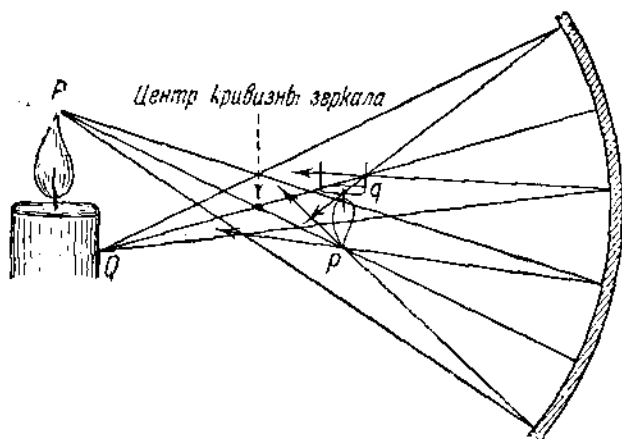


Рис. 15. Отражение света от вогнутого зеркала

внизу, а подсвечника по той же причине вверх, так что свеча кажется перевернутой; то же относится к правой и левой сторонам.

Когда источник волн в сосуде находится посредине между вогнутой поверхностью и ее центром, отраженные волны не имеют заметной кривизны и движутся в виде ряда параллельных, почти прямых линий. Они долгое время сохраняют свою форму и энергию. Волны, исходящие от изображения, расположенного за зеркалом, ослабевают вследствие расхождения; сходящиеся волны, дойдя до точки схождения, далее расходятся и, следовательно, так же ослабевают с расстоянием. Если луч света нужно направить на далекое расстояние, лучше всего устроить так, чтобы волны ни сходились, ни расходились. В случае сферического зеркала это приблизительно осуществляется, когда источник света находится посредине между центром и поверхностью зеркала. Но

сферическая форма не вполне удачна, если зеркало сколько-нибудь велико: с большим зеркалом невозможно получить совершенно плоских волн. Для этого требуется зеркало параболической формы, с источником света, помещенным в фокусе параболы.

ЗРЕНИЕ

Рассмотрим теперь несколько подробнее процесс „зрения“. Как наши глаза воспринимают детали предметов и судят об их форме и положении? Одним из существенных фактов является то, что когда световые волны падают на какой-нибудь предмет, они рассеиваются. Когда рассеянные лучи попадают в наш глаз, мы можем судить о направлении, по которому они пришли. Это обстоятельство позволяет нам „видеть“. Более того, мы можем определять расстояние, если только оно не слишком велико, по тому усилию, которое мы делаем для того, чтобы видеть предмет отчетливо. Мы „напрягаем“ глаза, если хотим рассмотреть какой-нибудь весьма близкий предмет, и оставляем глазные мускулы свободными для того, чтобы смотреть вдаль. Позже мы увидим почему. Но это не единственный путь для суждения о расстоянии, и я бы сказал — сравнительно мало действительный. Имеется по меньшей мере два других способа, которыми мы широко пользуемся. Первый из них заключается в определении положения предмета относительно других. Мы посмотрим, например, на небольшой предмет, скажем на часы, лежащие на столе в нескольких метрах от нас. Мы можем судить об их положении с значительной точностью; мы в состоянии оценивать их расстояние от наших глаз и высоту над полом. На чем основывается это определение? Отчасти на обзоре самого предмета и предметов, окружающих его, который мы делаем почти бессознательно, и на вычислениях, сделанных на основе данных этого обзора.

Прежде всего мы „пробегаем глазами“ по предмету. Глаз может двигаться так, что волны, рассеянные различными точками предмета, поочередно попадают на наиболее чувствительное место сетчатой оболочки. Мы получаем различные ощущения от отдельных точек предмета, и эти ощущения проходят как телеграммы по нервам,

ведущим в мозг. Там они сопоставляются, и долгие практика позволяет нам истолковывать их как свет, рассеянный часами. Вероятно, мы не осматриваем каждую точку очень тщательно; в действительности мы наверное очень далеки от этого. Но мы знаем общий вид часов, мы могли видеть, откуда они попали на стол, и может быть даже заметили, как их положили туда; мы сопоставляем все эти факты и подсознательно рассуждаем примерно так: мы находимся на таком-то расстоянии от стола, последний имеет обычную высоту, а часы лежат посредине его. Из таких наблюдений и выводов создается представление о положении часов. При этом мы, конечно, пользуемся своим многолетним опытом.

Нетрудно убедиться, что такой беглый осмотр предметов дает нам очень много для определения их положения. Когда мы не имеем возможности сделать это, сказать, где находится предмет, значительно труднее. Представим себе черный шар, подвешенный на нити, которая заметна только вблизи шара и теряется наверху, так что мы не видим точки подвеса. Размер шара нам неизвестен, и следовательно мы не можем призвать себе на помощь знание размера и общего характера наблюдаемого предмета, как мы это делали раньше. Закроем один глаз для того, чтобы не обсуждать сейчас весьма существенную роль второго глаза. Если мы теперь посмотрим на шар, то сказать, на каком расстоянии он находится, будет весьма затруднительно. Вероятно, мы начнем двигать головой из стороны в сторону для того, чтобы получить некоторое представление о том, насколько шар удален от стены или потолка, являющихся фоном, на котором он виден; и если мы сделаем в определенном месте этого фона какую-нибудь отметку, то кое-что о положении шара уже можно будет сказать. В этом случае мы также пользуемся беглым осмотром и подсознательным сопоставлением отдельных частей наблюдаемой картины.

ЗРЕНИЕ ДВУМЯ ГЛАЗАМИ

Пользуясь одновременно двумя глазами, мы находим, что это очень радикальный способ суждения о расстоянии. Принцип этого метода ничем не отличается от того, что мы рассмотрели выше. Два глаза видят не совсем

одну и ту же картину, и мы определяем расстояния, мысленно учитывая эту разницу. Глаза расположены близко друг к другу, и различие между двумя картинками весьма мало; поэтому приходится удивляться, что это дает нам так много. Если сравнить стереоскопические фотографии, изображенные на табл. IV, мы найдем эту небольшую разницу во всех деталях колоннады собора Св. Михаила. Обратите внимание, как расположены дальше колонны относительно тех, которые видны на переднем плане. На левом рисунке первые сильно сдвинуты влево по сравнению с правой фотографией. Эти два снимка сделаны с различных точек и представляют картины, видимые правым и левым глазом. Стереоскоп является оптическим устройством, в котором каждый глаз может видеть только картину, соответствующую его положению, что создает впечатление пространства. Факт, что это прекрасно получается, показывает, насколько хорошо два глаза, смотрящие одновременно, справляются с задачей оценки расстояний и взаимного расположения предметов. Этой способностью обладает лишь ограниченное число живых существ; к ним принадлежит человек, и, вероятно, немного других позвоночных. Большинство животных не может пользоваться бинокулярным зрением. Причина этого, как легко видеть, заключается в расположении их глаз.

ИЗОБРАЖЕНИЯ, СОЗДАВАЕМЫЕ ОТВЕРСТИЯМИ

Мы рассмотрели основные законы, управляющие отражением и рассеянием света от тел, на которые падают световые волны. Рассмотрим еще несколько примеров применения этих законов.

Когда солнечные лучи пронизывают листву дерева и оставляют на земле яркие световые блики, мы замечаем, что эти блики имеют не угловатую форму, а круглую; они образуют „пеструю тень“. Промежутки между листьями, сквозь которые прошли солнечные лучи, ограничены краями листьев и поэтому имеют угловатую форму; ясно, что не они определяют вид бликов на земле. Форма последних связана с формой солнечного диска, и мы сейчас увидим, как это получается.

Пусть круг наверху рис. 16 представляет Солнце,

и пусть A — маленькое отверстие в каком-нибудь непрозрачном экране, например в листе дерева. Лучи от какой-нибудь точки S , находящейся на краю солнечного диска, проходят сквозь отверстие A и попадают на землю в точке s ; здесь они рассеиваются. Некоторые из них

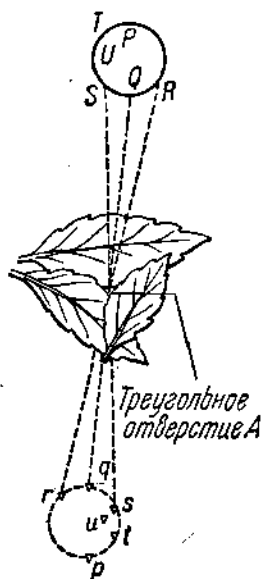


Рис. 16. Круг сверху представляет Солнце, а внизу — изображение Солнца на земле, образуемое при прохождении солнечного света сквозь треугольный просвет между листьями. Каждая яркая точка солнечного диска создает свой треугольный блик на земле; отдельные треугольники образуют на земле светлый круг с полутенью.

падают в наш глаз и, так как эти лучи по своему характеру не отличаются от солнечных, нам кажется, что в s находится источник, излучающий свет, подобный солнечному. Лучи от точки Q образуют изображение в q , и так каждая точка солнечного диска. Таким образом на земле получается изображение всего солнца. Чем меньше отверстие в точке A , тем отчетливее изображение. Это ясно из того, что лучи от любой точки S солнечного диска создают на земле световой блик, форма и размеры которого одинаковы с отверстием. Весь блик на земле можно рассматривать, как мозаику, составленную из маленьких бликов, образованных отдельными точками солнечного диска. На рисунке отверстие имеет треугольную форму A , и большой блик на земле составлен из многих треугольников, подобных A . Нет возможности нарисовать их все, но немногие из них для ясности нанесены на рисунок. Когда отверстие весьма мало по сравнению с размерами всего блика, тот факт, что каждой точке солнца соответствует не точка на земле, а блик, размерами с отвер-

стие, не играет существенной роли. Маленькое отверстие пропускает не много света, но создаваемое им световое пятно по причинам, указанным выше, совершенно кругло, как само Солнце. Большое отверстие пропускает много света, но зато чем отверстие больше, тем больше блик на земле теряет круглую форму и при-

нимает форму отверстия. Это поясняет рис. 16. Только менее яркие блики имеют круглую форму. Во время солнечных затмений блики становятся серпообразными.

Очевидно, такие изображения не должны иметь резких краев, потому что следы отверстий перекрываются по краям иначе, чем в середине. Размытые края, называемые полутенью, отделяют яркую часть изображения от тени.

Изображения, создаваемые отверстиями, можно показать на простом опыте. На расстоянии нескольких сантиметров от дуговой лампы помещено закопченное стекло. В слое копоти иглой сделано маленькое отверстие, и на экране, поставленном в нескольких метрах от лампы, получается светлый блик, в котором мы узнаем изображение вольтовой дуги. Если сделать несколько отверстий различной формы и размеров, каждое из них образует на экране одну и ту же картину. Только если отверстие слишком велико, его форма влияет на форму изображения.

Фотография этого опыта показана на табл. III В. Дуговая лампа находится справа, сзади, а маленький светлый квадрат представляет закопченное стекло, закрывающее входящий световой пучок. Оно выглядит светлым, несмотря на то, что покрыто сажей, потому что освещенность, создаваемая дугой, очень велика. Отверстия слишком малы, так что их нелегко рассмотреть на фотографии; увеличенное изображение стекла показано на табл. III С. Экран, на котором получают изображения, показан с обратной стороны. Хорошо заметно, что расположение изображений соответствует расположению отверстий в слое копоти, покрывающей стекло. Каждое изображение состоит из двух светлых бликов, являющихся изображениями углей вольтовой дуги, и все они совершенно похожи друг на друга, хотя отверстия имеют весьма различную форму.

Фотокамера с отверстием вместо объектива действует на том же принципе; она позволяет получать неискаженные фотографии, но требует очень больших экспозиций. Старинное изображение камеры с отверстием (камеры-обскуры) представлено на табл. IV А.

Когда какой-нибудь предмет, освещенный вольтовой дугой, находящейся на некотором расстоянии от него, расположен вблизи экрана, полутень почти невидна, а контур в силу этого получается очень резким.

Мы берем кусок картона, в котором вырезаны основные черты лица. Если мы отбрасываем его тень при освещении вольтовой дугой, рисунок обладает неприятными контрастами. Но если вольтову дугу заменить свечей, полутени окаймляют резкие контуры, что смягчает силуэт лица и придает ему более естественный вид.

ГЛЯНЕЦ

Мы встречаем интересный пример отражения света, наблюдая явление естественного и искусственного глянца, которым обладают некоторые ткани. Трудно точно сформулировать, что именно мы понимаем под глянцем. Повидимому, для него характерно отражение света, наблюдаемое тогда, когда мы не ожидаем его встретить. Глянцевитый предмет не просто хорошо отражает. Если бы это являлось признаком глянца, мы считали бы поверхность ртути

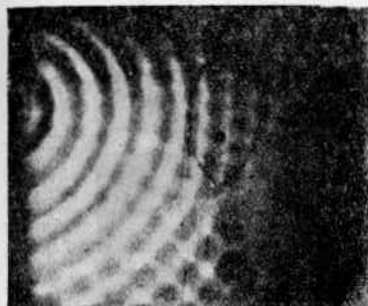


Рис. 17. Способ прядения, при котором ткань делается глянцевитой. Многочисленные волокна, расположенные параллельно друг другу, делают поверхность материи волнистой

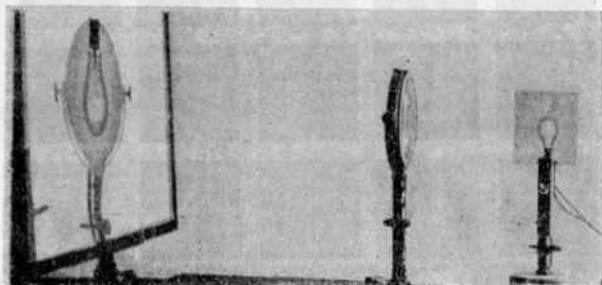
самым глянцевитым предметом, хотя никто не будет спорить, что она вообще не обладает глянцем. Мы можем исследовать природу глянца на простом опыте. Свет фонаря падает под некоторым углом на кусок сатина; для нашей цели лучше подходит цветная ткань. Источник света находится за нами, и свет, отраженный зеркалом на материю, вообще говоря, не будет попадать к нам в глаз. Но если кусок сатина вращать в его плоскости, нам всем видно, что он как бы вспыхивает на короткое время два раза за полный оборот. Во время опыта желательно погасить в комнате весь посторонний свет. Что же вызывает эти вспыхивки? (Табл. IV B.)

Если материю исследовать с помощью увеличительного стекла, видно, что нити основы расположены параллельно друг другу. Материя соткана таким образом, что на одной ее стороне, именно на блестящей, волокна проходят над несколькими поперечными нитями прежде, чем перейти на другую сторону; это видно на рис. 17. Таким

ТАБЛИЦА V



А. Фотография показывает явление, обратное изображенному на рис. 22. Волны исходят из некоторой точки слева и проходят над стеклянной пластинкой, вырезанной в форме линзы. Волны первоначально расходятся; линза нарушает их расхождимость: в правой части фотографии они становятся прямолинейными. Точка—источник волн, совпадает с главным фокусом линзы. Этот снимок сделан при мигающем освещении, вспышки которого проходились в такт с движениями штифта, возбуждающего волны периодическим погружением в жидкость (стр. 39).

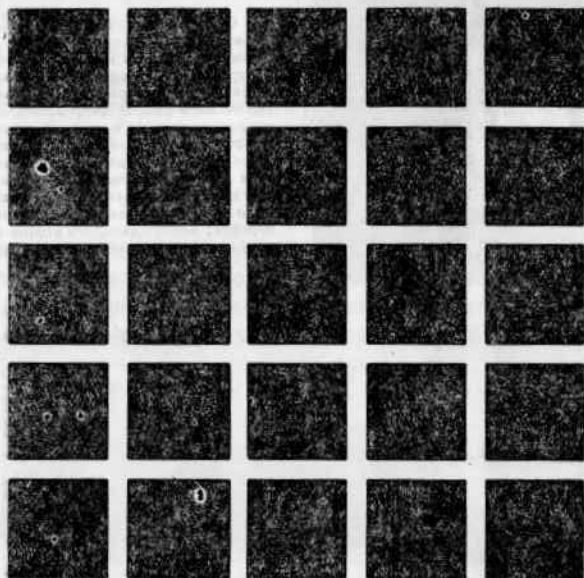


В. На фотографии слева видно изображение накаленной нити лампы, находящейся справа; это изображение получено при помощи линзы, стоящей между экраном и лампой. Перед последней в течение части времени экспозиции помещался квадратный экран, закрывающий нить, потому что в противном случае она очень сильно засветила бы пластинку. На экране перевернутое изображение нити обусловлено ее собственным излучением, тогда как перевернутая тень колбы лампы получилась вследствие освещения источником, находящимся справа, за пределами фотографии. То же освещение является причиной появления неперевернутой тени линзы и ее штатива, потому что в этом случае свет не проходит сквозь линзу (стр. 41).

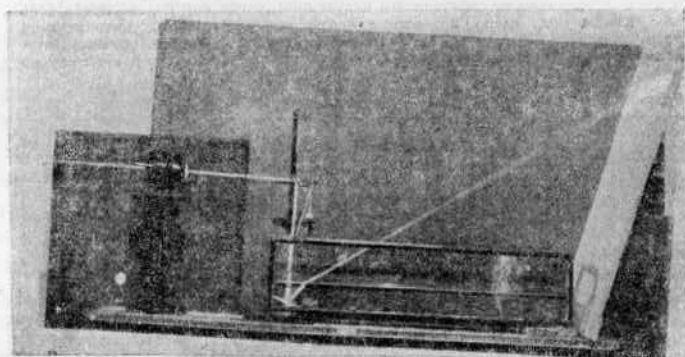


С. Правый и левый край среднего квадрата имеют различную видимую яркость, хотя в действительности поле затушено равномерно. Край, граничащий с более темным квадратом, кажется светлее, чем другой, прилегающий к светлому. Вследствие этого весь рисунок оставляет впечатление ступенчатой поверхности (стр. 54).

ТАБЛИЦА VI



А. Места, где белые пятна пересекаются, оставляют впечатление мелькающих теней (стр. 55).



В. Опыт, показывающий преломление светового пучка при выходе его из воды в воздух (стр. 61).

образом на этой поверхности имеются параллельные группы волокон. Когда в нашем опыте свет, отраженный от ткани, ярко вспыхивает, в это время волокна располагаются перпендикулярно биссектрисе угла между лучами, идущими от источника света к ткани, и от последней в наш глаз (рис. 18); поверхность материи — волнистая, и отражение света происходит на изгибах волн. Каждое волокно, конечно, должно иметь при этом хорошо отражающую поверхность; явление особенно усиливается тем, что волокна расположены параллельно. С „левой“ стороны ткани, где такой правильности в расположении нет, глянец значительно слабее. В основе этого явления, очевидно, лежит правильность расположения нитей. То же самое получается на свежем вспаханном поле, когда края борозд сглажены плугом, и на освещенной поверхности воды, покрытой рябью.

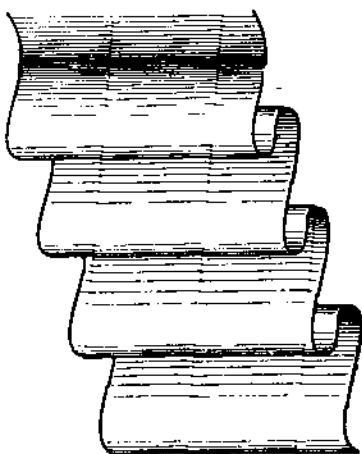


Рис. 18. Волнистая ткань отражает свет по многим направлениям

Основываясь на этом явлении, ткань иногда искусственно гофрируют. Ее пропускают для этого между горячими вальцами, на поверхности которых вырезаны параллельные желобки.

ВОЛШЕБНОЕ ЗЕРКАЛО

Обратимся теперь к японскому „волшебному зеркалу“. Оно обладает совершенно особым свойством. С передней стороны оно почти плоское, и кажется нет оснований ждать от него каких-нибудь неожиданностей. Сзади такое зеркало имеет выпуклые знаки, оставшиеся от формы, в которой оно было отлито. Если зеркало поместить в световой пучок фонаря так, чтобы отражение от передней его стороны попало на экран, на последнем появляются следы знаков, имеющих на задней стороне.

Это выглядит так, как если бы эти знаки просвечивали сквозь зеркало, что, очевидно, невозможно, так как оно сделано из массивного металла. В этом и заключается странное явление, которое в свое время казалось людям, наблюдающим его, волшебным. Имеется, однако, простое объяснение, данное 50 лет тому назад профессором Айртоном. Это объяснение основано на рассмотренном нами принципе, и оно является иллюстрацией законов отражения света от кривых поверхностей.



Рис. 19. Японский рабочий, полирующий „волшебное“ зеркало. Рисунок является частью японской гравюры, находящейся в Британском музее

Профессор Айртон и его друг профессор Перри некогда сильно интересовались японским бытом. Зеркала вроде такого „волшебного“ — весьма обычный предмет. Айртон и Перри с удивлением обнаружили, что лишь небольшое число зеркал наделено „волшебными свойствами“. Эти свойства были сами по себе достаточно странны; кроме того

никто не знал, почему только одно или два зеркала из сотни обладают ими. Айртон и Перри принялись за исследование этого вопроса; они выяснили, что в Китае было дано много странных объяснений, ни одно из которых не могло считаться удовлетворительным.

В конце концов они нашли правильное объяснение, на которое их натолкнуло случайное наблюдение. Одно из зеркал имело с задней стороны глубокую впадину, выбитую чем-то вроде большого гвоздя. Айртон и Перри увидели след этой впадины в световом блике, отраженном передней стороной зеркала. Они связали этот факт с процессом производства зеркал. После того как японский рабочий отливает зеркало со знаками на задней стороне, он кладет его на стол и начинает сглаживать неровности передней стороны с помощью шлифовального инструмента. Это показано на рис. 19. Вследствие сильного давления зеркало прогибается. Рабочий проходит рядом параллельных движений равномерно всю

поверхность зеркала, в результате чего более толстые его части, расположенные над знаками, выступающими на задней стороне, прогибаются слабее других. Таким образом, более тонкие места зеркала могут до некоторой степени уклоняться от действия шлифовального инструмента, и когда шлифовку прекращают, они оказываются слегка выпуклыми над общим уровнем окружающей поверхности зеркала. Закончив одну систему параллельных шлифовальных движений, рабочий делает другую, перпендикулярную к первой, и повторяет такие операции во многих направлениях. В конце концов зеркало оказывается несколько вмятым в местах, соответствующих знакам на задней стороне; оно представляет собой при этом собрание выпуклых зеркал. Волны, падающие на зеркало, не отражаются правильно, они сходятся и расходятся от отдельных его частей, и характер этих нарушений нормальной картины непосредственно связан с выпуклыми узорами на обратной стороне. Любопытно, что такие малые отклонения от правильной формы поверхности могут сказываться столь заметно. Может быть, это станет понятнее, если вспомнить, что мы наблюдали в других опытах; когда на поверхности воды мы вызывали появление волн в сосуде, тени последних на экране были видны очень отчетливо; эти тени получались в результате отклонения света волнами, сами же волны было нелегко рассмотреть, глядя непосредственно на поверхность воды. Вероятно, вы неоднократно замечали „волны“, появляющиеся на потолке при отражении солнечных лучей от лужи за окном.

Глава II

ГЛАЗ И ЗРЕНИЕ

Мы видели, что свет можно рассматривать как волновое движение, распространяющееся от источника, которое рассеивается и отражается или изменяется как-нибудь иначе различными предметами, которые волны встречают на своем пути.

Когда свет попадает в глаз, он сообщает нам ряд сведений об источнике, от которого он пришел, и об испытаниях, пройденных им в пути. В частности, он говорит нам о последней встрече с каким-либо предметом, происшедшей непосредственно перед тем, как он попал к нам в глаз, и, таким образом, свет позволяет обладателю глаза „видеть“ этот предмет.

В глаз попадает много лучей, исходящих от различных источников и рассеянных многими предметами; для того чтобы дойти до сознания, эти лучи должны быть рассортированы. В задней части глаза находится сетчатая оболочка — светочувствительная поверхность. Если бы каждая система волн, входящая в глаз, рассеивалась по всей сетчатке, разобраться было бы, конечно, весьма трудно. Но у глаза имеется приспособление, которое собирает вместе волны, исходящие из каждой точки пространства вне глаза, в одной определенной точке сетчатки. Таким образом все детали видимой картины собраны на сетчатке в соответствующих местах друг относительно друга. Все это при помощи сложной системы нервов передается затем в мозг. Мы можем сказать, что на сетчатке образуется картина, но мы не должны понимать этого слишком буквально. Процесс зрения не требует образования маленького изображения в глазу, обяза-

тельно переданного правильно в отношении цвета и деталей, как на белой бумаге или на матовом стекле фотографического аппарата. Иногда ошибочно считают, что после того как такое изображение получается, его рассматривают каким-то мысленным взором, подобно тому как мы смотрим картину на стене.

Рассортировать беспорядочную смесь различных излучений позволяет свойство света, заключающееся в том, что он распространяется в различных средах с разной скоростью. Например, в стекле скорость света примерно в полтора раза меньше, чем в воздухе; в воде — $1\frac{1}{3}$ раза. Когда движущаяся волна входит под некоторым углом в среду, в которой ее движение замедляется, она отклоняется от своего пути, потому что одна часть волны задерживается раньше другой. Хорошо известный пример этого изменения направления движения можно видеть на морском берегу, где катящиеся волны всегда стремятся расположиться параллельно берегу, независимо от того, как они двигались в открытом море. Их скорость уменьшается по мере того, как они подходят к мелкому месту и, таким образом, те части системы волн, которые находятся впереди остальных, задерживаются, пока волны полностью не выпрямятся и не будут следовать контурам берега.

Таким же образом марширующие солдаты бывают вынуждены отклониться от направления своего движения, когда они переходят на труднопроходимый грунт (рис. 20).

Для иллюстрации этого явления можно показать следующий опыт. Пара роликов, насаженных на общую ось, приводится на столе в движение таким образом,

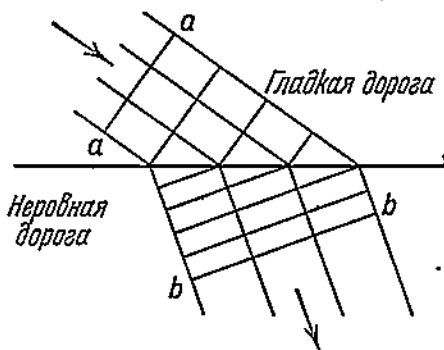
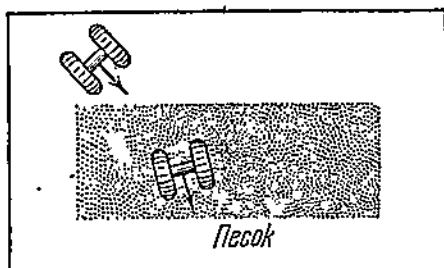


Рис. 20. Линия *aa* и другие, параллельные ей, представляют шеренги солдат, марширующих на гладком месте. Входя на неровное место, ряды отклоняются и становятся параллельными *bb*, двигаясь поперекнему сожмнутым строем

что они катятся под углом на место стола, покрытое песком, по которому движение затруднено. Ролик, достигающий песка первым, несколько задерживается, и направление дальнейшего



движения меняется, приближаясь к перпендикуляру к линии, ограничивающей место, засыпанное песком (рис. 21).

Нетрудно теперь показать, как можно собрать систему движущихся волн в одну точку. Для этого необходимо лишь устроить так, чтобы волны пересекали

Рис. 21. Часть рисунка, заполненная точками, представляет песок, насыпанный на стол. Пара свободно вращающихся роликов катится по направлению к песку и сворачивает со своего пути, достигая его

пространство, в котором их движение замедляется. Если это пространство имеет соответствующую форму, волны принимают изогнутую форму, и так как все элементы волны двигаются вперед в направлении, перпендикулярном ее фронту, то движение постепенно сходится в точку, в которой сконцентрируется вся энергия волн. Такая точка называется фокусом. Волны проходят через фокус и далее расходятся постепенно увеличивающимися кругами.

Это явление можно показать в нашем сосуде с водой. Стекла́нная пластинка вырезана в форме линзы и положена на дно сосуда. Над ней будет более мелко, чем в других местах, и волны, проходя над пластинкой, замедляют свое движение. Волны возбуждаются колебанием деревянной планки, расположенной параллельно

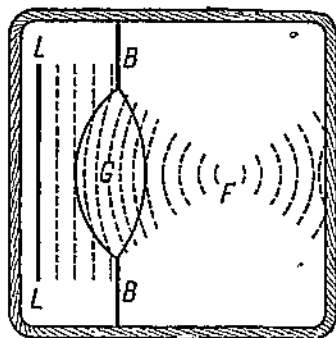


Рис. 22. Вид сосуда с водой сверху. Стекла́нная пластинка G , имеющая форму линзы, положена на дно. Она уменьшает глубину, которая обычно составляет 1 см. Над мелким местом волны движутся медленнее. Вследствие этого они сходятся в точке F ; после прохождения F они расходятся. Волны исходят от планки L , периодически погружающейся в воду; экраны BB' не позволяют волнам обходить линзу.

поверхности воды; планка прикреплена к концу колеблющейся пружины и периодически погружается в воду. Сходящиеся волны хорошо видны, хотя и не так хорошо, как в случае света (рис. 22; см. также табл. VA).

Когда стеклянную линзу помещают на пути световых волн, ее более толстая центральная часть задерживает волны сильнее, чем тонкие края, и свет сходится в фокус, пройдя который лучи снова расходятся. Это явление можно показать на простом опыте, представленном на рис. 23 и, конечно, хорошо знакомом всем.

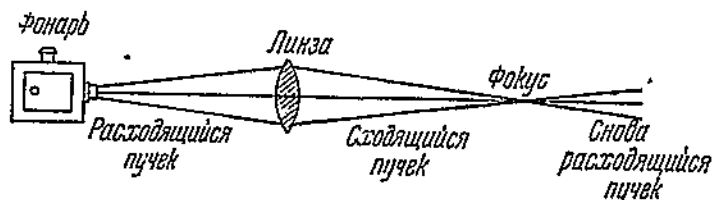


Рис. 23. Действие линзы. Свет фонаря сходится в фокусе, а затем расходится

Наш сосуд с водой дает лишь некоторое представление о природе этого явления, но не больше, оставляя ложное впечатление, что „фокусирующее“ действие линзы недостаточно полно. На самом деле это не так. Лучи, исходящие от точечного источника, собираются в очень малую точку, если только линза сделана соответствующим образом. Это происходит потому, что световые волны очень малы по сравнению с размерами линзы. В каждом сантиметре умещаются тысячи волн, и поэтому цуг волн рассеивается очень слабо. Когда он направляется к какой-нибудь определенной точке, он очень мало отклоняется от своего пути. Этот факт является одним из примеров очень важного закона, с которым мы встретимся еще неоднократно. Световые волны столь малы, что от шлифовальщика требуется величайшая точность работы для того, чтобы при изготовлении линз не выйти из пределов необходимых допусков. Предельная точность этой работы недостижима, ибо она настолько велика, что сами молекулы стекла можно рассматривать как отдельные тела. Стекло сколько-нибудь совершенной линзы должно быть абсолютно однородным, что является крайне тяжелым

требованием, если размеры ее велики; расчет формы поверхности очень сложен, и шлифовка должна соответствовать ему с точностью, значительно превышающей толщину волоса. Для многих целей, однако, столь большая точность излишня, и тогда изготовление линз не требует от оптика такой тщательности.

Если мы будем приближать источник света к линзе, фокус удаляется. Это вполне согласуется с высказанной

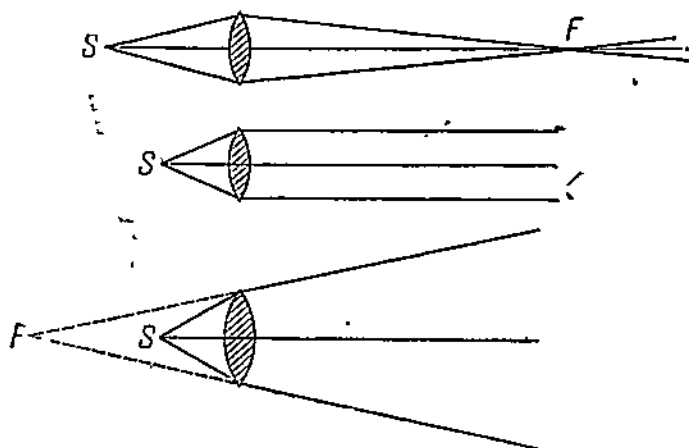


Рис. 24. Собирающее действие линзы при разном расположении линзы и источника

нами точкой зрения о причине схождения лучей. Линза вызывает определенную задержку в движении волн, проходящих через ее середину, и эта задержка в свою очередь вызывает изменение формы волн, заставляя их сходиться, тогда как до этого они расходились. Очевидно, чем сильнее расходится первоначальная волна, тем меньше будет она сходиться в результате действия линзы, как это видно из рис. 24. Если источник приблизить к линзе достаточно близко, волны после прохождения ее вообще перестают расходиться. Все действие линзы сводится тогда к уничтожению расходимости лучей, так что волны делаются плоскими и двигаются далее не расходясь и не собираясь в фокус. Когда это явление имеет место, расстояние от источника до линзы называют «фокусным расстоянием» линзы, а точку, где находится

источник, называют „главным фокусом“. Очевидно, можно обратить это явление: плоские волны, т. е. волны, исходящие от весьма удаленного источника, сходятся в главном фокусе линзы.

Если источник придвинуть к линзе, расходимость лучей только уменьшается: свет продолжает расходиться так, как если бы он исходил от более удаленного источника.

Во всех рассмотренных случаях источник, центр линзы и фокус располагались на одной прямой. При этом середина линзы действовала как плоская стеклянная пластинка: лучи, проходящие через центр, не отклонялись.

Различные свойства линз, о которых мы здесь говорили и которые легко могут быть показаны в аудитории, оправдываются на самом деле лишь приблизительно. Можно представить себе линзу, которая с большой точностью собирает в фокус лучи, исходящие из какой-нибудь точки; но эта линза будет хорошо действовать только при вполне определенном расстоянии источника. Не следует думать, что фокусирующее действие будет таким же хорошим при другом расстоянии. Линза может хорошо действовать только на определенных расстояниях, но не на любых. Вообще говоря, она будет достаточно хороша. Например, описанные выше опыты прекрасно получаются со сравнительно плохими линзами. Совсем другое дело, когда речь идет об изготовлении микроскопа, или телескопа, или фотографического аппарата. Эти задачи — весьма трудны. Каждый фотограф знает, как сильно отличается простая ландшафтная линза от сложного фотографического объектива.

ИЗОБРАЖЕНИЕ, СОЗДАВАЕМОЕ ЛИНЗОЙ

После того как мы видели, что лучи, исходящие от точки с одной стороны линзы, собираются в фокус с другой стороны, легко понять, как линза образует изображение на экране.

Рассмотрим, например фотографию, приведенную на табл. V В, представляющую изображение электрической лампы. Линза, ребро которой видно в центре фотографии, направляет лучи от лампы, находящейся справа, в фокус на экране слева. Лучи исходят от каждой точки света-

шейся нити и, проходя сквозь линзу, сходятся на экране. Для этого положение линзы и экрана специально подобрано. Каждая пара соответствующих точек предмета и изображения находится на одной прямой с центром линзы. После падения на экран в P лучи, исходящие первоначально из P , рассеиваются, и глаз, воспринимающий часть рассеянного света, видит это так, как если бы в P был источник, подобный P . Так как изображение получается от каждой точки предмета, то на экране мы видим изображение всего предмета. Оно перевернуто, а его размеры зависят от расстояний нити лампы и ее изображения от линзы.

Этот принцип применяют во многих оптических устройствах, например, в фотографическом аппарате. В этом случае вместо экрана (таб. V B) помещают светочувствительную пластинку. Конечно, ее защищают при этом от постороннего света „мехом“ камеры. Изображения предметов получаются на пластинке сильно уменьшенными.

ОПТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ГЛАЗА

В принципе оптическое устройство глаза подобно устройству фотоаппарата. Линзообразное тело L_2 (рис. 25) и жидкости L_1 и L_3 , заполняющие пространство перед

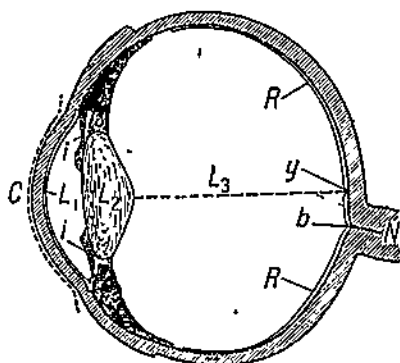


Рис. 25. C — роговая оболочка; R — сетчатая оболочка; N — оптический нерв; L_1 — водянистая жидкость; L_2 — хрусталик; L_3 — стекловидная жидкость; i — радужка; b — зрачковая пленка; y — зрачок

и за линзой, уменьшают скорость света, проходящего сквозь всю систему, причем L_2 сильнее, чем L_1 и L_3 ; это замедление в центре больше, чем на краях глаза. Таким образом расходящиеся волны, попадая в глаз, сходятся на сетчатке, которая соответствует матовому стеклу фотографического аппарата. И в этом случае изображения предметов сильно уменьшены и перевернуты.

Матовое стекло фотоаппарата можно передвигать

гать вперед и назад. Это необходимо, потому что фокус лучей, исходящих от удаленной точки, ближе к линзе, чем в случае близкой точки. Всем знакома типичная поза фотографа, приспособляющего свой аппарат к расстоянию, на котором находится его модель.

Мы обладаем способностью наблюдать детали предметов, находящихся на весьма различных расстояниях, и, следовательно, наши глаза должны каким-то образом фокусироваться подобно фотографической камере. Это делается при помощи мускулов, меняющих форму глаза и систему его линз. Например, когда мы хотим читать мелкий шрифт, мы делаем определенное усилие, сокращая мускулы глаза; иногда при этом мы даже щуримся. Таким образом глаз в целом и линзовая система в частности, делается толще в направлении спереди назад и уменьшаются в поперечном направлении. Вследствие этого увеличивается собирающая сила системы. Большинство из нас может сокращать фокусное расстояние глаза до тех пор, пока наблюдаемый предмет не приблизится до 15—20 см; предметы на еще более близком расстоянии мы видим уже нерезко. Чем ближе мы можем придвинуть глаз к предмету, не вызывая ухудшения резкости, тем больше размер изображения на сетчатой оболочке и тем больше деталей мы различаем у наблюдаемого предмета.

ОПТИЧЕСКИЕ НЕДОСТАТКИ ГЛАЗА И СРЕДСТВА ИХ ИСПРАВЛЕНИЯ

Нормальный глаз часто может различать отдельные веточки дерева, находящегося на расстоянии 50 м, когда оно проектируется на фоне неба, и в то же время глаз приспособляется к наблюдению мельчайших деталей, находящихся на расстоянии нескольких сантиметров. Это свойство дает некоторое представление о тонкости системы, позволяющей фокусировать на сетчатой оболочке изображения отдельных объектов. Мы знаем, что не все глаза одинаковы: некоторые лучше видят на близком расстоянии, другие — на далеком. Встречаются и такие, которые не видят отчетливо ни при каком расстоянии предмета. Эти отклонения от нормы можно пояснить несколькими опытами,

Мы имеем прибор, имитирующий глаз. Большая колба, изображенная на рисунке, наполнена жидкостью, содержащей небольшое количество взвешенного вещества, позволяющего легко следить за путем световых лучей. В S находится вольтова дуга или „точечная“ лампа, являющаяся достаточно малым источником света. Непосредственно перед колбой помещена линза, подобранная таким образом, что свет от лампы фокусируется на задней стенке колбы (рис. 26).

Колба с жидкостью и линза имитируют глазное яблоко и хрусталик (рис. 25); сетчатке соответствует

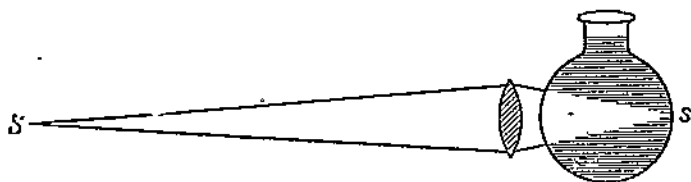


Рис. 26. Лучи от дуги S фокусируются линзой и жидкостью, находящейся в колбе. Фокус находится на задней стенке колбы. Линза и жидкость грубо имитируют оптическую систему глаза; задняя стенка колбы соответствует сетчатке

задняя стенка колбы, а лучи, фокусирующиеся на ней, соответствуют свету, входящему в глаз и собирающемуся на сетчатке. Лучи, исходящие из точки, собираются также в точку. Как мы уже видели, это очень важный факт, ибо таким путем известия, получаемые с помощью световых лучей, могут истолковываться беспрепятственно вследствие того, что лучи от различных точек попадают в разные места сетчатки и таким образом не мешают друг другу.

Если источник S двигается вверх или вниз, вправо или влево, изображение также перемещается, но в обратном направлении. Следовательно, имеет место переверачивание, которое, как мы уже видели, неизбежно сопровождает действие линзы. „Картина“, получающаяся на сетчатке, перевернута. Возникает вопрос, почему мы не видим предметы также перевернутыми вниз головой? Потому, что когда мы впервые начинаем отождествлять наши осязательные ощущения с тем, что видим, мы приучаемся отличать верх от низа, верхнюю часть предмета от его основания. Но мы никогда не замечаем, как это

происходит; нам достаточно привыкнуть к этому путем опыта. Большинство людей не подозревает, что изображение на сетчатке перевернуто, потому что они не встречали никаких указаний на то, что это имеет место. Пока

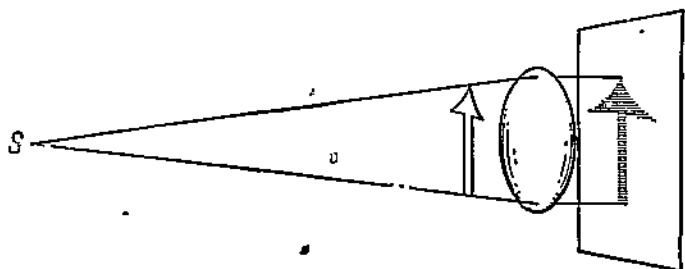


Рис. 27. Источник света S отбрасывает тень на экран, поставленный близко к предмету. Введение не слишком короткофокусной линзы между предметом и экраном, не меняет тени сколько-нибудь существенно, и лишь несколько уменьшает ее размеры.

мы не наблюдаем действия линзы и не узнаем устройства оптической системы глаза, до тех пор действительность не наталкивает нас на эту мысль.

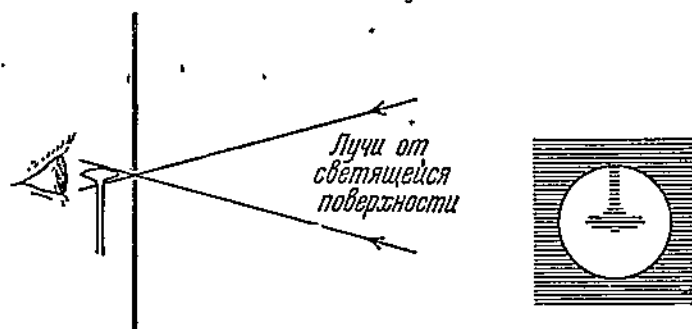


Рис. 28 и 29. Глаз расположен вплотную к отверстию в картоне. Свет от яркой поверхности, например от неба, проходит сквозь отверстие и освещает сетчатку, так что отверстие кажется большим. Если булавочную головку поместить между отверстием и глазом, тень на сетчатке, согласно предыдущему опыту, должна быть перевернутой. В действительности она кажется перевернутой.

Можно показать это явление на простых опытах. Мы помещаем линзу на небольшом расстоянии от экрана, как на рис. 27, и вплотную к ней ставим какой-нибудь предмет. Легко видеть, что линза не влияет на тень, отобра-

сылаемому предметом на экран: эта тень остается неперевернутой.

Проткните иглой кусок картона и, держа его вплотную к глазу, посмотрите сквозь отверстие на какую-нибудь

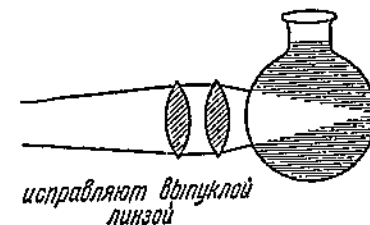
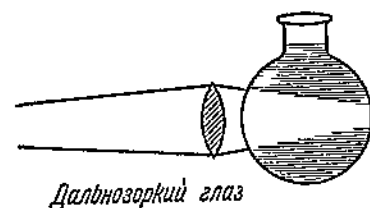
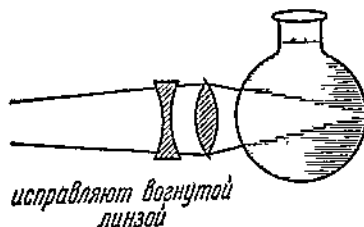
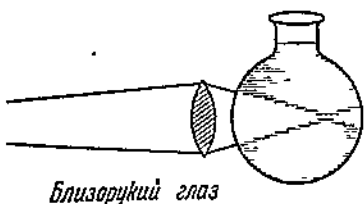


Рис. 30 и 31. Как исправляются недостатки дальновидного и близорукного глаза

яркую поверхность, например на небо или на абажур люстры (рис. 28). Вы увидите тогда довольно большое светлое поле, потому что при этом будет освещена значительная часть сетчатки. Отметим, что хрусталик не может свести в одну точку лучей, сильно расходящихся после прохождения сквозь маленькое отверстие. Теперь поместите булавку таким образом, чтобы ее головка пришлась между глазом и отверстием. Может быть вам потребуется некоторое время, чтобы попасть в нужное место. Тень на сетчатке должна быть не перевернутой (рис. 27), но мозг воспринимает ее перевернутой. Что при этом „видит“ глаз, показано на рис. 29.

Укажем, что изображение на сетчатке отличается от предмета не только тем, что оно перевернуто, но также и тем, что оно значительно уменьшено.

Мы имеем столько же оснований утверждать, что мы должны видеть предметы перевернутыми, сколько и для того, чтобы считать, что мы должны видеть их

значительно меньшими, чем они есть в действительности. Если в опыте, представленном на рис. 26, источник

света S удалить от модели глаза, лучи, которые до этого собирались в фокусе на самой сетчатке, соберутся раньше, чем они достигнут ее. Если источник S приближать к глазу, лучи, достигая сетчатки, не успеют собраться в фокус. В каждом из этих случаев изображение получается нерезким. То же наблюдается и в глазу, если не принимается мер к устранению этого явления. Хрусталик и остальные оптические элементы глаза меняются под действием различных мускулов, и в некоторых пределах зрение может приспособливаться к условиям. Эта способность „аккомодации“ очень различна у разных глаз. Нормальный глаз может очень отчетливо видеть детали какого-нибудь ландшафта и свободно читать книгу, расположенную на расстоянии около 25 см. Но некоторые глаза устроены так, что удаленные предметы они видят неотчетливо и только близкие предметы ясно. Такие „близорукие“ глаза можно исправить линзами, более тонкими посредине, чем по краям; они называются вогнутыми линзами. Так как близорукие глаза собирают лучи слишком сильно, то они должны исправляться линзами, рассеивающими лучи, вследствие того, что задержка волн на их краях больше, чем посредине. Наоборот, глазам, которые недостаточно сильно собирают лучи, можно помочь выпуклыми линзами — более толстыми посредине, чем по краям. Очень многие люди к старости встречают необходимость применять такие линзы, потому что хрусталик со временем становится более плоским (рис. 30 и 31).

УВЕЛИЧЕНИЕ

Чем больше размеры изображения на сетчатке, тем легче различать детали предмета, предполагая, что изображение каждой его точки получается резким. Для того чтобы сделать изображение по возможности большим, следует как можно ближе приблизить предмет к глазу; при этом предел возможного приближения ставится способностью оптической системы глаза менять угол расхождения лучей и делать их сходящимися в фокусе на сетчатке. Если мы хотим как следует рассмотреть предмет, мы приближаем его как можно ближе к глазу; как известно, при этом очень скоро мы достигаем такого

расстояний, на котором изображение теряет свою отчетливость. На этом расстоянии оптическая система глаза теряет способность фокусировать. Дальнейшее приближение предмета уже не приносит пользы: изображение увеличивается, но детали его становятся неясными. Это затруднение устраняют при помощи линзы, фокусирующей действие которой складывается с действием глаза;

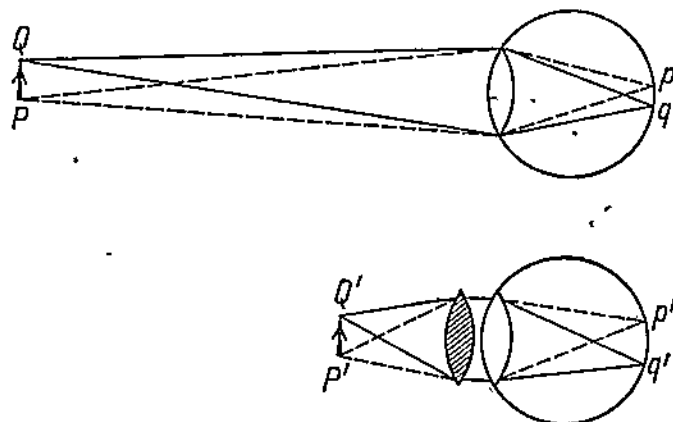
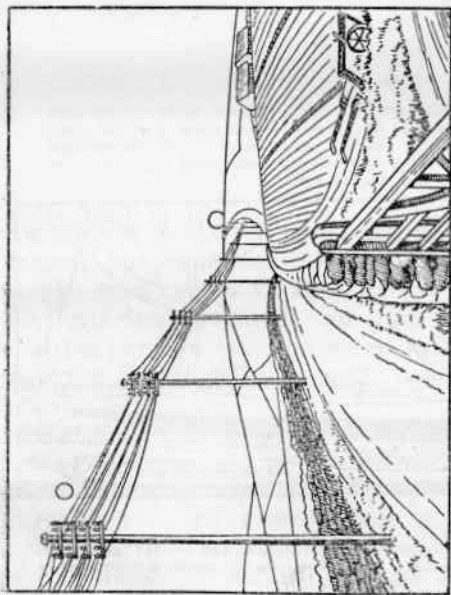


Рис. 32. Невооруженный глаз не может видеть отчетливо предмета, находящегося ближе PQ , изображение которого pq . С помощью линзы предмет можно придвинуть гораздо ближе и получить тогда изображение $p'q'$, значительно превышающее pq

мы имеем в виду обычные увеличительные стекла различных типов. С такими линзами (рис. 32) рассматриваемый предмет можно приблизить к глазу гораздо сильнее и увеличение размеров изображения не происходит за счет резкости. Обычная лупа, которой пользуются для чтения мелкой печати или для рассматривания мелких деталей, увеличивает несильно, и ее устройство очень несложно. Чем больше требуемое увеличение, тем больше тщательности приходится проявлять оптику, шлифующему линзы; чрезвычайно много работы затрачивается на изготовление луп, применяемых ботаниками, геологами или часовщиками. Однако существует некоторый предел, не зависящий от искусства оптики. Рассматриваемый предмет не всегда можно помещать достаточно близко к глазу для получения требуемого увеличения. В таких случаях применяют совершенно иной метод.

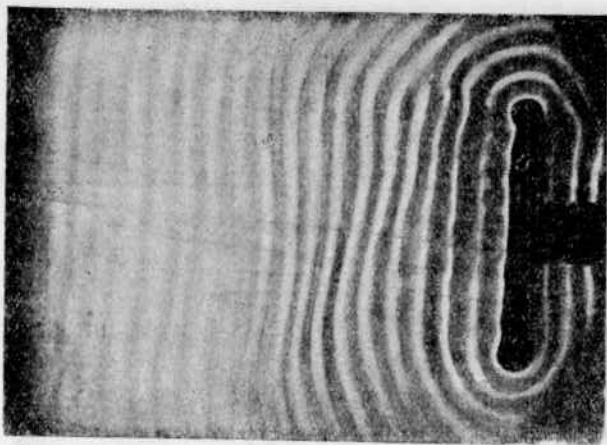


А. Луна, находящаяся на горизонте, кажется большой по сравнению с телескопическими столбами на заднем плане и малой по сравнению с балочными столбами. Этот оптический обмен не должен иметь места на рисунках, подобных этому, хотя его можно имитировать, если поочередно закрывать сперва одно изображение Луны, а затем другое. Для наблюдения этого психологического явления необходима реальная обстановка (стр. 56).

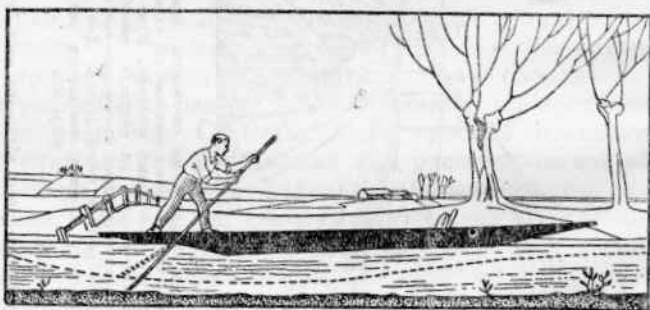


В. На этой фотографии облачного неба Луну найти не легко. Она получилась в виде маленького серпа, находящегося на равных расстояниях от правого и левого краев снимка в верхней его части. Так как Луна сжимает угол в полградуса, ее размеры на фотографии должны составлять приблизительно одну стотысячную часть фокусного расстояния объектива аппарата; эта дробь представляет собою отношение размера предмета к его расстоянию при вышеуказанной угловой величине (стр. 57).

ТАБЛИЦА VIII



А. Волны проходят над прямоугольной стеклянной пластинкой, положенной на дно сосуда; их направление меняется только над пластинкой (стр. 61).



В. Пуширная линия, проходящая под лодкой, изображает дно реки, каким оно кажется человеку, находящемуся в лодке и смотрящему вниз (стр. 62).

МИКРОСКОП И ТЕЛЕСКОП

Вспомним, как много значат для нас эти инструменты. Кроме мира, наблюдаемого вооруженным глазом, имеется широкий класс объектов, находящихся за пределами возможностей нашего зрения. Не вызывает сомнения, что существование возможно и без очков, увеличительных стекол, микроскопов и телескопов, но справедливо так-

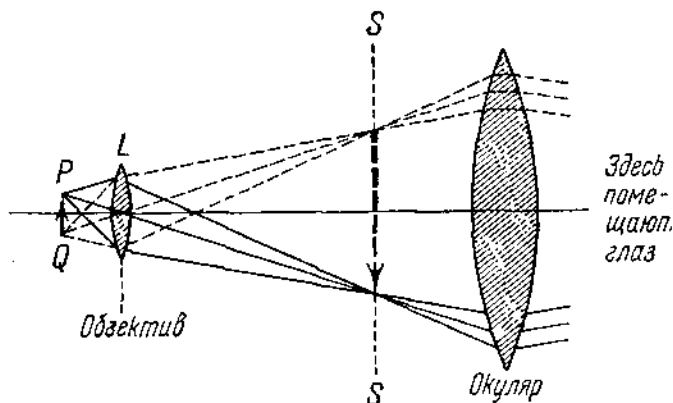


Рис. 33. Схема микроскопа. Ярко освещенный предмет PQ рассеивает свет. Линза L , называемая объективом, образует в SS изображение, значительно большее, чем сам предмет. Изображение рассматривают через вторую линзу, называемую окуляром, так же, как это изображено на рис. 32.

же и то, что без этих приборов мы ничего не знали бы о жизни полезной или вредной, имеющей к нам такое близкое отношение. О звездах мы знали бы не больше того, что они являются яркими точками на небе. Мы были бы лишены возможности наблюдать несказанные богатства Земли и вселенной, частью которой является Земля.

Новый метод заключается в том, что мы сначала получаем изображение предмета, а затем рассматриваем это изображение при помощи увеличительного стекла. Поступая так, мы выигрываем в двух отношениях: во-первых, мы получаем изображение, значительно большее, чем оригинал, а, во-вторых, мы гораздо легче можем к нему приблизиться. Предположим, например, что маленький объект PQ (рис. 33) расположен вблизи линзы L

и ярко освещен. На экране SS получается увеличенное изображение. Освещение должно быть сильным, для того чтобы изображение, несмотря на большие размеры, было достаточно ярким. Это изображение мы рассматриваем через увеличительное стекло. Мы можем получить изображение на белом экране, помещенном в SS , и рассматривать его спереди. Но несравненно лучше, пользуясь линзой, наблюдать картину на просвет, как изображено на рис. 32; экран можно тогда убрать, потому что лучи от каждой точки предмета все равно собираются в фокусе в том месте, где находится экран, после чего расходятся и попадают в глаз, как показано на рисунке. Кроме того при этом весь свет идет в глаз, тогда как экран рассеивает его во все стороны.

В этом заключается принцип устройства микроскопа. В оптической системе, представленной на рис. 33, имеется два основных элемента, первый — объектив, создающий увеличенное изображение, и второй — окуляр, через который рассматривают это изображение. Увеличение микроскопа зависит от устройства обеих этих частей. Для изготовления микроскопа, дающего хорошие изображения, требуется большое искусство.

Когда нужно вооружить глаз для наблюдения деталей удаленного предмета, пользуются аналогичным прибором. Однако в этом случае объектив нельзя поместить вблизи предмета, и поэтому изображение, даваемое им, не получается увеличенным. В то же время это изображение существует, и окуляр или лупа позволяют рассматривать предмет значительно лучше, чем невооруженным глазом.

Чем больше фокусное расстояние объектива, тем больше первое изображение; поэтому сильные астрономические телескопы имеют большую длину. Но тогда возникает вопрос об освещенности, потому что свет, падающий на объектив, распределяется по всему изображению. Объектив должен быть большим, если мы хотим при большом увеличении получить достаточную яркость, и поэтому огромная стоимость сооружений подобного рода ставит предел нашим возможностям.

Может быть, полезно еще рассмотреть принцип действия телескопа, с которым мы уже встречались в случае микроскопа. Предположим, что мы имеем установлен-

ную фотографическую камеру. Если перед тем, как вставить кассету с светочувствительной пластинкой, взглянуть на матовое стекло, защищенное от постороннего света черной материей, мы увидим перевернутые изображения предметов. При этом мы можем воспользоваться увеличительным стеклом для того, чтобы рассмотреть детали. Но, поставив линзу, мы убеждаемся, что видно значительно лучше, если убрать матовое стекло. Лучи, попадающие в каждую точку последнего, рассеиваются по всем направлениям, тогда как без матового стекла они идут прямо в окуляр, не ослабляясь вследствие рассеяния.

Резюмируя, мы можем указать три ступени в развитии способов „вооружения“ нашего глаза. Во-первых, мы пользуемся невооруженным глазом; во-вторых, в случае, когда речь идет о наблюдении маленьких предметов, к которым можно приблизиться, мы пользуемся увеличительным стеклом или лупой; в третьих, мы сначала получаем изображение предмета с помощью объектива, а затем применяем окуляр или лупу для рассматривания этого изображения. На последнем принципе основано устройство всех микроскопов и телескопов, различающихся лишь в деталях. Большое количество остроумных устройств можно найти в современных биноклях, однако рассмотрение их не входит в нашу задачу.

АСТИГМАТИЗМ

Хорошо известно, что зрение отдельных людей сильно различно. Некоторые из нас не могут различать деталей далеких предметов, другим трудно читать книгу. Мы устраняем эти недостатки с помощью очков соответствующего устройства. Не существует стандартного глаза, приспособленного к требованиям среднего человека. В этом отношении имеется большое разнообразие, и нам часто приходится прибегать к искусственным средствам для приспособления глаза к наблюдению предметов на наиболее часто встречающихся расстояниях; неудивительно поэтому, что и в других отношениях часто не удается привести глаз к нормальному, в частности к симметричной форме, которая может считаться нормальной. Если мы хотим, чтобы лучи от точечного источника

света собирались в фокусе линзы, на ее оси, линза должна быть симметричной относительно этой оси. Легко видеть, что происходит, если это не выполняется. Мы берем линзу, отшлифованную таким образом, что ее кривизна в вертикальном направлении AB меньше, чем в горизонтальном CD . Оказывается, свет от точечного источника не собирается в точку по другую сторону линзы. Вследствие большей кривизны горизонтального сечения

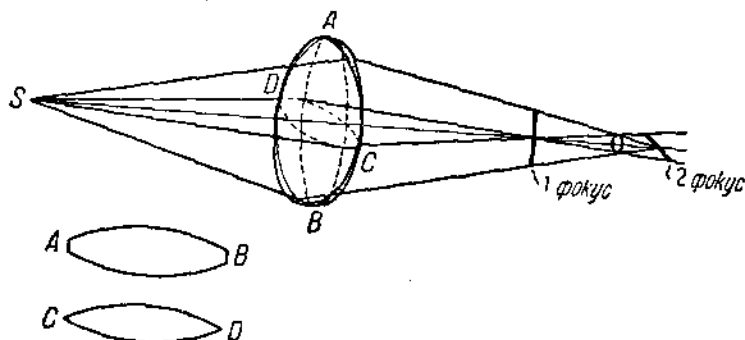


Рис. 34. Астигматическая линза имеет такую форму, что ее центральные сечения, начерченные пунктиром, неодинаковы. Например, дуги сечения DC искривлены сильнее, чем AB . Лучи от S , проходящие сквозь линзу, сходятся не в точку, а в две коротких фокальные линии, как показано на рисунке. Первая линия расположена в плоскости чертежа, другая — перпендикулярна к ней

линза собирает горизонтальные лучи раньше, чем вертикальные. Это представлено на рис. 34.

В одном месте все лучи проходят через короткую вертикальную линию, несколько дальше — через горизонтальную. В промежутке свет заполняет маленький кружок. Но лучи нигде не проходят через точку, вследствие чего явление и называется астигматизмом. Никакой объект, где бы он ни находился, нельзя видеть отчетливо глазом, обладающим таким свойством. К счастью нетрудно изготовлять линзы, устраняющие этот дефект. Астигматичный глаз имеет в одном направлении наибольшую кривизну, а в другом — наименьшую; конечно, эти направления не обязательно должны быть вертикальными и горизонтальными (рис. 34). Линза с такой же разностью кривизн, но только обратного направления, исправ-

ляет этот дефект. Астигматичный глаз видит линии, нарисованные на бумаге, лучше всего при определенном их расположении. Такой глаз, смотрящий на рис. 35, будет видеть вертикальные линии более отчетливо, чем горизонтальные, или наоборот; медленно вращая этот рисунок в его плоскости, можно наблюдать, что резкость горизонтальных и вертикальных линий наиболее сильно различается при определенном их положении. Это объясняется следующим образом.

Предположим, что хрусталик является линзой типа, изображенной на рис. 34, и что световые лучи собира-

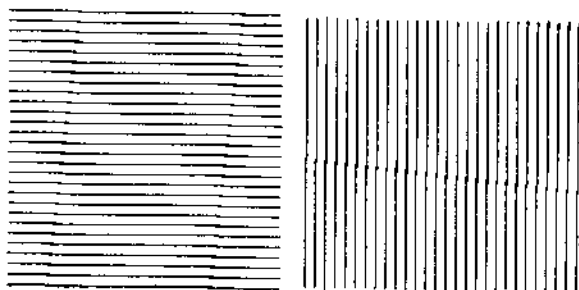


Рис. 35. Испытание астигматичности глаза

ются на сетчатке в виде короткого вертикального отрезка. Каждая точка вертикальной линии, на которую смотрит глаз, изобразится на сетчатке короткой вертикальной линией, и отдельные точки изображения прямой будут перекрываться, так что вся линия будет видна отчетливо. Если же линия горизонтальна, каждая ее точка изображается попрежнему вертикальным отрезком, в результате чего изображение получается размытым.

ОШИБОЧНОЕ ВОСПРИЯТИЕ

Выше мы рассматривали глаз как оптический прибор, при помощи которого изображение внешних предметов образуется на сетчатке, и мы исследовали различные недостатки этого прибора. Мы видели также, что восприятие изображения происходит при участии подсознательного процесса, с помощью которого человеческий

мозг распознает детали наблюдаемой картины. Подобно тому, как могут иметь место ошибки в оптической системе, может быть также и ошибочное восприятие наблюдаемой картины, происходящей или вследствие недостаточного опыта, или вследствие неосторожности в оценке, или вследствие еще более трудно контролируемой причины — природы физиологического процесса, превращающего световые ощущения в нервные импульсы и последние — обратно в ощущения. В качестве примера можно привести хорошо известный оптический обман, относящийся к оценке длины горизонтальных линий (рис. 36). Нижний отрезок кажется нам меньше, потому что глаз локализует его концы где-то вблизи остриев стрелок и не следует дальше. Опытный чертежник не сделает этой ошибки, так же как не сочтет две линии на рис. 37 сходящимися, хотя при первом взгляде и кажется, что они сходятся.

Когда темный квадрат расположен рядом с другим более светлым, получается впечатление, что светлое поле светлее в той его части, которая граничит с темным, тогда как чернота последнего кажется подчеркнутой в месте соприкосновения со светлым. Особенность каждого квадрата делается особенно заметной в присутствии другого. В соответствии с этим квадраты на табл. VС кажутся освещенными неравномерно. Это может обуславливаться целым рядом причин, и я не уверен, что существующие объяснения влияния соседних полей друг на друга вполне безупречны. Одно из таких объяснений, пожалуй наиболее достоверное, указывается Шелфордом Бидвеллом в его „Причудах света и зрения“. Это объяснение предполагает изменение чувствительности глаза: после того как глаз смотрел на черный квадрат, он делается более восприимчивым к свету: яркости кажутся некоторое время увеличенными. Это повышение яркости вследствие контраста может отчасти являться результатом некоторых чисто физиологических явлений, например, меньшего утомления сетчатки, когда на нее падает слабый свет.

Когда мы смотрим на картину, наши глаза последовательно пробегают ее от точки к точке. Если мы смотрим на средний квадрат тотчас после светлого, мы делаем это глазом, несколько утомленным; если же после

темного, — то отдохнувшим глазом. Поле кажется в первом случае темнее, чем во втором. Независимо от того, играет при этом какую-нибудь роль утомление или нет, изменение чувствительности имеет место, потому что неравномерность освещения среднего квадрата согласно Бидвеллу: „также хорошо видна, когда рисунок освещают мгновенной вспышкой электрической искры“. Аналогичное странное явление было показано много лет тому назад проф. Вильямом Стирлингом; его рисунок представ-

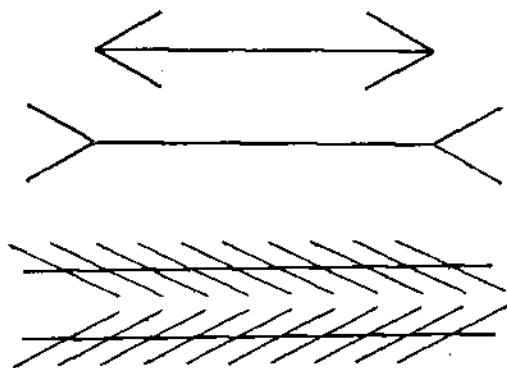


Рис. 36 и 37. Известные оптические обманы. Равны ли горизонтальные отрезки на верхнем рисунке? Параллельны ли данные прямые на нижнем рисунке?

лен на табл. VI А. Белые полосы кажутся темнее в местах их пересечения. Можно предположить, что точки белых полос, удаленные от места пересечения, окружены большим количеством черного фона и поэтому кажутся ярче, чем те места, в которых полосы пересекаются.

Один из наиболее известных оптических обманов заключается в видимом увеличении размеров Луны при приближении ее к горизонту. Когда между далекими силуэтами деревьев или зданий поднимается красный диск Луны, трудно поверить, что он имеет такие же размеры, как при высоком положении этого светила. Однако этот факт нетрудно проверить: гривенник, находящийся на расстоянии 2 м, полностью закрывает луну, независимо от того, находится она на горизонте или высоко в зените. Разумеется, иначе не может и быть,

потому что угол, под которым мы видим Луну, всегда один и тот же, ибо расстояние ее не меняется. Атмосферная рефракция, которую мы рассмотрим позже, сказывается на величине этого угла лишь весьма слабо и в действительности вызывает некоторое уменьшение видимых размеров диска на горизонте. В то же время этот обман происходит не вследствие каких-нибудь изменений размеров изображения на сетчатке и не из-за каких-нибудь дефектов глаза, — мы имеем дело с ошибочным восприятием. Повидимому, нет оснований сомневаться в правильности часто даваемого объяснения, основанного на том, что в этом обмане мы имеем пример применения неверного масштаба. Бессознательно мы пользуемся для измерения небесных объектов различным масштабом в зависимости от их зенитного расстояния. Мы видим, что облака по мере приближения к горизонту уменьшаются в размерах. Аэроплан делается все меньше и меньше по мере того, как он удаляется; угол, под которым он нам виден, непрерывно уменьшается, и он делается еле заметной точкой, исчезая за дальними холмами. В то же время угловая величина Луны не меняется при ее движении по небу, и когда мы видим ее вблизи горизонта, мы оцениваем ее размеры относительно масштаба, связанного с этой частью неба, в результате чего величина диска оказывается преувеличенной. Если бы мы увидели аэроплан, показавшийся над горизонтом за дальней деревней, такого же размера, как мы видим его над головой, он — показался бы нам больше самой деревни и, вероятно, представлял бы ужасающее зрелище. А ведь это как раз то, что мы имеем в случае Луны, и нет ничего удивительного в том, что она кажется нам на горизонте большей, в противоречии со всеми известными данными о постоянстве ее видимых размеров. Эти соображения иллюстрирует рисунок табл. VII А.

На рисунках Луну изображают всегда значительно больших размеров, чем это следует из геометрических соображений. Может быть, это делают потому, что никакие краски не могут передать яркости и значения Луны в ландшафте, и поэтому художник увеличивает ее видимый размер для того, чтобы сделать это светило достаточно заметным. Справедливо это или

несправедливо — вопрос художественного замысла, и об этом мы ничего не можем сказать. Если картина, которую предполагают рассматривать на расстоянии вытянутой руки, изображает предметы в их натуральную величину, Луну следует рисовать кружком с диаметром около 5 мм, если имеется в виду какое-нибудь другое расстояние, размер нарисованной Луны должен быть соответственно изменен.

Следует помнить, что где бы ни находился наблюдатель, угловая величина Луны всегда остается неизменной, в то время как все остальные предметы при перемещении наблюдателя меняют видимые размеры. В то же время с геометрической точки зрения размеры Луны на рисунке зависят от того, на каком расстоянии мы предполагаем его рассматривать. У фотографий это зависит от расстояния между объективом и пластинкой. Несколько странное впечатление производит фотография на табл. VII В.

Имеется еще один тип оптического обмана, с которым мы все, без сомнения, встречались, именно кажущееся увеличение расстояний на фотографиях. Когда мы смотрим на фотографию какой-нибудь хорошо знакомой комнаты, нас иногда поражает тот факт, что на снимке она кажется непривычно длинной.

Рассуждая геометрически, фотография не может ошибаться; это явление не может быть также приписано искажению, вызываемому линзой. Наше впечатление следует опять приписать ложному восприятию, в частности бессознательному применению неверного масштаба. Мы так привыкли к тому, что далекие предметы значительно больше своих видимых размеров, что применяем различный масштаб, смотря на них или думая о них. Начинаящий, рисуя ландшафт, изображает далекие горы чуть ли не в десять раз больше их истинных видимых размеров. И, наоборот, когда детали комнаты представлены в правильных геометрических соотношениях, в каких они в действительности отображаются на сетчатке, мы переоцениваем расстояния деталей, находящихся в дальнем конце комнаты.

Существует ошибочное ощущение движения, также происходящее вследствие того, что мы пользуемся неправильным масштабом. Когда мы смотрим в течение

некоторого времени из окна вагона на пробегающий мимо ландшафт, наши глаза привыкают к движению и воспринимают его как обычное явление. По остановке поезда нам кажется, что ландшафт движется вперед, или поезд — назад. Простой опыт, придуманный Шелфордом Бидвеллом (рис. 38), позволяет продемонстрировать это явление.

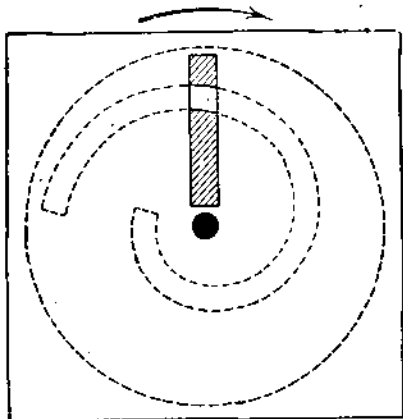


Рис. 38. В диске, вращающемся перед фонарем, вырезана спиральная щель, вертикальная щель остается в покое. Назначение устройства объяснено в тексте

Перед фонарем помещена квадратная металлическая пластинка с вырезанной вертикальной щелью. На оси, расположенной перпендикулярно щели, находится диск, в котором сделан спиральный вырез. Такая установка проектирует на экран светлое пятно, получающееся от пучка, проходящего через место пересечения спирали со щелью. Вращение диска заставляет пятно перемещаться вверх по экрану и там исчезать; в тот же момент внизу появляется другое пятно, также бегущее вверх. Таким образом ряд пятен находится в непрерывном движении. После того как это продолжается около четверти минуты, диск останавливают. Тогда смотрящим на пятно кажется, что оно двигается вниз, причем это ощущение длится в течение нескольких секунд.

Явления, подобные этому, никоим образом не могут быть приписаны недостаткам оптической системы глаза. Они обязательно должны быть связаны с восприятием зрительного ощущения в мозгу. Другие явления известны далеко не всем. Так, например, существует обман, который иногда испытывает шофер. Когда местность, по которой он ведет машину, постепенно поднимается к горам, находящимся вдали, он склонен ошибаться относительно расположения шоссе. Он переоценивает крутизну склона, лежащего за ним, и недооценивает уклон той

части пути, на которую ему еще предстоит подняться. С другой стороны, когда он едет в противоположном направлении, он склонен опасаться за целостность своей машины. В этом случае ошибка происходит вследствие неправильного истолкования наблюдений, она может быть устранена, если учитывать все привходящие обстоятельства.

СОХРАНЕНИЕ ЗРИТЕЛЬНОГО ВПЕЧАТЛЕНИЯ

Явление, называемое сохранением впечатления, совсем иного типа, так как оно зависит от устройства глаза и не подчиняется нашему контролю. Впечатление от изображения на сетчатке сохраняется в течение небольшой доли секунды после того, как вызвавшая его причина перестает действовать. Тиндаль показывал это свойство глаза на очень простом опыте. Из фонаря выходит расходящийся световой пучок. Конус лучей пересекают белой линейкой. Это напоминает взмах шпаги, рассекающей световой луч. Вместо линейки мы видим такое же светлое поле, как если бы на пути пучка мы поставили белый экран. В последнем случае это поле было бы лишь ярче, чем в нашем опыте. В этом поле глаз видит линейку одновременно во всех ее положениях. Если предмет вроде часовой цепочки быстро вертеть при свете электрической лампы, горящей на переменном токе, яркие отражения от звеньев позволяют видеть цепочку во многих последовательных положениях. Принцип кинематографа также основан на сохранении зрительного впечатления в течение некоторого времени.

ОСНОВНЫЕ ПРИМЕРЫ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

Мы уже встречались с явлением преломления света в связи с устройством естественной оптической системы глаза и систем, подобных микроскопу и телескопу. Многие, хорошо знакомые нам явления также связаны с преломлением и представляют интересные и полезные примеры этого свойства света.

Мы знаем, что случается, когда волны переходят из одной среды в другую, если скорость волнового движения в обеих средах различна. Рассмотрим сначала это явление с помощью нескольких простых опытов.

В опытах, изображенных на рис. 39 и 40, световой пучок направляется на зеркало, которое отклоняет его вниз, так что он входит в сосуд, наполненный водой. Вода подкрашена краской, делающей путь луча видимым, и одна сторона сосуда сделана из стекла, так что мы

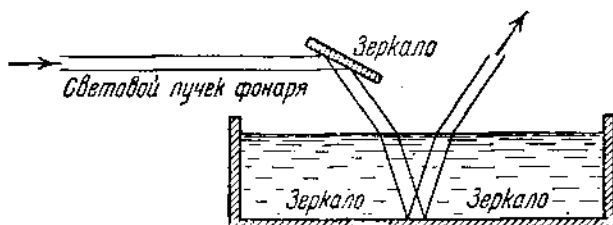


Рис. 39. Сосуд наполнен слегка подкрашенной жидкостью. Передняя стенка сосуда сделана из стекла, так что можно проследить путь луча внутри. На дно положено зеркало

можем видеть, как свет идет в воде. Луч отражается от зеркала, положенного на дно сосуда, проходит вторично сквозь воду и выходит наружу. Преломление луча, входящего в воду и выходящего из нее, хорошо заметно; легко также видеть, что если увеличить наклон входящего луча, преломление также увеличивается. Мы ви-

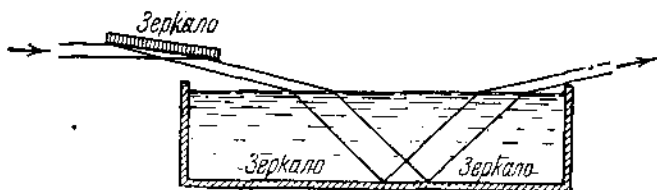


Рис. 40. Путь луча, входящего в воду более наклонно, чем на рис. 39

дим, кроме того, что луч, отраженный от зеркала, положенного на дно сосуда, расположен симметрично с падающим. В частности луч, почти скользящий по поверхности перед тем, как войти в воду, так же косо выходит из воды.

Это иллюстрирует важный факт, что путь светового луча—обратим. Если мы где-нибудь на пути луча поставим зеркало, перпендикулярное ему, луч вернется обратно по тому же пути, по которому он пришел к зеркалу,

испытая все отражения и преломления в обратном порядке. Наши опыты дают также представление о величине преломления при переходе луча из воздуха в воду, и о значительном возрастании этой величины при увеличении наклона падающего пучка. Явление преломления показано на табл. VI В.

Световой луч, проникающий в комнату сквозь оконное стекло, отклоняется от своего первоначального направления, когда он проходит в стекле, но по выходе из последнего идет по прежнему направлению. Таким образом видимые из окна предметы не сдвигаются сколько-нибудь заметно. Опыт с сосудом, в котором мы получаем водяные волны, ясно показывает, как это происходит. Стеклан-

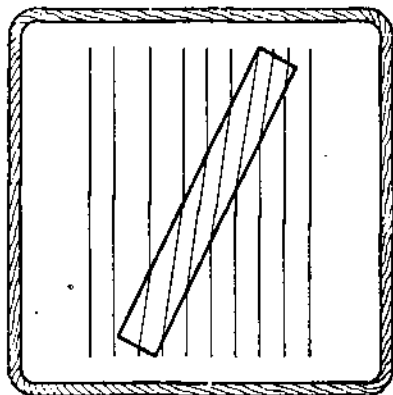


Рис. 41. Прямоугольная стеклянная пластинка положена в сосуд с водой и волны проходят над ней. После прохождения над пластинкой волны принимают прежнее направление. (Вид сверху)

ный брусок с параллельными сторонами положен на дно сосуда; волны возбуждаются обычным путем. Проходя по мелкому месту над стеклянной пластинкой, волновой фронт искривляется, а после прохождения ее принимает прежнее направление. Это явление показано на табл. VIII А и на рис. 41. Хорошее оконное стекло лишь слабо смещает световые лучи в одну сторону, не меняя их направления, и это делает его почти незаметным. Однако, когда две стороны стекла не параллельны, предметы, видимые сквозь него, кажутся искаженными; это явление хорошо заметно на плохих стеклах.

Мы в состоянии теперь объяснить одно хорошо известное явление. Когда мы смотрим сквозь воду на дно реки или моря, глубина всегда кажется нам меньше, чем она есть на самом деле. Глаз судит о расстоянии предмета по положению той точки, из которой лучи кажутся исходящими. Вследствие преломления лучей при выходе их из воды глаз ошибается, как это представлено на

рис. 42 и 43. Для глаза, смотрящего в воду вертикально вниз, кажущаяся глубина составляет три четверти истинной. Видимое уменьшение глубины тем больше, чем больше наклон лучей. Вследствие этого, когда мы смотрим в аквариум, задняя стенка его всегда кажется искривленной, а проплывающие рыбы принимают причудливые формы. Когда в мелком месте лодку продвигают, отталкиваясь от дна шестом, то всегда преувеличивают опасность посадить лодку на мель, и лишь продвигаясь вперед, убеждаются, что лодка может спокойно плыть дальше. Палка, опущенная одним концом в воду, кажется сломанной на уровне воды, потому что все ее точки видны приподнятыми. Это явление показано на табл. VIII В.

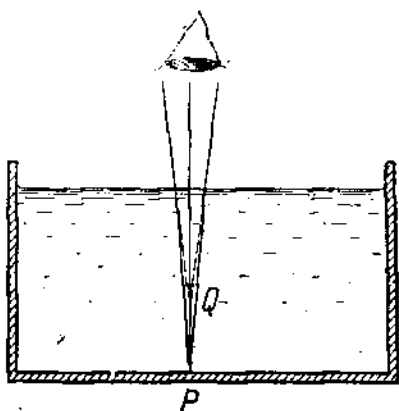


Рис. 42. Прямоугольник изображает сосуд с водой. Глаз смотрит прямо вниз на предмет P , лежащий на дне сосуда. Вследствие преломления пучок лучей от P , попадающий в глаз, выходя из воды, несколько расходится и кажется исходящим из Q . Глаз нарисован непропорционально большим для того, чтобы можно было изобразить расширение светового пучка. Глубина, из которой находится точка Q , составляет три четверти глубины чашки

Преломление солнечных лучей в атмосфере сказывается на кажущемся времени заката Солнца. Благодаря тому, что свет распространяется в воздухе с меньшей скоростью, чем в пустом пространстве, солнечные лучи, достигая земли, испытывают отклонение от их первоначального направления. Это изменение направления имеет максимальную величину, когда лучи падают на границу атмосферы наклонно, что имеет место, когда Солнце находится на горизонте. При этом, как показано на рис. 44, лучи от точки P солнечного диска достигают наблюдателя O , хотя горизонт виден ему в направлении OH , совпадающем со спокойной поверхностью воды в точке O . Таким образом точка P еще видна, хотя она находится уже под горизонтом. „Геометрический“ закат Солнца происходит раньше фактически наблюдаемого; изменение направления при этом таково, что, когда мы

духе с меньшей скоростью, чем в пустом пространстве, солнечные лучи, достигая земли, испытывают отклонение от их первоначального направления. Это изменение направления имеет максимальную величину, когда лучи падают на границу атмосферы наклонно, что имеет место, когда Солнце находится на горизонте. При этом, как показано на рис. 44, лучи от точки P солнечного диска достигают наблюдателя O , хотя горизонт виден ему в направлении OH , совпадающем со спокойной поверхностью воды в точке O . Таким образом точка P еще видна, хотя она находится уже под горизонтом. „Геометрический“ закат Солнца происходит раньше фактически наблюдаемого; изменение направления при этом таково, что, когда мы

видим нижний край Солнца только касающимся горизонта, в действительности оно уже зашло.

В следующей главе мы рассмотрим разложение белого света на составляющие его цвета, всегда сопровождающее преломление.

Несколько забегай вперед, укажем, что синие и зеленые лучи преломляются сильнее, чем желтые и красные. Поэтому последний луч, доходящий до нас от заходящего солнца — зеленый или синий, если только при этом не влияют другие обстоятельства, как это случается почти всегда. Таким обра-

зом возникает явление, называемое „зеленым лучом“, который иногда вспыхивает на мгновение до восхода солнца или немного спустя после заката; зеленый луч виден только при очень спокойном и однородном воздухе.

Свет испытывает преломление даже переходя из одного газа в другой, если их плотности различны; то

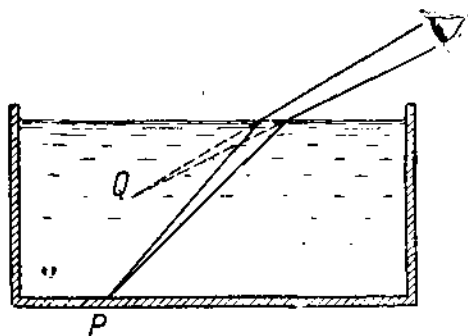


Рис. 43. Когда в воду смотрят кого, то кажется, что точка Q расположена ближе к поверхности воды и не лежит непосредственно над P .

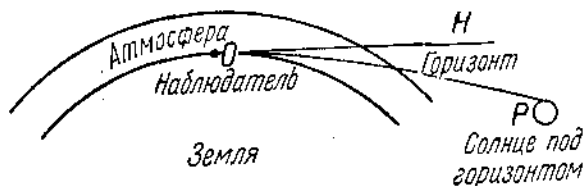


Рис. 44. Наблюдатель, смотрящий на горизонт, видит Солнце, находящееся под горизонтом, потому что солнечные лучи проходят сквозь атмосферу криволинейно.

же происходит при прохождении границы между двумя частями одного и того же газа, имеющими неодинаковую плотность из-за различия температуры или давления. Предметы, наблюдаемые сквозь костер, кажутся волнующимися, потому что световые лучи отклоняются

беспорядочной смесью горячих и холодных газов. То же явление можно наблюдать, смотря сквозь поток горячего воздуха, поднимающийся над свечей или лампой. В жарких странах воздух вблизи земли нагревается вследствие соприкосновения с ней, и дальний ландшафт всегда кажется волнующимся.

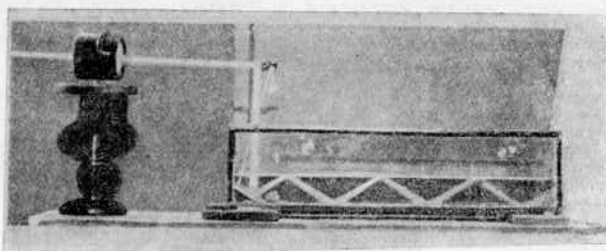
ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ

Существует любопытное явление, известное под названием „полного внутреннего отражения“. Возвращаясь к опыту, изображенному на рис. 40, мы видим, что луч, выходящий из сосуда после отражения от дна, составляет с поверхностью воды довольно значительный угол. Может возникнуть вопрос, что произойдет с лучом, если он будет падать снизу на поверхность воды под меньшим углом. Легко проделать соответствующий опыт, несколько изменив расположение зеркал. Зеркало M_1 направляет световой пучок вертикально вниз в сосуд с водой ко второму зеркалу M_2 (рис. 45). Наклон последнего можно изменять. Постепенно оттягивая его левый край от дна, мы заставляем луч падать на поверхность воды все более и более наклонно. При некотором положении зеркала M_2 луч уже не выходит из воды, как это было прежде, — он отражается вниз. Это отражение — полное: оно более совершенно, чем если бы мы поверхность воды заменили посеребренным зеркалом; от этого и происходит название, данное явлению. Если длина сосуда достаточно велика по сравнению с глубиной налитой в него воды, отражение от верхней поверхности воды и от зеркала, положенного на дно сосуда, происходит несколько раз. Этот опыт показан на фотографии табл. IX А.

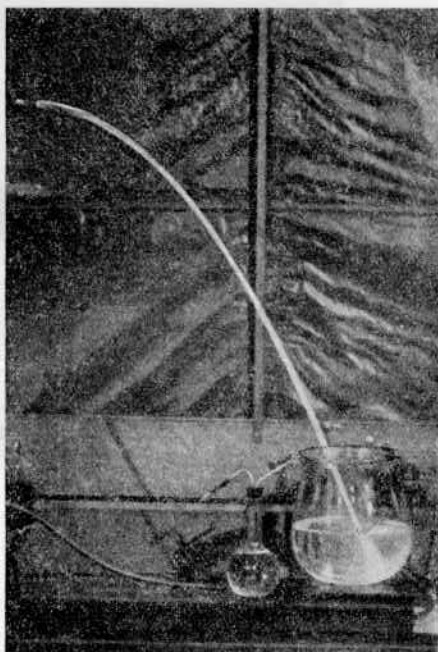
Полное внутреннее отражение можно очень просто наблюдать, если опустить ложку в стакан с водой и снизу смотреть на поверхность воды под соответствующим углом. Погруженная часть ложки отражается от внутренней поверхности воды, и яркость этого отражения удивительно велика.

Полное внутреннее отражение имеет большое применение в оптических приборах, например, в биноклях. В простейшем случае пользуются стеклянной призмой

ТАБЛИЦА IX



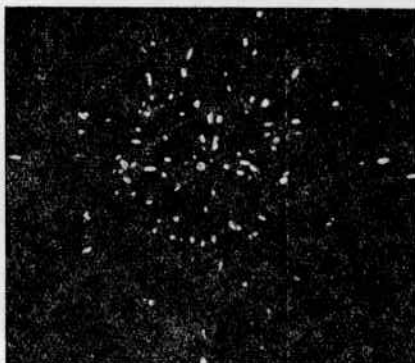
А. На этой фотографии получалось несколько полных внутренних отражений от поверхности воды. Заметно преломление луча при выходе его из сосуда. Зеркало M_2 на рис. 45 наклонено в этом случае гораздо сильнее, чем на фотографии табл. VI В (стр. 64).



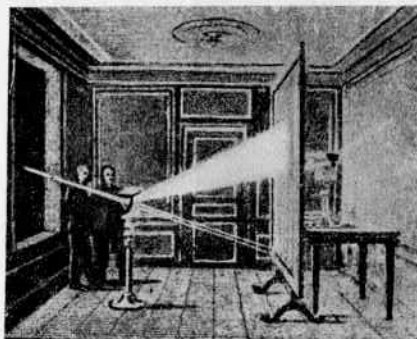
В. Опыт Тиндаля, иллюстрирующий полное внутреннее отражение. Свет входит в струю воды через край, из которого она вытекает, и проходит внутри струи вниз. Источником света служила вольтова дуга, помещенная снаружи сосуда и сфокусированная на отверстии крапа при помощи линзы, укрепленной в его стенке. Дуга и линза на фотографии не показаны (стр. 65).

А. Отражение от брильянта. Как показано на чертеже слева, свет впускают в комнату через маленькое отверстие в стене. Это отверстие заметно в центре фотографии. Узкий световой пучок, видимый лишь там, где он встречает брильянт, разделяется на большое число отраженных пучков, оставляющих блики на стене (стр. 73).

А



В. Опыт, аналогичный предыдущему, в котором брильянт заменен цирконом (стр. 73). В



С. Опыт Ньютона. Луч солнечного света разлагается в спектр призмой; часть спектра проходит сквозь щель в экране и падает на вторую призму; при этом дальнейшего разложения не происходит (стр. 74).

с двумя взаимноперпендикулярными гранями. Свет входит через один „катет“ и выходит через другой, полностью отразившись от третьей грани — „гипотенузы“, составляющей с обоими „катетами“ равные углы.

Полное внутреннее отражение можно наблюдать в прекрасном опыте, придуманном Тиндалем много лет назад. Сосуд, представленный на рисунке табл. IX В,

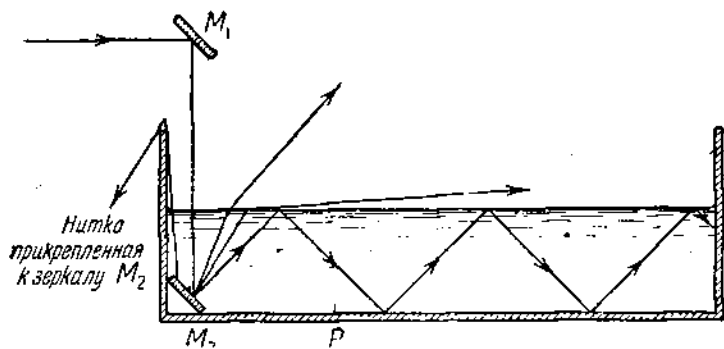


Рис. 45. Разрез сосуда с водой, в котором происходит полное внутреннее отражение. Луч света, падающий на зеркало M_1 , отражается в направлении зеркала M_2 . Последнее можно вытягивать нитку вверх и таким образом поворачивать. В некоторых положениях зеркало M_2 отражает луч, свободно выходящий из воды; в определенном положении M_2 выходящий луч скользит по поверхности воды; при еще большем наклоне зеркала M_2 световой пучок полностью отражается от воды. На дне сосуда положено зеркало

наполнен водой, вытекающей сплошной струей из крана вблизи дна. Струя не разбивается на протяжении всего пути до чашки, в которую она льется почти бесшумно. В стенку сосуда против крана вставлена линза, фокусирующая световой пучок внутри вытекающей струи. Свет многократно отражается от внутренней поверхности струи, и это производит такое впечатление, как будто вода увлекает за собой свет. Иногда можно наблюдать это явление, выливая воду из кувшина, хотя в этом случае оно видно далеко не так хорошо, как в опыте Тиндала. Аналогичное явление в изогнутой стеклянной палочке используют в качестве „светопровода“ для передачи светового пучка, освещающего объект под микроскопом.

Когда земля сильно нагрета солнечными лучами,

слои воздуха, соприкасающиеся с ней, становятся горячее, чем расположенные выше; это вызывает полное внутреннее отражение света в атмосфере, которое обычно является причиной миража.

Предположим для простоты, что в действительности имеют место условия, изображенные на рис. 46 и 47:

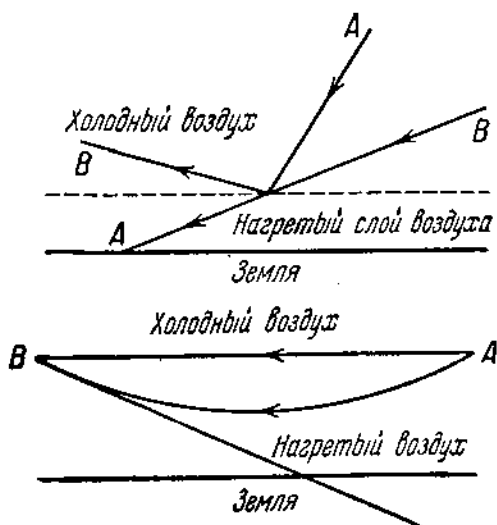


Рис. 46 и 47. Когда нижние слои воздуха горячее верхних, лучи света преломляются или даже испытывают полное внутреннее отражение

резкая граница, отделяющая теплый слой воздуха, прилегающий к земле, от более холодного, находящегося над ним. Луч света, обозначенный на рис. 46 буквой *A*, после прохождения границы приблизится к горизонтальному направлению, потому что скорость света в теплом воздухе больше, чем в холодном. Луч *B* встречает границу под таким малым скользящим углом, что он испытывает полное внутреннее отражение и отражается, как от зеркала. Граница раздела между горячим и холодным слоями никогда не бывает такой резкой, как это представлено на рисунке; всегда имеет место постепенный переход от теплого воздуха к холодному, но это не оказывает существенного влияния на результат. Как показано на рис. 47, луч искривляется

вместо того, чтобы внезапно отразиться обратно, как на рис. 46. Таким образом луч от удаленного предмета может попадать в глаз не только обычным прямым путем, но также по кривой линии, изображенной на рис. 47. Свет, исходящий от какого-нибудь дерева или от неба за ним, будет воспринят глазом так, как если бы он шел от земли; в результате получается такое впечатление, как будто между наблюдателем и деревом находится вода с характерным отражением в ней ландшафта. Часто в жаркий день можно видеть это явление даже на наших широтах, на мостовой, накаленной до высокой температуры; глаз, особенно если он расположен более или менее на одном уровне с мостовой, находящейся на некотором расстоянии, может видеть тогда отражение неба или ярко окрашенных предметов.

ОТРАЖЕНИЕ РАДИОВОЛН

Некоторые любопытные явления, обнаруженные при радиопередаче, должны объясняться фактами, имеющими много общего с условиями появления миража. В верхней части атмосферы находятся слои, отражающие радиоволны и возвращающие их обратно на землю. Если бы этого не происходило, передачи на большое расстояние, в особенности на коротких волнах, порядка 50 м, были бы практически невозможны, потому что волны не следовали бы за кривизной Земли, оставаясь достаточно интенсивными. Как мы уже видели, радиоволны имеют совершенно ту же природу, что и световые, так что наша аналогия полная. Эти отражающие слои содержат некоторое количество наэлектризованных молекул и свободных электронов, появляющихся под влиянием солнечного излучения, в частности излучения с длиной волны более короткой, чем у видимого света. Часть энергии этих лучей вызывает разрушение молекул, заключающееся в вырывании из них электронов. Последние в конце концов оказываются захваченными другими молекулами; таким образом в атмосфере присутствуют и положительные и отрицательные заряды и электроны. В атмосфере непрерывно происходят оба указанных процесса, и между ними устанавливается подвижное равновесие. Когда интенсивность излучения

велика, она вызывает более сильную электризацию атмосферы, пронизываемой ею. Энергия при этом поглощается, так что у поверхности земли воздух остается незатронутым. В то же время в верхних слоях атмосферы электризация достаточно велика для того, чтобы оказывать заметное влияние на распространение радиоволн. Переходя от нижних слоев в верхние, где воздух наэлектризован, волны преломляются и иногда возвращаются обратно по ту же сторону от границы, с которой они пришли, как это происходит с световым лучом, выходящим из воды в воздух в опыте, изображенном на рис. 39. Это явление наблюдается на опыте и может быть рассчитано на основе электромагнитной теории света. Для наших настоящих целей достаточно лишь упомянуть о существовании этого факта.

Так же, как световой луч, изображенный на рис. 45, испытывает внутреннее отражение при падении снизу под достаточно косым углом, так при аналогичных условиях и радиоволны отражаются от наэлектризованных верхних слоев атмосферы. При достаточно интенсивной электризации отражение может иметь место даже при перпендикулярном падении волн на поверхность слоя. Но почти всегда, особенно ночью, когда электризация гораздо слабее, чем днем, для отражения необходимо достаточно косое падение. Отраженный луч возвращается обратно на землю, и его можно обнаружить в пунктах, удаленных от передатчика, в то время как в местах, расположенных ближе, сигнала не слышно. Точно таким же образом отраженный луч в опыте, изображенном на рис. 45, не может освещать дна сосуда в точках, расположенных ближе, чем P к зеркалу M_2 .

Переход от ненаэлектризованного воздуха к атмосферным слоям, содержащим заряды, постепенный, и нет никакой необходимости предполагать противное. Чем этот переход резче, тем сильнее должен быть искривлен путь отраженного луча, предполагая, что отражение происходит так, как на рис. 47.

В атмосфере имеется по крайней мере два слоя, вызывающие это отражение радиоволн; один из них на высоте, несколько большей 100 км, между 110 и 100 км. Он известен уже давно под названием слоя Кеннели-Хивисайда. Другой слой, высота которого меняется

в больших пределах, находится в несколько раз дальше; он был открыт в 1927 г. проф. Эппатоном. Сигналы, посылаемые из колледжа Ист Лондон (East London College), принимали в Королевском колледже в Стрэнде (King's College in the Strand), как звуковое эхо от потолка: от каждого сигнала можно было принимать несколько эхо. Рис. 48 показывает запись целой системы эхо. Волнистая линия на этом рисунке дает масштаб времени: в одной секунде уместится 1 115 волн. Выступ, отме-

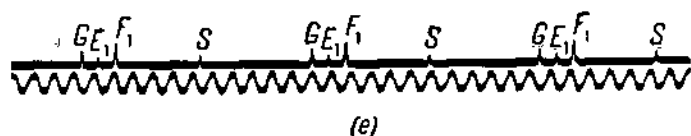


Рис. 48. Отражение радиоволн от различных слоев атмосферы

ченный G , соответствует моменту, когда был принят сигнал, распространявшийся по поверхности земли, т. е. принятый практически в момент его отправления. E — момент прибытия первого эхо от самого низкого слоя. F — сигнал, отраженный более высоким слоем; S — слабое эхо, пришедшее с такого далекого расстояния, что его происхождение еще не установлено.

Интересно отметить, что звук также отражается от верхних слоев атмосферы, если он падает на них достаточно наклонно. Эти слои, вероятно, связаны каким-то образом с теми, о которых мы говорили выше. Солнечная радиация, поглощение которой вызывает электризацию, производит также нагревание, и недавно было вычислено, что должны существовать слои в верхних областях атмосферы, температура которых очень высока.

В нагретом воздухе звук распространяется быстрее, чем при нормальной температуре, и, следовательно, имеет место преломление звуковых лучей, вполне аналогичное рассмотренным выше световым явлениям. Это сказывается на том, что громкие звуки слышны не только поблизости от источника, но также и на больших расстояниях от него при отсутствии слышимости в промежуточных областях

ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА В БРИЛЛЯНТЕ

Очень интересный пример применения законов отражения и преломления представляет ювелирная обработка драгоценных камней, в частности алмаза. Мы с удивлением узнаем, что почти половина куса алмаза пропадает, когда из него делают драгоценный камень. Причина этого кроется в том, что бриллианту придают одну

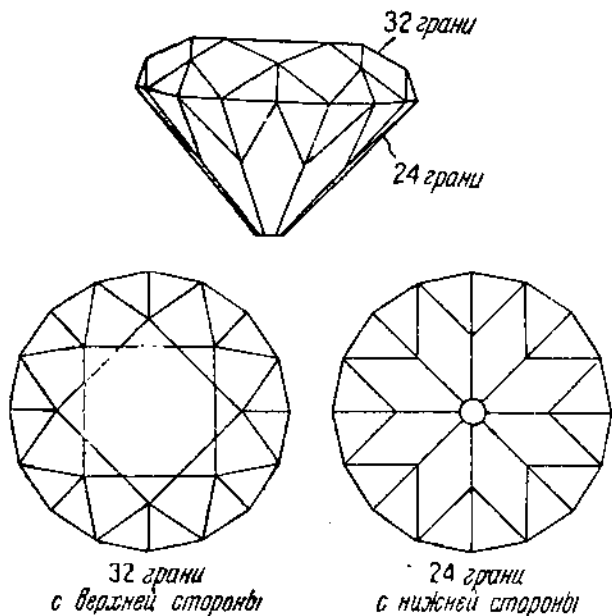


Рис. 49. Верхний рисунок представляет профиль бриллианта; нижние рисунки показывают расположение граней с верхней и нижней сторон от пояса

из нескольких стандартных форм, оказавшихся наилучшими. Наилучшая форма бриллиантов представлена на рис. 49. Два нижних рисунка показывают расположение граней над пояском и под ним.

Бриллиант такой формы совсем не пропускает света сверху вниз. Когда его держат против света острием к глазу, он кажется черным. Все лучи, падающие на лицевую сторону камня, возвращаются обратно. Вообще

говоря, они не возвращаются в точности по старым направлениям: каждый луч обычно выходит обратно не через ту грань, через которую он вошел в брильянт. На рис. 50 нарисованы пути некоторых лучей, по которым свет входит и выходит. Этим объясняется характерное сверкание брильянта. Как бы мы ни располагали его по отношению к глазу, всегда найдется несколько лучей, выходящих из камня, которые являются отражением источников света, находящихся в комнате, или неба

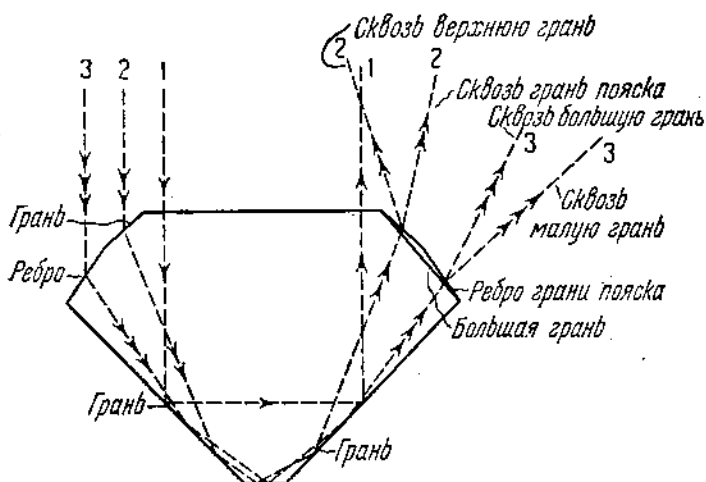


Рис. 50. Различные пути, по которым световые лучи входят в брильянт через его лицевую сторону, преломляются, испытывают полное внутреннее отражение и, наконец, выходят через верхнюю часть камня, никогда не проходя насквозь

Камень непременно отражает свет от самых неожиданных источников. Конечно, он не может излучать света больше, чем получает сам, но отражения столь ярки и многочисленны и они так часто меняются, что камень представляет прекрасное зрелище для глаз, тем более, что белый свет при преломлении разлагается на составные цвета. Как мы увидим ниже, это разложение всегда сопровождает преломление света.

Отличительная особенность вещества брильянта, представляющего собой не что иное, как кристаллический углерод, заключается в очень большом преломлении, которое испытывает свет, входящий в него. Это иллюстрирует

рис. 51. Лучи A, B, C, D, E , входя в брильянт, отклоняются и следуют по направлениям A', B', C', D', E' . В брильянте свет движется значительно медленнее, чем в воздухе; отношение скоростей составляет в среднем 2,5 и меняется с длиной волны. По этой причине полное внутреннее отражение также обладает замечательными свойствами. Лучи, идущие по направлениям $A'O, B'O, \dots, E'O$, выходят в виде $OA, OB, \dots$. Но первый и последний из этих лучей

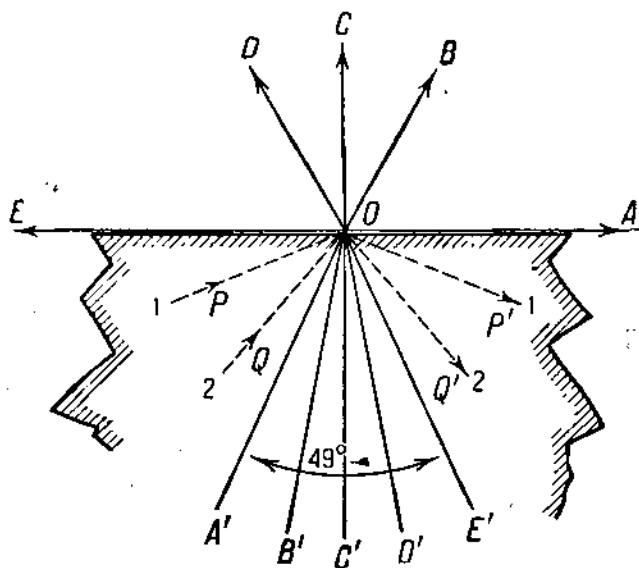


Рис. 51. Показатель преломления брильянта очень велик. Луч AOA' уже не выходит наружу. Лучи вроде QOQ' испытывают полное внутреннее отражение

будут уже скользить по поверхности. Лучи, достигающие точки O от 1 и 2 по направлениям PO и QO , вовсе не выходят и испытывают полное внутреннее отражение, следуя по OP' и OQ' . Угол $A'OE'$ равен всего лишь 49° . Если рассмотреть теперь сечение брильянта, показанное на рис. 50, мы видим, какую роль играет эта большая вероятность полного внутреннего отражения. Луч, входящий в кристалл прямо через верхнюю плоскость под прямым углом к ней, испытывает полное внутреннее отражение, встречая внутри одну из граней, расположен-

ных ниже пояски; он проходит в толще камня и отражается вторично; в результате луч выходит через верхнюю плоскость по направлению, прямо противоположному тому, по которому он вошел. Если свет входит через одну из боковых граней над пояском попрежнему параллельно оси камня, он выходит через другую, также верхнюю боковую грань; даже если первоначальный луч несколько наклонен к оси, он все же выходит через лицевую сторону брильянта. Несколько возможных путей света показаны на рис. 50; лучи могут проходить в любом направлении.

В лекционном опыте эти явления можно показать очень красиво. Узкий пучок света от дуги впускают в комнату через отверстие и на расстоянии нескольких метров от последнего помещают брильянт, обращенный лицевой стороной к свету. Вся стена затемненной комнаты начинает тогда переливаться сотнями бликов, отраженных от брильянта. Эти блики при движении брильянта переплетаются друг с другом в запутанные сверкающие узоры (табл. ХА).

Другие камни, вроде сфена или циркона, дают те же прекрасные явления; но эти камни не являются драгоценными, потому что они гораздо мягче брильянта (табл. ХВ).

Глава III

ЦВЕТ

СПЕКТР

Свет обладает особенностью, которую мы называем цветом. Спрашивается, от какой особенности световых явлений зависит цвет?

Если рассматривать свет, как волны, распространяющиеся в среде, которую мы называем эфиром, ответ на наш вопрос будет очень простым. Цвет зависит от длины световой волны, которая является расстоянием между гребнями двух соседних волн. Мы несколько отложим доказательство этого простого положения; заметим лишь, что такое представление очень удобно и полезно для понимания фактов, занимающих нас в данный момент.

Свет какого-нибудь источника может быть разложен на ряд элементов, которые в отдельности создают впечатление цветов. Эти составные элементы нельзя разграничить резко, они постепенно переходят друг в друга. Простейшим способом свет можно разложить при помощи стеклянной призмы. Именно этим методом Ньютон произвел ряд опытов, которые привели его к основанию физической оптики и позволили сделать один из крупнейших вкладов в эту науку. Опыт Ньютона представлен на табл. X С. Пучок солнечного света входит в темную комнату сквозь отверстие в ставне и падает, как показано на рисунках, на стеклянную призму. Выходящий из призмы свет образует окрашенную полосу, называемую спектром. Красный конец спектра образован лучами, наименее отклоняемыми при прохождении сквозь призму, фиолетовый — наиболее отклоняемыми. Остальные цвета располагаются между указанными пределами

без каких-либо резких границ раздела, хотя в спектре и различают цвета: красный, оранжевый, желтый, зеленый и различные оттенки синего и фиолетового. Цветная фотография спектра изображена на табл. XI D.

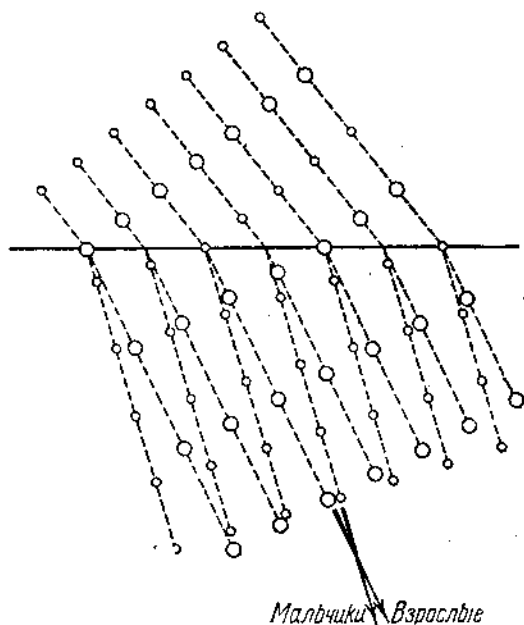


Рис. 52. В верхней части рисунка чередующиеся шеренги взрослых (большие кружки) и мальчиков (малые) маршируют по гладкой дороге и сохраняют при этом „равнение“ и „дистанцию“. Ниже находится плохая дорога и шеренги мальчиков отклоняются сильнее, чем шеренги взрослых. При этом предполагается, что каждая шеренга сохраняет „равнение“ и что взрослые не следуют за мальчиками. Расстояния между шеренгами не имеют ничего общего с длиной волны.

Красные волны, — мы опять забегаем немного вперед, — являются самыми длинными из тех, которые мы видим в спектре; на другом конце спектра находятся самые короткие. Мы уже пользовались аналогией с шеренгой марширующих солдат, переходящих на плохую дорогу. Как шеренга несколько поворачивается по направлению к границе раздела между хорошей и плохой дорогой, так и падающие волны меняют свое направле-

ние и по той же причине. Мы можем теперь продолжить эту аналогию. Если марширующие шеренги состоят не из взрослых, а из мальчиков, отклонение будет больше, потому что их слабые ноги не смогут быстро справляться с трудностями тяжелой дороги, на которую они вступают. Если мы представим теперь взрослых и детей, марширующих вместе, как представлено на рис. 52, то взрослые отделятся от мальчиков, ряды последних отклонятся сильнее и вместо того, чтобы следовать по одному направлению с взрослыми, пойдут иначе. Точно так же короткие волны отделяются призмой от длинных; эта аналогия может служить для запоминания того, что первые отклоняются сильнее, чем вторые.

Волны всех длин или всех цветов распространяются в пустом пространстве с одной и той же скоростью. Если бы это было не так, то звезды, исчезающие за каким-нибудь другим небесным телом, например за Луной, были бы окрашены, и если бы, например, синие лучи, двигались медленнее, скрывающаяся звезда становилась бы синей, — а появляясь вновь она соответственно делалась бы красной. В прозрачной среде свет распространяется медленнее, чем в пустоте, и обычно короткие синие волны медленнее красных.

Рисунки показывают опыт Ньютона. Небольшая часть спектра выходит через отверстие в экране и падает на вторую призму. При этом оказывается, что разложение первой призмы было полным; выделенный цветной пучок больше не разлагается в спектр, как первоначальный, и новых цветов не появляется. В действительности получается небольшое расширение пучка, потому что обе щели, через которые проходит свет, имеют заметную ширину, что приводит к некоторому перекрыванию изображений. При этом вторая щель пропускает целую область длин волн или цветов, которые и разлагаются второй призмой. Чем уже щели и, следовательно, чем лучше выделяются цвета, тем менее заметно это явление. Наоборот, если первую щель раскрыть широко, разноцветные блики на экране перекрываются, и в центре все цвета, смешиваясь, образуют, как показано на табл. XI A, белое пятно.

Эти опыты показывают, что преломление в призме, а также любой другой способ, использующий зависи-

мость скорости света от длины волны, позволяет произвести разложение света достаточно полно. Глаз воспринимает это, как разложение на цвета; мы покажем теперь, что лучше представлять это явление, как разложение на волны различной длины.

КАЧЕСТВО СВЕТА

Перейдем теперь к следующему очень важному вопросу. Свет, разложенный призмой, разложить дальше сколько-нибудь заметно невозможно. Свет обладает скоростью, одинаковой для всех длин волн в пустом пространстве; наоборот, в веществе скорость зависит от длины волны и от природы среды, сквозь которую свет проходит; на этом основано явление преломления и спектральный анализ. Свет, очевидно, обладает некоторой интенсивностью и длиной волны. Этим и исчерпываются все качества света, заметные для глаза, но, кроме этого, имеется еще одна характеристика, называемая степенью поляризации, очень просто связанная с направлением, в котором каждая волна совершает свое движение. Это явление мы рассмотрим далее в соответствующем месте книги; оно не касается глаза, и мы упоминаем о нем здесь для того, чтобы список качеств света был полным.

Таким образом мы можем полностью описать природу светового луча, поскольку это относится к глазу, определив его интенсивность и длину световой волны. Если свет сложный и состоит из смеси лучей различной длины волны, необходимо еще установить интенсивность каждой составной части; и этого будет уже достаточно. В действительности имеется еще бесчисленное количество добавочных трудностей, касающихся нашего восприятия цветов, но эти трудности происходят не от многообразия качеств самого света, а от многообразия реакций глаза и мозга, но первое не следует смешивать со вторым.

ДЛИНЫ СВЕТОВЫХ ВОЛН

Представление о свете как о волновом движении сослужило нам прекрасную службу. Существенными качествами видимого света оказались как раз те, которые

удобно приписать волновому движению. Естественно задаться вопросом, будут ли наши опыты с другими волнами, например с водяными, обнаруживать явления, аналогичные световым.

Характерной особенностью морских волн является большое разнообразие их длин, т. е. расстояний между двумя соседними гребнями. С одной стороны, мы знаем огромные волны в океане; с другой — мельчайшую рябь, возникающую под действием легкого дуновения ветра. Рассматривая свет с этой точки зрения, мы сталкиваемся с фактом исключительного значения. Длины волн видимого света сосредоточены в очень узких пределах.

Длина волны красного света несколько меньше одной десятитысячной сантиметра, длина волны фиолетового — не превышает половины этой величины. Длины волн всех остальных видимых лучей лежат между этими двумя пределами.

Спрашивается, существуют ли волны, длина которых выходит из этих пределов? Не встречаемся ли мы здесь с какими-либо новыми свойствами света, оставшимися до сих пор незамеченными, для объяснения которых волновая теория недостаточна, ибо ведь она не предполагает никаких ограничений, которым подвержено человеческое зрение?

Опыт показывает, что волновая теория нас не „подводит“ и что указанные выше ограничения коренятся лишь в свойствах нашего зрения; этих ограничений, может быть, не существовало бы, если бы наши глаза были устроены иначе. Современным физикам приходится экспериментировать с огромной областью длин волн, от радиоволн, длина которых измеряется сотнями метров, до волн, излучаемых некоторыми радиоактивными веществами в десятки тысяч раз более короткими, чем видимые. Видимая область составляет лишь ничтожную часть всего спектра, в каком бы масштабе мы его ни представляли.

Мы сосредоточим наше внимание некоторое время на этой узкой области, естественно имеющей для нас колоссальное значение, потому что все явления, наблюдаемые глазом, происходят в пределах этой области. Все, что касается цвета, зависит от того, каким образом возникли волны этой области спектра и каким изменениям

они подверглись при отражении от поверхностей одних тел или при прохождении сквозь другие, прежде чем они были восприняты глазом и мозгом.

ДЕЙСТВИЕ КРАСЯЩИХ ВЕЩЕСТВ

Возьмем установку, в которой свет от дугового фонаря, проходя через щель, попадает на линзу, образующую изображение щели на экране. Перед щелью мы помещаем призму, и узкое белое изображение растягивается в цветной спектр, изображенный на табл. XI D. Спектр можно рассматривать, как ряд перекрывающихся изображений щели, обязанных своим происхождением различным длинам волн, на которые призма разлагает падающий на нее свет. Поставим перед щелью красное стекло; тогда все цвета спектра кроме красного исчезнут (табл. XI E). Мы видим, что при этом один цвет не превращается в другой, мы наблюдаем только исчезновение ряда цветов. Характерным свойством красного стекла является не превращение различных цветов в красный, а гашение всех кроме красного. Этим свойством обладают любые краски, ибо окраска появляется в результате исчезновения всех цветов кроме одного, который и является причиной окраски предмета, поглотившего остальные краски.

Если внимательно рассмотреть красное изображение в левой части экрана, получаемое при помощи красного стекла, мы увидим, что верхняя и нижняя части его резкие, а с боков оно размыто. Первые являются изображениями верхнего и нижнего краев щели, и свет каждой длины волны оставляет здесь свой прямолинейный след. В то же время размытость правой и левой частей изображения показывает, что изображение образовано светом не одной длины волны, а небольшой „полосой“ волн различных длин вблизи красной части спектра, и поэтому здесь имеет место некоторое наложение изображений.

Если вместо красного стекла поставить желтое, это наложение становится очень заметным (табл. XI F). С первого взгляда спектр кажется почти таким же, как и без стекла, но более внимательное наблюдение показывает, что крайний синий его конец отсутствует. Что желтое стекло пропускает такую большую область длин

волн — довольно неожиданный факт. Мы склонны считать этот желтый цвет чистым. Так как наш опыт показывает, что свет, пропущенный желтым стеклом, обладает большим разнообразием длин волн, из которых каждая в отдельности оказывает свое влияние на глаз, то мы можем заключить, что призма и глаз дают различный критерий „чистоты“ цвета. В этом заключается одна из замечательных особенностей глаза. Прежде чем рассмотреть ее детально, займемся еще немного явлением окраски.

Окрашенные жидкости так же, как и стекла, кажутся окрашенными вследствие поглощения ряда цветов. Тот же процесс является причиной окраски твердых тел. Когда мы накладываем краску на белую бумагу, мы не вызываем атим появления света другого цвета, но задерживаем некоторое количество уже существующего. Белая бумага, на которой мы рисуем, отражает все цвета, попадающие на нее. Мы накладываем на бумагу слой прозрачной жидкости, сквозь которую свет проходит дважды, прежде чем он достигает нашего глаза — один раз по пути к бумаге, и второй — после отражения от нее. Если жидкость поглощает все длины волн кроме красных, то в глаз возвращается один только красный свет: мы окрасили бумагу в красный цвет. Если жидкость поглощает только фиолетовые лучи, — бумага отражает желтый свет; если жидкость поглощает только красные лучи, бумага делается зеленовато-синей и т. д. Когда мы делаем на бумаге мазок за мазком красками различных цветов, число факторов, задерживающих свет, возрастает (причем в неумелых руках остающийся свет, достигающий глаза, получается иногда тусклым и грязным).

Несколько иначе получается в случаях масляных красок. Последние содержат твердые включения, которые отражают и рассеивают падающий свет и играют ту же роль, что и белая бумага при рисовании акварельными красками. В этом случае свет не достигает полотна: один слой краски оказывается достаточно плотным для того, чтобы полностью закрыть другой слой, на который он наложен. То же самое получается и в случае акварельных красок при смешении какой-нибудь краски с белой.

Факт появления различных цветов вследствие погло-

ижения красками света, конечно, прямо противоречит предположению, что один цвет может превращаться в другой, как можно было предположить вначале. И в этом случае мы получаем результат, согласный с волновой теорией. Мы знаем, что одна система волн не может непосредственно превратиться в другую с новой длиной волны. Океанские волны не превращаются в мелкую рябь при прохождении сквозь отверстия или при отражении их от препятствий. Точно так же нельзя ожидать, что красный свет станет синим после прохождения сквозь окрашенную среду или после отражения от какого-нибудь предмета. Источник света является источником света всех цветов. Мы неизбежно приходим к выводу, что белый свет солнца каким-то образом содержит весь спектр цветов до того, как он разлагается призмой.

Если мы исследуем таким же способом свет, испускаемый другими источниками, мы обнаружим, что их спектр отличается от солнечного. Например, спектр желтого пламени керосиновой лампы не содержит коротких длин волн. Даже спектр солнца не остается постоянным, но меняется время от времени. Синяя материя кажется синей, потому что при дневном освещении ее краска поглощает большую часть света, падающего на нее, и отражает в глаз только глубокий синий цвет. При освещении керосиновой лампой эта материя кажется черной, потому что свет лампы не содержит того единственного цвета, который ткань может отражать; поэтому она вообще не отражает никакого цвета.

Если взять букет первоцветов, которые мы считаем „чисто желтыми“, и освещать его последовательно различными лучами спектра, то цвет букета будет меняться. В красных лучах цветы видны красными, в желтых — они имеют естественный цвет, в зеленых — они кажутся зелеными, но в темносинем они становятся черными. Последний цвет является единственным, который они не могут отражать. Таким образом наблюдаемый нами цвет зависит не только от окраски предметов, но также и от состава света, позволяющего нам видеть этот предмет. Солнечный свет, попадающий в комнату, может встретить белую или окрашенную стену или ковер, и все впечатление от комнаты, создаваемое освещением, зависит от того, какая из этих возможностей имеет место.

Что же тогда является тем „белым“ светом, при разложении которого получаются все цвета? Мы, конечно, склонны считать им обычный дневной свет. Но, как мы видели, последний меняется по своим качествам; фотографы хорошо знакомы с этим фактом. Когда солнце приближается к закату, его свет обогащается оранжевыми и красными лучами. На вершинах гор он содержит синих лучей гораздо больше, чем на поверхности земли. Таким образом определить, что такое белый дневной свет — нелегко. Имеется некоторый средний состав лучей, различных длин волн, который называют „белым“ светом; это определение оказывается достаточным для обычных целей. Если требуется большая точность, должны быть указаны относительные интенсивности отдельных составных частей, непосредственно или при помощи сравнения с какими-нибудь эталонными источниками света, которые сами должны быть полностью исследованы. В природе не существует белого света; „белизна“ есть качество, зависящее от нашего определения. В простейшем случае мы можем говорить о поверхности бумаги или другого тела, как о „белой“, потому что естественно считать таковой поверхность, полностью отражающую или рассеивающую свет любого состава. Это свойство — пассивное по сравнению с активными свойствами самого цвета. Белая поверхность кажется красной при красном освещении, синей — при синем и т. д. Но и в этом случае название дается по признаку одинаковой отражательной способности всех видимых лучей, находящихся в пределах узкой области спектра и воспринимаемых глазом; если же мы выйдем за пределы этой области, может возникнуть необходимость пересмотреть наше определение. Прозрачные и бесцветные жидкости, вроде бензола, свободно пропускают видимые лучи. Но если бы область видимого света включала длины волн короче, чем у фиолетовых лучей, мы уже не называли бы бензол бесцветной жидкостью, потому что он поглощает эти ультрафиолетовые лучи.

КАК ГЛАЗ ВОСПРИНИМАЕТ ЦВЕТА

Ощущение цвета зависит от качества света. Рассмотрим теперь, как глаз реагирует на падающее на него излучение.

Протрем сначала следующий опыт. Возьмем два дуговых фонаря и расположим их так, чтобы с помощью круглых отверстий и линз они отбрасывали на экран два ярких белых пятна; мы можем сдвигать один из фонарей или одну из линз так, чтобы светлые круги накладывались один на другой. Если перед одним фонарем поместить синее стекло, а перед другим — желтое, перекрывающиеся части картины на экране получают синий свет от одного фонаря и желтый — от другого. Глаз видит эту часть экрана белой. Мы знаем, что синяя и желтая краска при смешении дают зеленую; получается кажущееся противоречие. Однако его очень просто разрешить. Если поместить синее и желтое стекло перед одним фонарем, пятно на экране, получающееся от этого фонаря, действительно становится зеленым. Этого следовало ожидать, потому что, как мы видели, желтое стекло отсекает синий конец спектра, а синее стекло, как легко убедиться — красный конец спектра. Если луч света, первоначально белого, проходит сквозь оба стекла, остается только средняя часть спектра, содержащая почти исключительно зеленые лучи. Когда же мы освещаем одно и то же место экрана синим и желтым светом и получаем в результате белый, мы не имеем последовательного поглощения света. В этом случае происходит как раз обратное: мы воспринимаем глазом одновременно синий и желтый свет. На экране в том месте, где происходит наложение цветных кругов, падают все лучи спектра, и хотя его центральные цвета представлены в слишком большом количестве, глаз воспринимает все вместе, как белый цвет.

Делая тот же опыт с красным и зеленым стеклами, мы получим аналогичный результат. Место, где цветные круги накладываются друг на друга, получается желтым; когда же оба стекла поставлены перед одним фонарем, они отсекают все лучи, и экран кажется темным. Исследование, сделанное при помощи призмы, показывает, что красное стекло поглощает все лучи кроме красных, а зеленое — красные и часть синих. Таким образом сквозь оба сложенных стекла свет не проходит вовсе, тогда как в месте наложения присутствуют все лучи кроме синих; как мы указывали выше, глаз видит при этом желтый цвет (табл. XI В).

В таких опытах мы встречаемся с фактом, что цвет, являющийся для глаза „чистым“, может представлять собою смесь многих лучей, каждый из которых сам по себе обладает характерным для него цветом. В определенном месте спектра мы видим желтый цвет, к которому можно причислить весьма ограниченную область длин волн; в то же время свет, проходящий сквозь желтое стекло, содержит почти все длины волн. Дальнейшее исследование показывает, что количество возможных способов составления желтого цвета, кажущегося для глаза одинаковым, — неограничено. Это свойство весьма замечательно, потому что поведение уха по отношению к звукам, воспринимаемым им, существенно иное. В мире звука сигнал передается волновым движением аналогичным тому, с которым мы имеем дело сейчас, когда занимаемся миром света. Но в случае звука носителем волн является материальная среда, а именно воздух или другие газы, жидкости и твердые тела. При восприятии звука, так же как и света, ощущение зависит от длины волны. Чем короче длина волны, тем выше слышимая нота и наоборот. Самому низкому звуку рояля соответствует длина волны в несколько метров, — самому высокому — в несколько сантиметров. Тут аналогия между светом и звуком — полная; но она нарушается, когда мы сравниваем результат совместного действия многих волн. Мы видели, что когда в глаз попадают вместе два световых луча различных длин волн, получается ощущение чистого цвета; глаз не в состоянии обнаружить существование двух цветов и разложить свет на составные части. Ухо же всегда распознает характер смеси звуков различных частот; диссонирующая нота всегда чувствуется в аккорде, взятом на нескольких струнах. Это свойство играет большую роль в музыке; эта роль станет нам понятна, если мы представим себе, какие ужасные последствия имела бы замена каждого аккорда музыкального произведения некоторой средней нотой, воспринимаемой, как „чистый“ тон.

Делались многочисленные попытки сконструировать инструмент, который бы действовал на наши чувства при помощи игры цветов; каждая клавиша такого инструмента позволяет осветить экран светом определенного

цвета. Эти попытки всегда оканчивались неудачей: глубокого впечатления, которое производит на нас музыка, при этом не получается. Очень возможно, что это объясняется неспособностью глаза разлагать „аккорд“ цветов. Здесь аналогия между глазом и ухом не имеет места, и это обстоятельство не учитывают изобретатели „цветных органов“. Одновременную проекцию нескольких цветов на различные места экрана, пожалуй, можно считать аналогичной одновременному звучанию нескольких звуков, однако такие аналогии становятся скользкой почвой для дальнейших выводов.

Механизм уха содержит систему приемников, каждый из которых реагирует только на звуки, соответствующие узкой полосе частот. Это напоминает комнату, в которой находится большое число остро настроенных радиоприемников. Глаз нельзя сравнить с такой многочисленной системой „избирательных элементов“: у него меньше приемников, и они не имеют такого специального устройства. Было произведено много исследований для выяснения устройства механизма приемников света. Эта проблема настолько сложна, что не удивительно, что полного решения еще не имеется; однако некоторые основные факты теперь уже известны; результаты всех исследований показывают, что (применяя для наглядности описания аналогию с радиопередачей) имеется три сорта приемников, каждый из которых откликается на большую область длин волн, подобно радиоприемнику с „тупой“ настройкой. Два из них чувствительны к краям видимого спектра, а один — к длинам волн посередине его, при этом каждый приемник откликается в той или иной степени на большую часть всего спектра. Наше ощущение цвета зависит от относительной чувствительности этих трех сортов приемников к свету, попадающему в глаз. Если один из них, например тот, который сильнее всего откликается на красный свет, отсутствует или действует лишь частично, такой глаз более или менее нечувствителен к красному свету; он с трудом отличает красные цветы от зеленых листьев. Многие люди являются цветнослепыми вследствие этой причины: красные приемники бывают недостаточно представлены чаще всего. Владелец глаза может ничего не знать об этом дефекте его зрения. Джон Дальтон, знаменитый химик, до сорока лет не знал, что он является цветно-

слепым, пока Томас Юнг не обнаружил у него этот недостаток. Точное определение спектральной чувствительности приемников производится главным образом при помощи сравнения ощущений нормального глаза и цветнослепого.

Мы можем теперь объяснить, почему различные комбинации длин волн кажутся нам одинаковыми. Каждое цветовое ощущение получается в результате действия трех сортов приемников, присутствующих в определенном соотношении. Так как каждая длина волны действует, по крайней мере, на два из них, а часто и на все три, но не одинаково сильно, а в определенном соотношении, то любое цветовое впечатление может быть получено с некоторыми ограничениями при помощи трех длин волн, соответствующим образом подобранных по положению в спектре и по интенсивности.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЦВЕТА

Если предположить, что органы, воспринимающие свет, могут утомляться при пользовании ими и становиться менее чувствительными, то легко объяснить частое появление так называемых дополнительных цветов. Если в течение нескольких секунд не отрывать глаз от какого-нибудь ярко окрашенного предмета, а затем перевести их на освещенную поверхность, предпочтительно белую, мы видим пятно другого цвета, которое стоит перед глазами и перемещается вместе с ними. Объяснение этого явления заключается в том, что приемники утомляются в этом случае неодинаково. Когда мы смотрим на красный цвет, красные приемники утомились сильнее, чем другие, и поэтому, когда в глаз затем попадает белый свет, оказывается, что остальные два сорта приемников обладают большей восприимчивостью, и мы видим синезеленый цвет.

Замечательный пример этого явления можно наблюдать на спектре дуговой лампы, спроектированном на экран. Сосредоточим наш взгляд на определенной точке спектра, отмеченной каким-либо способом, а затем приблизительно через четверть минуты погасим дугу и осветим комнату. Мы увидим тогда нечто вроде обращенного спектра, в котором синий и зеленый цвета будут в том месте,

где прежде был красный, а последний там, где был синий; яркие цвета посредине превращаются в пурпуровый.

Наблюдаемые при этом дополнительные цвета значительно слабее, чем первоначальные, но можно сделать очень эффектный опыт, в котором имеет место обратное явление. Возьмем картонный диск диаметром около полуметра, вырежем в нем сектор и разделим оставшуюся

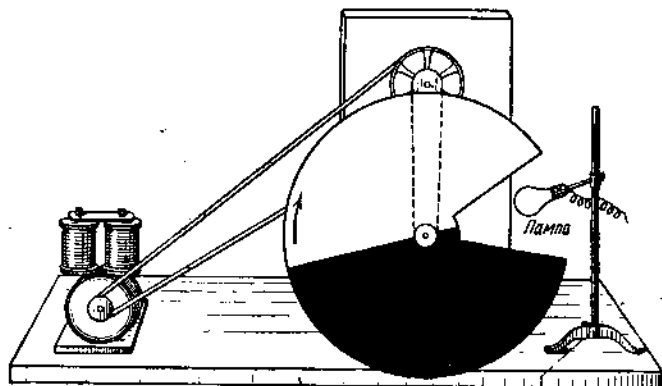


Рис. 53. Диск вращается в направлении, показанном стрелкой. Красная лампа видна сквозь вырез в диске. Она кажется зеленой, а не красной. Диск должен быть хорошо освещен

часть на две половины — одну черную, другую белую, как показано на рис. 53. Насадим диск на ось, делающую два или три оборота в секунду. Установим красную лампу так, как показано на рисунке, сильно осветим обращенную к нам сторону диска и приведем его во вращение. Во время вращения мы видим в течение короткого времени красную нить лампы, затем последовательно белую половину диска, черную, снова нить лампы и т. д. Когда белая часть диска закрывает лампу, мы должны, как и в прежних опытах, видеть зеленый дополнительный цвет. Интересно, что этот зеленый цвет настолько сильнее красного, что при вращении диска мы вообще не видим последнего. Реакция оказывается в этом случае интенсивнее первоначального ощущения. Забавно наблюдать, как нить лампы превращается из красной в зеленую. Если вращать диск в обратную сторону, цвет лампы не меняется, оставаясь красным; при этом черный сектор

закрывает лампу сейчас же после того, как мы на нее смотрели, и свет, который мог бы вызывать вторичное действие, отсутствует.

ЦВЕТОВЫЕ ОБМАНЫ

Явления такого рода обуславливаются некоторыми особенностями глаза, которые не подчиняются нашему контролю. Другие явления, без сомнения, происходят в результате неправильной оценки. Мы уже рассматривали соответствующие примеры и теперь увидим, что это имеет место и при восприятии цвета. Если, например, расположить рядом три цветных квадрата — красный, пурпуровый и синий — в том порядке, какой представлен на табл. XI 1, довольно трудно отделаться от впечатления, что пурпуровый квадрат — неравномерный. Он кажется красноватым в той части, где он соприкасается с синим, и синеватым на границе с красным. Можно предполагать, что при мгновенном взгляде на красный квадрат мы утомляем наши красные приемники и вследствие этого, когда глаз переходит на пурпурное поле, красный цвет воспринимается слабее. Можно также предполагать, что вблизи красного поля мы неверно представляем себе пурпуровый цвет, считая его слишком красным вследствие привычки к изобилию красного цвета в течение кратковременного наблюдения красного поля. Эти два объяснения не тождественны, но трудно решить, какое из них следует признать правильным.

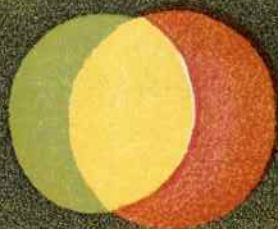
Указанное явление широко используется в живописи и в различных орнаментах, где приходится иметь дело с цветами. Нанесение одних цветов рядом с другими позволяет „подчеркивать“ последние или менять их видимый оттенок.

Когда мы смотрим на картину, ее вид зависит от всех рассмотренных нами явлений. Наиболее важную роль играет при этом свет, попадающий в комнату извне или от специально установленных источников; затем, прежде чем упасть на картину, свет изменяется при отражении от различных предметов, находящихся в комнате, и, наконец, ощущение, которое мы получаем, смотря на картину, зависит от окраски тех предметов, на которых останавливается наш взгляд до того, как мы посмотрели

A



B



C



D



F



E



G



H

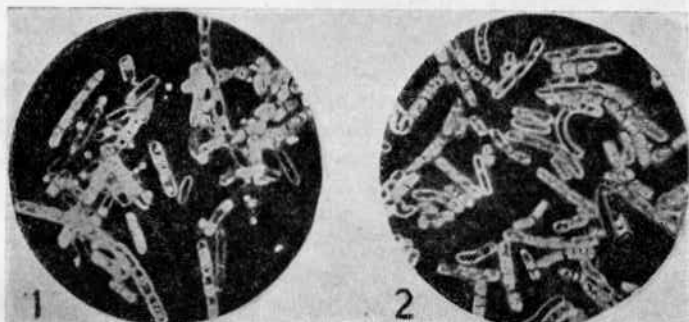
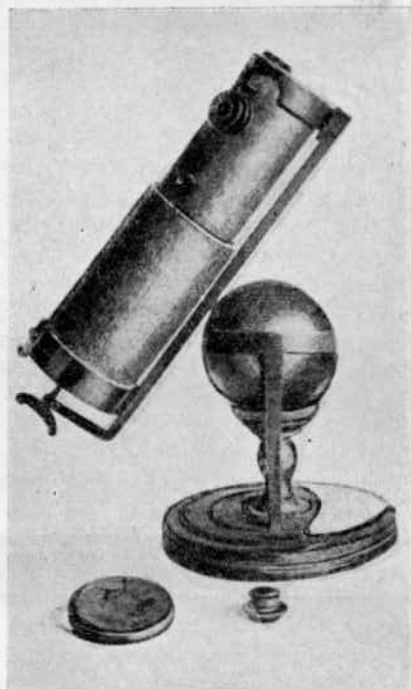


I



А. Старинная надпись на штативе гласит: „Первый отражательный телескоп, изобретенный сэром Исааком Ньютоном и сделанный его собственными руками в 1671 году“. Высота инструмента около полуметра (стр. 92).

В английском издании фотография воспроизведена с официального разрешения Королевского общества.



В. Микрофотографии бактерий (мегатериум В, увеличение 2 000), полученные И. Е. Бернардом. 1 — в видимом свете при наилучших возможных условиях. 2 — в ультрафиолетовых лучах (длина волны $2743 \text{ \AA}$). У объектов, получившихся на 1 в виде белых дисков, можно различить значительно больше деталей, чем на 2 (стр. 94).

ТАБЛИЦА XIII



А. Когда вода прозрачна, нависающие над рекой деревья не оставляют теней на ее поверхности (стр. 129).



В. Если вода мутная, тени становятся заметными. Оба приведенные рисунка не следует сравнивать в отношении густоты теней и светлых мест. Мутная вода на самом деле освещена солнцем, но на таких простых рисунках нет возможности изобразить соотношение тонов, имеющее место в действительности (стр. 129).

на картину, или тех, которые мы можем видеть все время. Повидимому, идеальные условия для показа картины — это освещение ее светом той же интенсивности и того же состава, как и освещавший модель во время рисования, и идентичность обстановки, окружающей картину, с той, которая окружала художника. Рисунок, сделанный под открытым небом при ярком дневном освещении, не будет казаться вполне естественным, если его рассматривать вечером при обычном искусственном освещении глазом, который при наступлении вечера начинает воспринимать цвета несколько иначе. Когда свет керосиновой лампы падает на лист белой бумаги, около которого находится другой лист той же бумаги, освещенный дневным светом — этот опыт весьма просто осуществить в лаборатории, — первый кажется по сравнению со вторым оранжево-коричневым. В то же время вечером этот свет может служить образцом белого света; предметы других цветов испытывают, конечно, аналогичные изменения. В наше время яркого ночного освещения разница между днем и ночью не так велика, но даже наиболее яркие и белые „полуватные“ электрические лампы все же далеки от дневного света. У искусственных источников света необходимо сильно ослаблять интенсивность лучей с большой длиной волны с помощью синих стекол для того, чтобы приблизить их свет к дневному. Свет лампы накаливания содержит синие лучи, но в недостаточном количестве. Спрос на лампы „дневного света“ в последнее время сильно повысился; они требуются, например, для магазинов, где применимо только искусственное освещение; во многих случаях они могут быть полезны художникам и декораторам. Изменение цвета в зависимости от природы освещения иногда бывает поразительным. Два куса материи могут казаться при дневном свете зелеными, тогда как при искусственном освещении один остается зеленым, а другой становится коричневым.

ЦВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЛИНЗАХ

Обычная линза не сводит в один фокус свет белого источника, потому что когда белый свет испытывает преломление, синие лучи отклоняются сильнее красных. Рис. 54 показывает ход лучей: синие собираются ближе

к линзе, чем красные. Если лист белой бумаги поставить в точке *A*, получится красный круг, если же мы передвинем экран в точку *B*, круг будет синим. При этом нигде все цвета не собираются в одну и ту же точку.

Глаз также обладает этим свойством. Часто, смотря на яркое небо через окно, можно видеть красное или синее окаймление его контура, причем эти цвета зависят от аккомодации глаза. Однако невозможность одновременной фокусировки всех цветов беспокоит нас очень мало.

В оптических инструментах, в которых часто приходится применять увеличение, это обстоятельство может

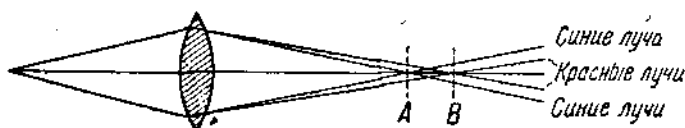


Рис. 54. Линза собирает синие лучи в фокус *A*, расположенный к линзе ближе, чем фокус *B* красных лучей

быть фатальным; к счастью, как мы скоро увидим, можно построить неокрашивающую „ахроматическую“ линзу, которая устраняет это затруднение.

Недостаточная ахроматичность глаза приводит иногда к любопытным последствиям. Так как красные лучи преломляются слабее синих, оптическая система глаза при наблюдении красного предмета должна обладать меньшим фокусным расстоянием. Напряжение глазных мускулов дает нам некоторые указания на расстояние предмета, и обычно чем сильнее это напряжение, тем меньшим мы считаем расстояние. Вследствие этого мы склонны считать, что красные предметы находятся на меньших расстояниях от нас, чем синие, при прочих равных условиях. Вероятно, поэтому красное помещение кажется нам меньше синего. Возможно также, что синий цвет ассоциируется с впечатлением от открытого ландшафта; но первая причина, повидимому, играет большую роль. Красные буквы на пестрой почтовой марке кажутся выступающими относительно синих. Точно так же, когда мы видим ряд красных и синих предметов одинакового размера, находящихся на одном и том же расстоянии

от нас, мы склонны считать синие предметы большими, потому что они кажутся нам дальше красных.

Интересный пример этого любопытного обмана можно найти во французском национальном флаге. Его три вертикальные полосы — красная, белая и синяя — имеют неодинаковую ширину. Первоначально они делались одинаковыми, но тогда синяя казалась шире красной. Этот вопрос специально изучался особой комиссией, и последняя пришла к заключению, что ширины синей, белой и красной полос должны относиться, как 30 : 33 : 37; эти числа были получены в результате опыта. Только такие полосы глазу кажутся одинаковыми. Можно предположить, что синяя полоса кажется глазу дальше красной и это служит причиной того, что при равенстве угловых величин полос мы синей приписываем большие размеры, чем красной. Следует отметить, однако, что современные авторы считают объяснение этого явления не таким простым.

На близких расстояниях мы видим в синем свете отчетливее, чем в красном. Короткие длины волн собираются в фокус на сетчатке, в то время как длинные уже сходятся в точку за ней, несмотря на максимальное напряжение глазных мускулов. Это объясняет, по крайней мере отчасти, то обстоятельство, что близкие к глазу детали видны в синем свете яснее, чем в красном.

Разложение цветов, всегда происходящее при преломлении лучей белого света, является серьезным затруднением при применении оптических инструментов для „вооружения“ глаза, потому что увеличение получается в результате многократного преломления, что сопровождается большим разделением цветов.

В поле зрения простого бинокля яркие детали часто бывают окружены цветными кольцами, мешающими наблюдению. При большом увеличении сильных инструментов это явление становится совершенно недопустимым.

Любопытно, что Ньютон считал это затруднение непреодолимым; поэтому он отказался от применения линзы в качестве объектива телескопа и вместо нее воспользовался сферическим зеркалом. Последнее также образует изображение, которое рассматривают при помощи окуляра, как в лупу, но при этом не получается разложения света на составные цвета. Представленное на рис. 55 большое

вогнутое зеркало M давало бы изображение в точке A , если бы в m не помещалось маленькое плоское зеркало, которое отражает лучи, так что изображение получается в B . Здесь установлен окуляр. Если бы изображение получалось в A , голова наблюдателя приходилась бы на пути лучей. Фотография телескопа Ньютона показана на табл. XII А.

Однако существует способ избавиться от окрашивания изображений, впервые введенный в практику Доллондом, который в 1758 г. сконструировал первый ахроматический

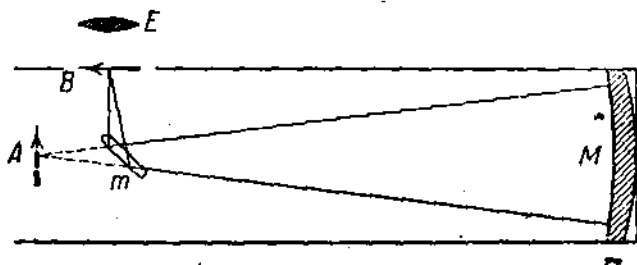


Рис. 55. Схема телескопа Ньютона

телескоп. Его устройство основано на том, что разложение цветов, сопровождающее преломление, не пропорционально преломляющим свойствам различных сортов стекла. Можно изготовить две линзы — одну из кронгласа, другую из тяжелого флинтгласа, которые разлагают лучи одинаково, но отклоняют их на различные углы. Свет проходит сквозь выпуклую линзу так, как показано на рис. 56а, причем синие лучи фокусируются в B , а красные в R .

С другой стороны, сквозь вогнутую линзу тот же световой пучок проходит так, как показано на рис. 56б. Общее преломление меньше, чем в случае кронгласа, но разложение α в обоих случаях одинаково.

Если такие две линзы сложить вместе, спектральное разложение будет скомпенсировано, но не общее преломление. Собирающая сила кронгласовой линзы больше, чем рассеивающая сила флинтгласовой. Обе линзы вместе будут действовать так, как показано на рис. 56с.

Таким образом пучок лучей собирается в бесцветную точку; система получается ахроматической. Правильнее

было бы сказать, — почти ахроматической. Любые две длины волн, например отмеченный буквой B фокус синих лучей и R — красных, могут быть сведены описанным методом в одну и ту же точку. Но это не относится ко всем длинам волн спектра: тогда как B и R могут быть сведены вместе совершенно точно, другие части

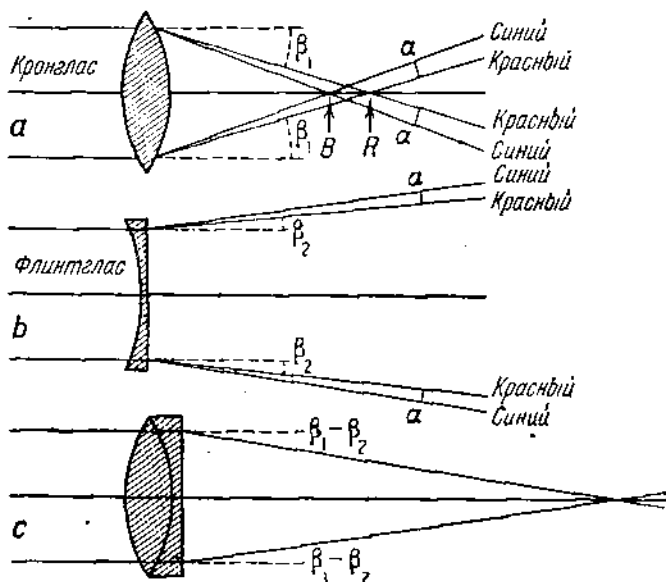


Рис. 56. a — линза из кронгласа. Ее собирательная сила измеряется углом β_1 . Величина спектрального разложения измеряется углом α . b — линза из флинтгласа, рассеивающая сила которой определяется углом β_2 меньшим β_1 ; она производит такое же разложение α , как и первая линза. c — две сложенных линзы не отделяют красных лучей от синих, обладая при этом собирательной силой $\beta_1 - \beta_2$.

спектра будут совпадать лишь приблизительно. Таким образом недостаток значительно исправляется, но не устраняется полностью. В случае микроскопа дальнейший шаг в направлении увеличения отчетливости изображений можно сделать, применяя узкую область длин волн. Конечно, это делает изображения цветными, но окраска изображений мешает меньше, чем их нерезкость. В последнее время удалось добиться больших успехов при помощи монохроматических ультрафиолетовых лучей, действу-

щих на фотографическую пластинку и невидимых для глаза. Фотография бактерий, полученная таким способом, представлена в качестве примера на табл. XII В.

Все эти факты, связанные с окраской оптических изображений, приносят оптикам много добавочных трудностей. Чем больше увеличение оптического инструмента, тем большая тщательность требуется при изготовлении линз, из которых он состоит. Изучение как великого, так и малого тесно связано с употреблением телескопа и микро-

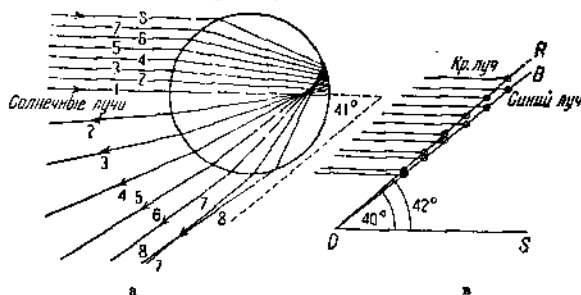


Рис. 56-а. Круг представляет сферическую каплю воды. Параллельные лучи Солнца входят в верхнюю ее часть и выходят, испытав два преломления и одно отражение; цифры указывают пути отдельных лучей. Большинство выходящих лучей почти параллельны линии, составляющей с направлением падающих лучей угол в 41° (в действительности 42° для красных лучей и 40° для синих).

Рис. 56-б. Наблюдатель в O, смотрящий вдоль линии, составляющей угол в 42° с направлением на Солнце (которое находится за наблюдателем), воспринимает красные лучи от каждой капли, находящейся на этой линии. Эти лучи образуют конус с осью OS. Конус синих лучей расположен внутри конуса красных.

скопа, и поэтому мы многим обязаны тем людям, которые посвящали себя усовершенствованию этих инструментов.

РАДУГА

Сверкающая окраска капель, остающихся на листьях, которую мы можем наблюдать, когда после дождя появляется солнце, возникает в результате преломления и отражения лучей солнца. Капли уходящего дождя разлагают солнечный свет на цвета, которые, собираясь вместе, образуют радугу. Как это получается, объясняют два прилагаемые рис. 56-а и 56-б.

Отметим, что радуга не находится на каком-нибудь определенном расстоянии от наблюдателя, хотя ее цвета и наблюдаются в определенных направлениях.

Глава IV

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЦВЕТОВ

ПРИНЦИП РЕЗОНАНСА

Мы видели, что в огромном большинстве случаев окраска появляется вследствие исчезновения некоторых цветов. Свет солнца является сложным комплексом цветов, разлагаемых призмой на ряд лучей различного качества. Мы называем это качество цветом, физик называет его длиной волны. Мы познакомились с любопытным механизмом глаза, посредством которого он воспринимает цвета и смесь цветов и передает ощущение в мозг.

Рассмотрим теперь более детально, как происходит исчезновение цветов. Свет солнца падает на предметы, окружающие нас, — на листья, траву, цветы, на птиц, насекомых, на самую землю, и при этом везде появляется окраска. Следовательно, всюду должно иметь место исчезновение цветов. Как же это получается? Какой процесс позволяет красящим веществам выполнять их назначение?

Отметим, что хотя в большинстве случаев окраска тел, окружающих нас, вызывается красящими веществами, существуют другие причины появления цветов, чрезвычайно интересные и важные и вызывающие самые красивые цветовые явления. Их можно, вообще говоря, рассматривать как следствие явлений, называемых дифракцией и интерференцией. Мы познакомимся с ними в свое время; теперь же остановимся на цветах красящих веществ, которые наиболее часто являются причиной окраски.

Секрет заключается в явлении, известном под именем резонанса, многочисленные проявления которого весьма обычны. Возьмем простой случай, именно влияние одного камертона на другой, настроенный на ту же ноту. Оба камертона укреплены каждый на своем ящике и стоят

рядом на столе. Мы возбуждаем один из них, проводя по нему смычком. Оставляя камертон звучать в течение нескольких секунд, мы затем заставляем его замолчать прикасаясь к нему пальцем. Тогда становится слышно звучание второго камертона, хотя мы его совершенно не трогали; он пришел в колебательное движение под влиянием первого. Через секунду мы прекращаем его звучание и тогда обнаруживаем, что первый камертон опять обладает некоторой долей той энергии, которую он имел вначале, и опять звучит, хотя и слабо.

Важно, чтобы камертоны были правильно настроены. Если на один из них наклеить кусочек воска, переход энергии от одного к другому прекращается, и явление резонанса не имеет места.

Имеется огромное количество других примеров. Если нажать одну из клавиш рояля для того, чтобы приподнять демпфер над струной, а затем громко пропеть ноту, соответствующую нажатой клавише, струна откликается и ее звук можно слышать после того как голос умолкает. Никакая другая нота не будет при этом откликаться: голос и струна должны быть в унисоне, если только не считаться с тем, что отзвук иногда получается вследствие того, что каждый источник не является вполне простым и его звук содержит кроме основного тона еще и обертоны, дающие дополнительные возможности для резонанса.

Когда-то знаменитых певцов прославляли тем, что они могут разбить стеклянный бокал, не дотрагиваясь до него, спев в него ту ноту, которую издает сам бокал, если по нему стукнуть.

Наиболее обычное в наше время резонансное явление лежит в основе радиовещания. Настраивая приемник на какую-нибудь станцию, мы непосредственно пользуемся принципом резонанса; мы вращаем рукоятки радиоприемника до тех пор, пока период или частота электрических колебаний в его конденсаторах и катушках не сделаются в точности равными периоду волны передающей станции. Отдельные станции посылают волны различных частот, отличающиеся друг от друга тем же, чем отличается один цвет от другого. Каждая станция имеет особую частоту — свой собственный „цвет“. Наш радиоприемник является „краской“, поглощающей один из цветов, и мы имеем воз-

возможность изменять эту „краску“ так, что бы она поглощала нужный нам цвет. Чем совершеннее приемник, тем более точную настройку он имеет: он лучше откликается на нужную станцию и совершенно не реагирует на все остальные.

Задаваясь вопросом, для чего необходима настройка и почему она позволяет получать такие хорошие результаты, мы рассмотрим один частный случай, в котором движение настолько медленно, что его можно непосредственно наблюдать. Представим себе ребенка, качающегося на качелях. Качель имеет определенный период качания — частоту, под которой понимают число качаний за одну минуту или вообще за какой-нибудь промежуток времени. Если давать качели толчки в соответствующие моменты, ее размах непрерывно возрастает до тех пор, пока энергия каждого толчка не начинает полностью расходоваться на преодоление сопротивления воздуха и других противодействующих сил. Если же толчки следуют друг за другом беспорядочно, или даже периодически, но через промежутки времени, не равные периоду качели, последовательные толчки мешают друг другу. Один толчок приходится в момент, когда качель приближается к среднему положению, что способствует движению, другой — когда она удаляется от этой точки, что, конечно, препятствует движению, и т. д. Продолжительный ряд правильно чередующихся толчков в этом случае не способствует качанию, потому что они одновременно помогают и мешают движению.

Когда один камертон приводит в колебание другой, каждый толчок, передаваемый воздухом, очень слаб; но при правильном чередовании их действие „накапливается“. Когда на мосту маршируют „в ногу“, то это может оказаться опасным в случае, когда период колебаний моста совпадает с периодом марша; если мост недостаточно прочен, он не выдержит. Поэтому иногда при прохождении моста отдается команда расстроить шаг. Таким образом во всех случаях резонанса слабые импульсы обладают сильным действием, если они правильно чередуются.

Поглощение краской света определенной длины волны также является резонансным явлением, напоминающим те, о которых мы упоминали выше; в частности, оно

имеет много общего с радиоприемом, потому что это явление имеет электрическую природу и оно касается тех же эфирных волн, отличающихся от радиоволн только своей длиной. Радиоприемник поглощает длинные эфирные волны, тогда как нечто, содержащееся в краске, поглощает короткие световые волны.

Радиоприемник состоит из электрических конденсаторов и проволочных катушек, соответствующим образом подобранных. Атомы и молекулы являются приемниками света; мы можем это утверждать, несмотря на то, что едва ли возможно сравнивать элементы, их составляющие, с элементами радиоприемника. Однако некоторые свойства атомов и молекул, рассматриваемых как резонаторы, чрезвычайно интересны, и к их рассмотрению мы сейчас и перейдем. Таким образом мы изучим краски самой природы.

Имеется один пункт, который мы должны предварительно выяснить для того, чтобы связь между поглощением приемника и его приемными свойствами стала вполне отчетливой. Звучащий камертон возбуждает другой; при этом некоторое количество энергии, испускаемой первым, передается второму. Совершенно так же каждый радиоприемник поглощает определенное количество энергии из эфира. Можно при помощи специальных устройств, хорошо известных радиоспециалистам, „отсасывать“ электромагнитную энергию из отдельных элементов аппаратуры, но мы касаться этого не будем, ибо это не входит в тему нашей книги.

Представим себе камертон, испускающий энергию по всем направлениям. Пусть где-нибудь звуковые волны попадают в пространство, где имеется много камертонов „приемников“, настроенных на тот же тон, что и первый. Все камертоны-приемники придут в колебание, и энергия вследствие этого поглотится. Ясно, что дальше в этом направлении пойдет значительно меньше энергии, чем первоначально. Хотя все камертоны-приемники начинают излучать ту же ноту, но их общая энергия, которая, конечно, не может быть больше поглощенной, рассеивается по всем направлениям. Таким образом в прежнем направлении энергии идет меньше. Иными словами, наша батарея камертонов действует, как поглотитель энергии. Если бы камертон-источник был не один, а вместо него

стояло бы несколько, издающих различные ноты, в том числе одну, совпадающую с тоном камертонов-приемников, последние не поглощали бы энергии звуковых волн, идущих от камертонов иного тона; действие нашей батареи было бы избирательным, она поглощала бы только одну „собственную“ длину волны, свободно пропуская все остальные.

Сходство с действием краски очевидное. Краска представляет собой собрание одинаковых атомов и молекул, способных испускать и поглощать свет определенных длин волн. Мы говорим о многих длинах волн, потому что камертон является простым источником музыкального звука и не может представлять всего многообразия возможных колебаний, которыми обладает атом или молекула. Спектр белого света, прошедшего через пространство, заполненное такими сложными вибраторами, свидетельствует об огромном количестве этих возможностей.

КОЛЕБАНИЯ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

Размеры атомов и молекул весьма малы. Мы будем выражать их в удобных единицах длины, а именно в единицах Ангстрема [или просто в ангстремах ($\text{\AA}$)], равных одной стомиллионной доле сантиметра. Существует девятьно два сорта различных атомов. Молекулы чаще всего состоят из небольшого числа атомов — двух, трех и т. д., однако существуют и большие молекулы, содержащие двадцать, тридцать и больше атомов. Размеры атомов — порядка 1, 2 или 3 $\text{\AA}$.

Различными методами удалось весьма точно измерить эти малые частицы. Так, рентгеновский анализ позволяет измерять их с большой точностью, по крайней мере, в тех случаях, когда атомы и молекулы образуют кристалл. Химик может в большем числе случаев представить себе расположение молекул; он может сказать, как размещены атомы один по отношению к другому и какие из них находятся рядом. Это выясняется при помощи исследований химических реакций, под которыми понимают все процессы, в которых молекулы обмениваются атомами и образуют новые соединения. Этот вопрос слишком обширен, для того чтобы разбирать его здесь. Отметим лишь, что такие исследования имеют огромную важ-

ность, особенно для той отрасли химии, которая занимается молекулами, входящими в состав живых организмов. Особенности молекул, как этого и можно было ожидать, зависят от расположения атомов, так же как свойства здания определяются расположением материалов, из которых оно построено: кирпичей, досок, черепицы и т. д. В этих исследованиях рентгеновские лучи приходят на помощь химику; мы увидим дальше, как они дополняют новыми данными те сведения, которые найдены химическим путем.

Хотя мы и не можем описать колебания молекулы так же легко, как мы описываем движение камертона, но в некоторых случаях мы все же можем связать строение молекулы с ее „тоном“. Чрезвычайно интересно, а часто и практически важно, найти эту связь у тех молекул, которые обладают резко выраженными цветами. Предметом исследований является при этом связь между нотами или собственными частотами молекул и их составом и формой.

ХЛОРОФИЛЛ

Обратимся сначала к молекуле хлорофилла, наиболее известной и с точки зрения жизненных процессов самой важной из всех молекул. Она весьма сложна и далеко еще не изучена, но тем не менее вполне естественно рассмотреть ее вначале, ибо ею обусловлена окраска всей растительности, а кроме того, она запасает энергию солнечных лучей и позволяет нам пользоваться ей. Хлорофилл, с одной стороны, радует наш глаз, когда мы попадаем в лес или поле, а, с другой стороны, он играет основную роль в жизненных процессах, происходящих на земле. Уголь и нефть, столь необходимые нам, заключают в себе огромные запасы энергии, заимствованные тем же хлорофиллом из солнечных лучей в давно прошедшие времена.

Если мы спроектируем на экран обычным способом при помощи призмы спектр Солнца или вольтовой дуги, а затем на пути лучей поставим сосуд с раствором хлорофилла, приготовленным из крапивных листьев и являющимся удобным рабочим препаратом, то мы обнаружим, что этот раствор сильно поглощает длинные волны кроме узкой полосы в далекой красной части спектра

(табл. XI 9). Кроме того заметны более слабые полосы поглощения в других частях спектра, а крайний синий цвет исчезает вовсе. Основное значение имеет поглощение длинных волн. Молекула хлорофилла „резонирует“ на эту область длин волн солнечного света и поглощает при этом энергию. Это, как показали химики, помогает молекулам хлорофилла соединяться с вездесущими молекулами углекислоты (угольной кислоты). При этом образуются „углеводы“ — крахмал, сахар, являющиеся основой всей растительной жизни. Когда мы питаемся растениями или травоядными животными, мы также пользуемся для поддержания наших жизненных сил свойством хлорофилла поглощать красные лучи.

Тот факт, что именно молекула хлорофилла из огромного числа всех молекул играет такую большую роль, является одним из самых замечательных результатов исследований; она почти одинакова во всех растениях, и хотя известно два различных вида молекулы хлорофилла, но, независимо от этого, в каждом растении эта молекула играет одну и ту же роль. Интересно отметить, что гемоглобин, играющий такую важную роль в животной жизни, имеет строение, сходное с хлорофиллом. Существует какая-то еще невыясненная причина, в силу которой одна определенная молекула имеет универсальное значение. Ее состав известен: она содержит двадцать пять атомов углерода, семьдесят два — водорода, пять — кислорода, четыре — азота и один — магния; мы видим, что она достаточно сложна. Лишь очень немногое известно относительно расположения этих атомов, и этот вопрос остается еще открытым.

ОКРАСКА ЦВЕТОВ

Мы обратимся теперь к вопросу об окраске цветов. В этом случае также все свойства зависят от небольшого числа основных веществ, хотя, конечно, они принимают участие в виде многочисленных комбинаций, так как существует бесконечное разнообразие цветов. Одно из наиболее важных веществ — каротин — красящее вещество, одна из разновидностей которого была выделена сто лет тому назад из моркови. Известно, что его молекула состоит из сорока атомов углерода и пятиде-

сяти шести водорода, но почти ничего нельзя сказать об их взаимном расположении. Другой растительный пигмент — ксантофилл, отличается по своему составу от каротина только тем, что он содержит кроме указанных атомов еще два атома кислорода. Эти два вещества — каротин и ксантофилл — и их разновидности и являются главной причиной желтой и красной краски цветов. Ка-

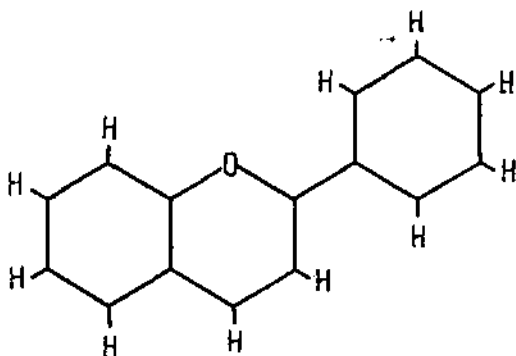


Рис. 57. Расположение атомов в молекулах основного антоцианина, придающих окраску цветам.

ротин обнаружен, например, в нарциссах, одуванчиках, буковице, ксантофилл — в ноготках, лютиках, чистотелах, подсолнечнике. Эти красители найдены, кроме цветов, также и в листьях растений, и когда к концу лета хлорофилл исчезает, они создают осеннюю окраску деревьев. Совсем недавно было обнаружено, что витамин А получается из каротина под действием ультрафиолетовых лучей.

Имеются еще очень интересные вещества, называемые антоцианинами, которые также являются причиной окраски цветов. Состав и строение этих веществ известны, и можно наблюдать, как некоторые изменения последнего вызывают изменение цвета. На рис. 57 показано типичное строение молекулы антоцианина. Для этого вещества характерно то, что углерод и кислород располагаются в вершинах шестиугольников. Атомы углерода, не отмеченные буквами, находятся в вершинах всех шестиугольников, кроме отмеченной буквой О, занятой кислородом.

Водород находится в местах, отмеченных буквами Н. Этот порядок расположения атомов был установлен химическими методами.

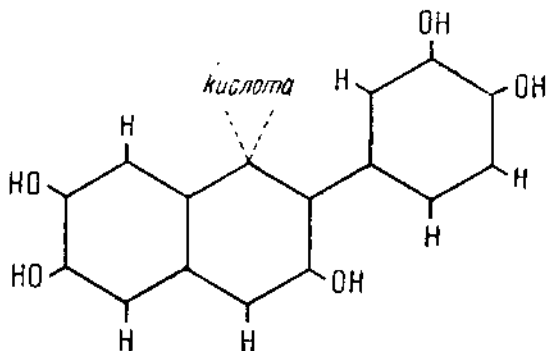


Рис. 58. Антоцианин, окрашивающий в красный цвет розу, получается из основного антоциана, (рис. 57) в результате присоединения кислотной группы, слабо связанной с кислородным атомом, и замены в некоторых местах водорода гидроксильной группой (водород + кислород). Молекула становится кислотной

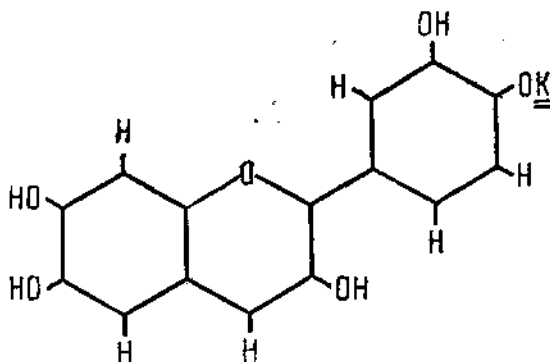


Рис. 59. Кислотная группа удалена и водород в одной из гидроксильных групп заменен калием, отмеченным буквой К. Молекула обладает теперь щелочными свойствами. Она придает синий цвет краскам

Вероятно, это расположение плоское, но определенных доказательств этого не имеется. Относительно некоторых других молекул, содержащих шестиугольные кольца углерода — бензольные кольца — методом рентгеновского анализа было доказано, что они плоские. Точно

так же найдено, что в этих случаях шестиугольники имеют правильную форму, со стороной, равной $1,42 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 0,00001 \text{ см}$).

Антоцианины в большинстве случаев являются причиной красной, лиловой, пурпурной и синей окраски. На рис. 58 представлен антоцианин, окрашивающий розу; главное отличие его от основной формы (рис. 57) заключается в присоединении кислотной группы к кислород-

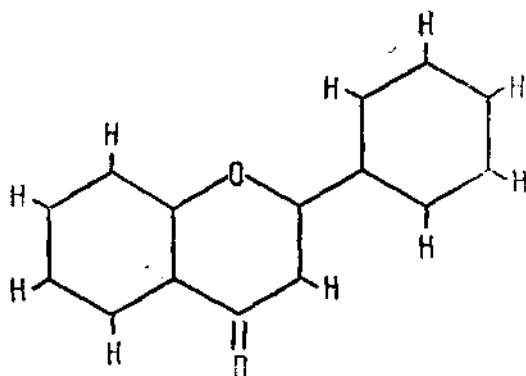


Рис. 60. Основной антоксантин образуется из антоцианина добавлением кислородного атома, сильно связанного в среднем кольце с углеродом, замещающим водород

ному атому. Отняв эту группу и заменив один из атомов водорода калием, что придает молекуле щелочные свойства, мы получим антоцианин, окрашивающий в синий цвет васильки (рис. 59). Если посадить синие дикие гиацинты около муравейников, то муравьиная кислота превращает синие цветы в красные.

Существует модификация молекулы антоцианина — антоксантин, показанная на рис. 60, у которой в одной точке присоединен кислородный атом. Это делает молекулу растворимой в воде, и так как антоксантин является причиной окраски первоцветов, то, вероятно, поэтому эти цветы делаются такими бледными в сырую погоду.

КРАСКИ

С древних времен люди добывали краски из растений, но любопытно отметить, что они редко пользовались

самими естественными красителями листьев и цветов. Они употребляли вещества, входящие в состав растений, но не играющие роли в самой окраске их. Естественные цвета слишком непрочны. Природе свойственно изменение окраски при смене времен года; а человек искал что-нибудь более постоянное, когда он украшал свои орудия, свое жилище и самого себя. Так, например, он добыл краску индиго и родственную с ней вайду (синяя краска) из корней некоторых растений, которые он научился

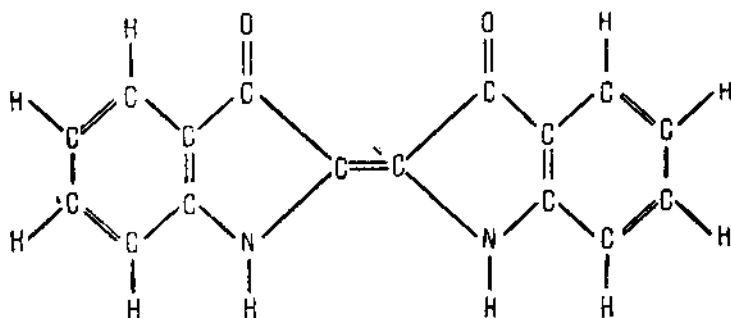


Рис. 61. Молекула индиго, представленная для наглядности того, что расположение атомов может быть выяснено химическими методами

разводить. Из этих красок и их производных человек получил многие другие.

Строение молекулы индиго хорошо известно; оно показано на рис. 61. После того как это строение было установлено в 1883 г. А. Фон-Бейером, синтетическое производство индиго совершенно вытеснило старый, значительно менее продуктивный способ добычи из растений. В способе употребления индиго имеется одна интересная особенность. Сама краска в воде не растворяется; это весьма удобное свойство позволяет не бояться за окрашенные ткани, когда они подвергаются случайностям погоды. Но сам процесс окраски требует получения раствора, которым можно было бы пропитывать ткань. Для того чтобы устранить это затруднение, красильщик подвергает индиго такой химической обработке, в результате которой к молекуле добавляются водородные атомы (рис. 62). Измененная таким образом молекула обладает

способностью соединяться с молекулами воды, а это значит, что индиго становится растворимой в воде.

При этом краска делается бесцветной, что хорошо иллюстрирует утверждение, которое мы защищали выше, а именно, что молекулярное поглощение света имеет резонансную природу. Мы видели, что звук камертона менялся, когда мы наклеивали кусочек доски на одну

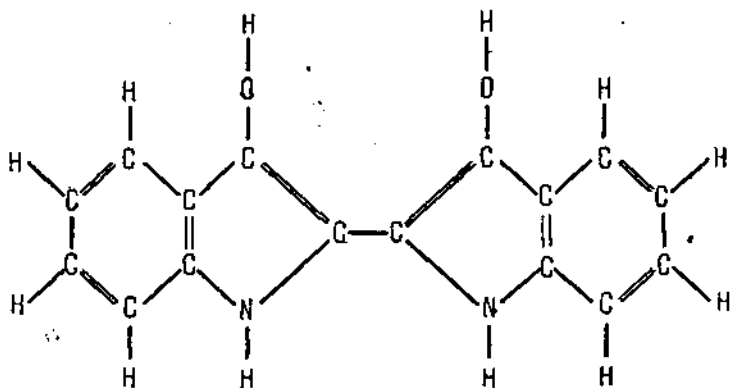


Рис. 62. Молекула индиго, изображенная так, чтобы краска сделалась растворимой

или обе ножки камертона. Мы нагружали камертон, и колебания при этом замедлялись. Таким же образом, если наша аналогия правильна, следует ожидать, что „нота“ или „ноты“ молекулы должны меняться при добавочной „нагрузке“ ее новыми атомами. Химик-краситель производит в действительности это добавление; он пытается найти, что и где он должен добавить к молекуле. Конечно, при этом он должен заботиться о постоянстве соединения, и обычные испытания, которым подвергается краска, не должны уничтожать те изменения, которые он внес в молекулу.

Область видимых длин волн очень мала; поэтому нетрудно сместить „ноту“ в совершенно другую часть спектра или даже совсем вывести ее из видимого спектра. Последнее как раз и случается с молекулой индиго, когда она делается растворимой в воде. Она больше не

поглощает длинных волн и оставляет нетронутыми синие лучи: раствор становится бесцветным.

Это, однако, не мешает окраске. Ткань погружают в раствор индиго, и краска проникает в волокна. Что же касается водородных атомов, добавленных к молекулам индиго, то они сами собой удаляются, когда материя находится на воздухе. Как только ткань вынута из ванны с краской, молекулы начинают приходить в нормальное состояние и принимать цвет индиго. Такая материя не линяет от влаги, и тем самым задача красильщика полностью решена.

Вайда, которой наши предки раскрашивали свои тела две тысячи лет тому назад, и римский пурпур, который добывался из раковин мурекс, имеют то же молекулярное строение, что и индиго.

Цвета листьев и цветов являются наиболее распространенными из всех видимых нами в окружающем мире, за исключением цвета неба и моря, которыми мы займемся дальше. Последние, так же как синий цвет дымки в дальнем ландшафте или цвет солнечного заката, появляются не в результате действия красящих веществ, а в силу совсем иных причин. Цвета же почвы и минералов, которые иногда бывают настолько яркими, что их применяют в качестве красок, получаются в результате процесса поглощения, и поэтому их следует причислять к рассмотренному выше классу красящих веществ.

ДИФРАКЦИЯ

Теперь мы должны подготовить почву для того, чтобы рассмотреть некоторые новые причины появления цветов, совершенно отличные от поглощения.

Мы уже отмечали замечательный факт, заключающийся в том, что путь светового луча не сопровождается сколько-нибудь заметным рассеянием света в стороны, и мы видели, что это не вяжется с представлением о волновом движении. Ньютон даже считал это основным возражением против волновой теории света. Опыты с водяными волнами всегда показывают некоторое рассеяние, и поэтому, следуя Ньютону, мы можем сказать, что если свет представляет волновое движение, мы должны были бы наблюдать это рассеяние. Но то, что казалось когда-то

фатальным возражением, "обратилось впоследствии в наиболее очевидное доказательство волновой теории. Более тщательное исследование показало, что рассеяние волн в стороны от луча существует, но очень мало, и его крайне трудно обнаружить, если ширина луча значительно превышает размер длины волны. В случае света отношение этих двух величин почти всегда чрезвычайно велико, так что рассеяние волн, к счастью для нашего зрения, почти незаметно.

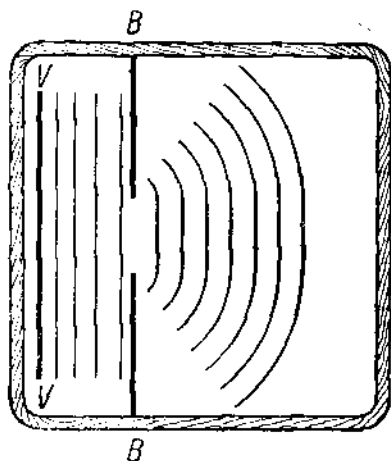


Рис. 63. Волны "возникают" вблизи движущейся стенки *В* и движутся к перегородке *В*, в которой имеется сравнительно широкое отверстие. Система волн, прошедшая отверстие, в течение некоторого времени сохраняет форму отверстия.

Этот факт оказывает огромное влияние на наши представления о свете. Мы рассмотрим его на опыте. Если установить в сосуде (рис. 63) две перегородки, оставив между ними некоторый промежуток, и возбудить на поверхности воды волны, которые проходят сквозь отверстие, мы увидим, что всегда имеет место некоторое рассеяние волн в стороны. Волны, прошедшие отверстие, являются до некоторой степени продолжением первоначального волнового движения и вблизи отверстия параллельны падающим волнам. С каждой стороны новой системы волн имеется нечто вроде крыльев, которые показывают существование того рассеяния, о котором идет речь. Чем шире отверстие, тем больше средняя часть каждой волны, представляющая продолжение движения первоначальной системы волн, и тем менее заметны "крылья". Если сделать отверстие очень маленьким, "крылья" принимают форму почти правильных полуокружностей, и возмущение, проходящее сквозь отверстие, рассеивается равномерно по всем направлениям, как показано на рис. 64.

Когда мы говорим о величине отверстия, то имеем

в виду его размеры по отношению к длине волны. Отверстие, которое велико для коротких волн, может быть маленьким и вызовет полукруговое рассеяние (рис. 64) в случае длинных волн.

Мы не можем воспроизвести в нашем сосуде соотношения, обычно имеющие место в случае светового луча. Наши водяные волны всегда слишком велики по сравнению с отверстием. Для светового луча отверстие в 1 см в 20 000 раз превышает величину световой волны; отсюда видно, что обычно „крыльями“ вполне возможно пренебречь по сравнению с центральной частью проходящих световых волн. Следовало бы увеличить наш сосуд и расстояние между перегородками в тысячи раз для того, чтобы наблюдать явления, аналогичные световым. В то же время мы узнаем из этих опытов с водяными волнами факт существования рассеяния по сторонам и заключаем, что при тех условиях, при которых обычно наблюдаются световые лучи, мы не должны замечать этого явления. В исключительных условиях, которые можно осуществить в лаборатории, это рассеяние наблюдается; иными словами, при соответствующих условиях можно показать, что свет огибает препятствия. Более того, наш опыт с водяными волнами помогает понять, что при этом имеет значение величина длины волны, ибо длинные и короткие волны огибают препятствия не одинаково легко; поэтому это явление должно вызывать окраску. Это и имеет место в действительности, но, так как само явление вообще трудно наблюдать в обычных условиях, разложение на цвета должно быть еще менее заметно.

Однако, если в наших опытах с водяными волнами

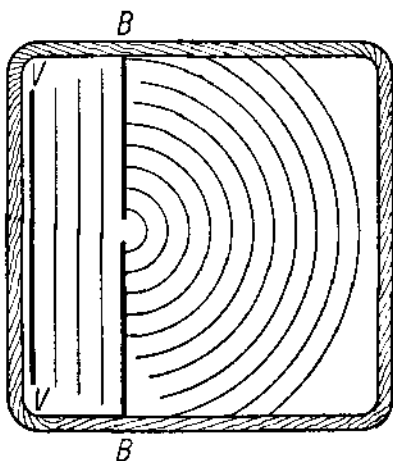


Рис. 64. Отверстие в перегородке сравнительно мало и волны после прохождения отверстия принимают полукруговую форму

Воспользоваться специальным устройством, мы сможем объяснить, почему в случае света окраска бывает иногда очень заметна. Мы ставим в сосуд перегородку—экран с рядом отверстий, которые вначале могут быть расположены произвольным образом и иметь любые размеры. Когда волны, движущиеся к экрану, частично проходят

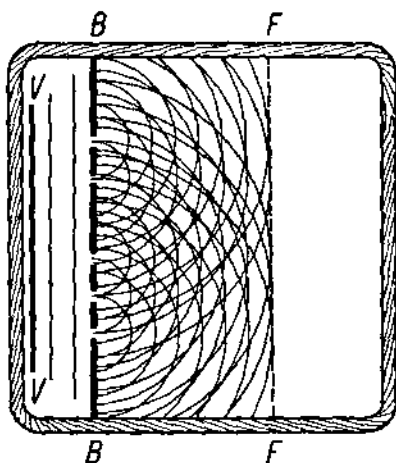


Рис. 65. Когда волны расходятся (рис. 64) от многих отверстий, то образуется волновой фронт, показанный пунктиром, параллельный первоначальной волновой поверхности

сквозь его отверстия, мы наблюдаем, что система волн, распространяющихся по другую сторону экрана, очень быстро сформировывается в новый волновой фронт, подобный первоначальному. Каждая система волн, исходящая от какого-нибудь одного отверстия, состоит, как изображено на рис. 65, из кругов, но действие ее складывается с действием всех других систем, так что в результате образуется прямолинейный волновой фронт, движущийся в прежнем направлении. Назначение этого опыта заключается в том чтобы показать, как образуется

плоский фронт системы круговых волн. Теперь представим себе, что экран предыдущего опыта заменен другим, в котором отверстия расположены правильно. В том, чтобы эти отверстия были одинакового размера, нет необходимости, но удобно сделать их именно такими.

Мы можем нарисовать схему происходящего явления, которая позволит нам разобраться в нем; это удобнее, чем наблюдать его в нашем сосуде, потому что едва ли последний окажется достаточно большим. Такая схема представлена на рис. 66. Хотя чертеж и выглядит весьма сложным, но он состоит только из ряда полуокружностей, центры которых совпадают с отверстиями экрана. Каждая система окружностей представляет волны, расходящиеся от одного отверстия, как если бы оно было изолирован-

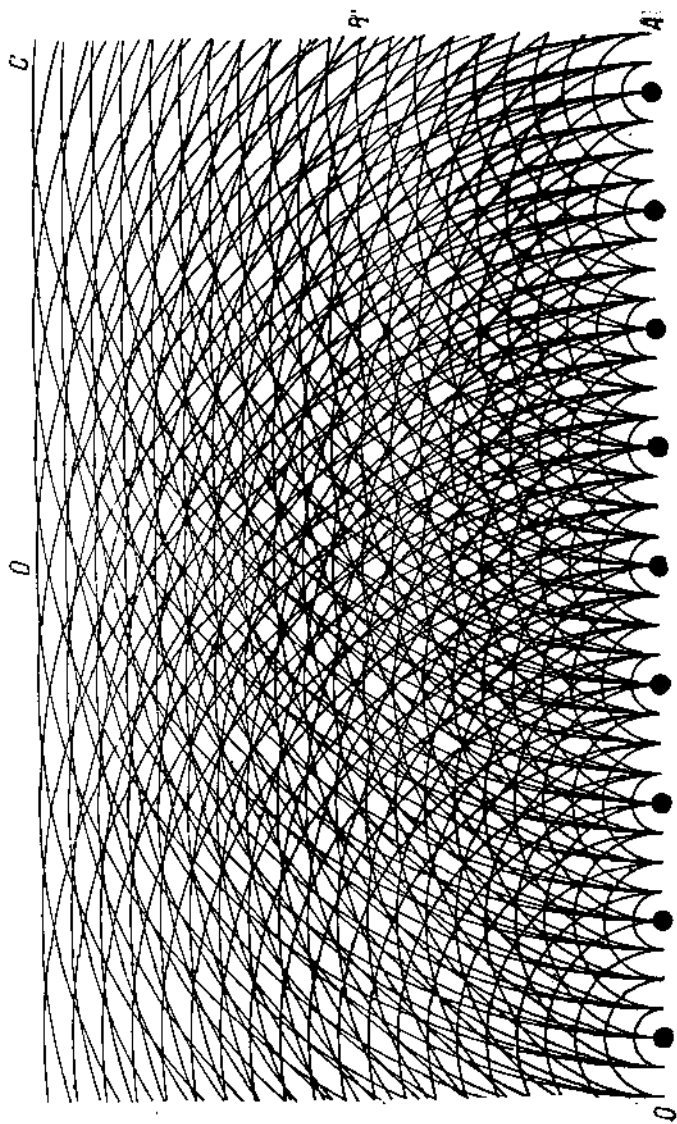


Рис. 66. Черные точки изображают ряд равномерно расположенных отверстий в экране как систему рассеивающих падающий свет круглыми волнами (или сферическими, если мы будем рассматривать излучение в трехмерном пространстве). Волновой фронт OA . Волновой фронт CD образуется так, как это объяснялось выше (рис. 63). В данном случае образуются также и другие волновые поверхности. Их мы ждем увидеть, если посмотрим на рисунок в направлении OA , OH , OC и OD .

ным. В этом случае отдельные системы, как и в предыдущем опыте, формируются в одну и образуют дуг волн, который можно рассматривать как продолжение первоначального дуга, но с несколько меньшей энергией. При этом новый волновой фронт, расположенный параллельно первоначальному, делается все более определенным, по мере удаления от экрана. Пока этот опыт ничем не отличается от предыдущего (рис. 65), за исключением правильного расположения отверстий.

Но теперь можно наблюдать еще одно явление, которое происходит только при правильном расположении отверстий. Кроме волнового фронта, следующего в прежнем направлении, получается еще один, параллельный линии OB рис. 66 и перемещающийся в косом направлении. Он также образован волнами, принадлежащими отдельным круговым системам; эти волны, однако, не проходят через отверстия в один и тот же момент, но через определенные промежутки времени. Например, этот фронт касается первого круга, принадлежащего первому отверстию, второго — принадлежащего второму отверстию и т. д. На рис. 66 это лучше заметно, если книгу держать почти на уровне глаз, так чтобы рисунок сильно сократился перспективой, и смотреть в направлении, параллельном OB . Для ясности мы приводим рис. 67, который является частью рис. 66. При образовании нового волнового фронта в направлении его распространения происходит передача энергии. Мы получаем так называемый дифрагированный пучок. На этом явлении, часто применяемом в оптической лаборатории, как мы скоро увидим, основаны некоторые, чрезвычайно точные методы оптических исследований.

Вращая рис. 66 в его плоскости и смотря последовательно вдоль линий OC и OD , можно видеть, что имеются и другие направления, в которых образуются волновые поверхности после прохождения волны сквозь экран и, следовательно, другие направления, по которым передается энергия. Мы называем их дифрагированными пучками первого, второго, третьего порядка и т. д. На рисунке длина волны составляет четверть расстояния между отверстиями; в этом случае, как показывает чертеж, существует три дифрагированных пучка по обе стороны от первоначального направления.

Ничего подобного не случается, если отверстия в экра-

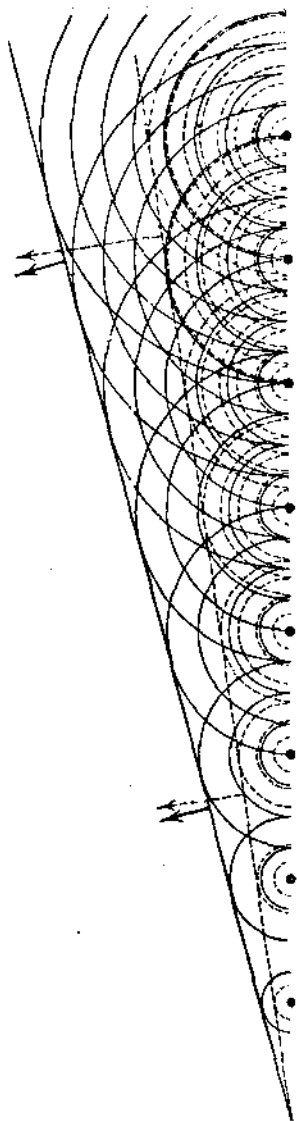


Рис. 67. (часть рис. 66). Образование дифрагированных волн первого порядка. Из него так же видно, как направление дифракции зависит от длины волн. Соответствие длинных и коротких волн примерно того же порядка, как у волн красного и синего света

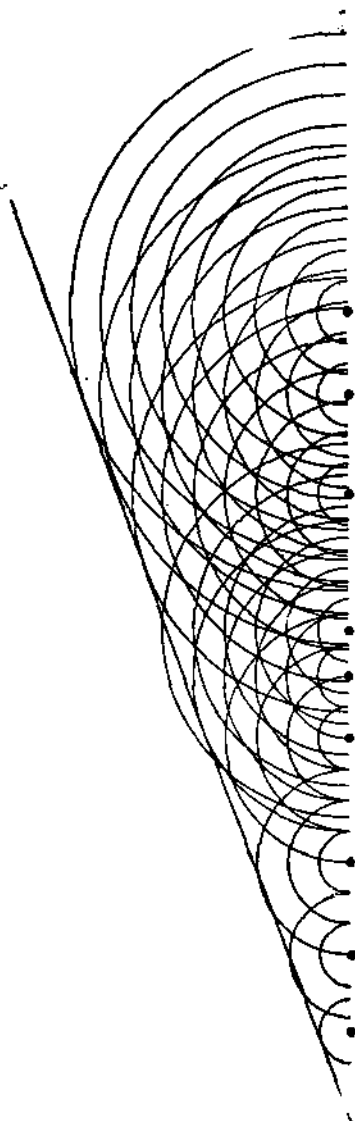


Рис. 68. Если центры (черные точки) расположены случайно, дифрагированной системы волн не получится. Линии, проходящие на рисунке, касаются гребней одних волн, и в то же время пересекают между гребнями других. Таким образом некоторые из волн вытесняются в данном месте фронта гребня, в то время как другие — впадины и при совместном действии они уничтожают друг друга

не расположены не на равных расстояниях друг от друга. Только если их расположение правильное, прямолинейный волновой фронт касается соответствующих круговых волн; при этом он является результатом их совместного действия. Это иллюстрирует рис. 68.

Отклонение дифрагированного светового луча тем меньше, чем меньше длина волны и чем дальше отстоят отверстия друг от друга. На рис. 67 показана дифракция первого порядка волн различной длины.

Легко показать соответствующий оптический опыт. На стеклянную пластинку нанесен ряд прямолинейных штрихов, расположенных настолько густо, что их помещается несколько тысяч на протяжении 1 см; они занимают на пластинке приблизительно квадратную площадь со стороной в несколько сантиметров. Такая пластинка называется дифракционной решеткой. Изготовить хорошую решетку весьма трудно; лучшие из них делаются на немногих существующих делительных машинах. Прекрасными качествами обладают решетки, сделанные покойным профессором Роуландом в Балтиморе.

Свет от дуги проходит сквозь узкую щель, сфокусированную на экран. Щель и линза не принимались в расчет при рассмотрении теории, изложенной выше, однако они необходимы для получения на экране яркого и отчетливого изображения. Пусть щель установлена вертикально, а штрихи решетки расположены параллельно щели; рис. 69 представляет собою горизонтальное сечение установки; конечно, нет возможности изобразить на рисунке в правильном масштабе промежутки между штрихами решетки, так же как и длины световых волн. Прозрачные места стеклянной пластинки, находящиеся между штрихами решетки, соответствуют отверстиям решетки, изображенным на рис. 66, а сами штрихи, будучи непрозрачными, соответствуют непрозрачным промежуткам между отверстиями. Лучи различной длины волны отклоняются в несколько различных направлениях, красный — больше всех, а синий — меньше всех, вследствие чего на экране появляется спектр, цвета которого расположены в таком же порядке, какой мы прежде видели в призматическом спектре. Спектр повторяется во втором и высших порядках, причем в каждом последующем спектре цвета разложены все сильнее и сильнее.

Такой способ получения спектра позволяет находить длину волны каждого дифрагированного луча. Рис. 67 показывает, что имеется связь между длиной волны, расстоянием между штрихами решетки и углом отклонения дифрагированного луча от первоначального направления. Последнюю величину мы можем измерить на опыте, вторая определяется делительной машиной, служащей для изготовления решетки, следовательно, первая величина —

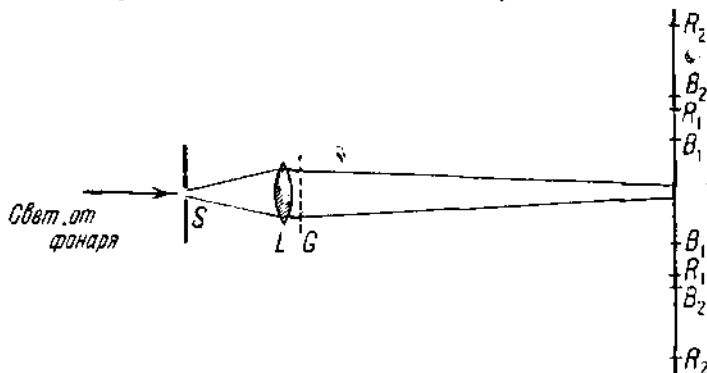


Рис. 69. Лучи фонаря проходят сквозь щель S , изображение которой получается на экране справа. Решетка G помещена перед объективом L . Часть света дифрагирует. Синие изображения щели появляются в $B_1, B_2, \dots$, а красные — в $R_1, R_2, \dots$. Таким образом появляются спектры. Спектр первого порядка получается между B_1 и R_1 , второго — между B_2 и R_2 и т. д.

длина волны — может быть найдена. Таким методом длины световых волн определяют с огромной точностью.

Штрихи наносят иногда на поверхность хорошо отражающего металла, например того сплава, который применяется для зеркал отражательных телескопов; тогда в отраженном свете наблюдаются те же самые явления, которые происходят при прохождении света сквозь стеклянную решетку.

Цвета крыльев некоторых насекомых, окраска крыльев бабочек и перьев птиц, как, например, перьев в хвосте петуха, имеют дифракционную природу. Петушиные перья не обладают яркой окраской, если их рассматривать на просвет; они кажутся при этом просто коричневыми.

Иногда дифракционные цвета получаются в результате специальной обработки материала. Цвета перламутра происходят вследствие присутствия на его гладкой

поверхности многочисленных тонких царапин. Вещество перламутра имеет слоистое строение; при шлифовке слои оказываются срезанными, в результате чего остаются параллельные следы. Если с перламутра сделать восковой слепок, то на поверхности воска также появляются цвета, т. е. окраска вызывается здесь вовсе не красящим веществом. Цвет неба и моря также в значительной степени обязан своим происхождением дифракции, но причины его появления требуют специального рассмотрения. Мы разберем эти явления ниже.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

Теперь мы рассмотрим несколько отличную причину появления цветов, известную под названием интерференции и связанную с дифракцией тем, что как то, так и другое явление можно объяснить, пользуясь волновой теорией. Существует характерное явление, которое можно наблюдать на море, когда две системы волн проходят одна сквозь другую. Вблизи берега Южной Австралии имеется островок (рис. 70), омываемый океанскими волнами, идущими из Антарктики; волны разделяются при этом на две системы; они обходят остров и вблизи берега континента встречаются под небольшим углом. Любопытно наблюдать, что получается в результате этого. Когда встречаются два гребня, вода, пенясь, взлетает вверх; когда в одном месте встречаются впадины, получается двойное углубление. Когда же гребень одной системы в каком-нибудь месте поднимает воду, а впадина другой системы в то же время опускает ее, поверхность моря остается спокойной. Такое взаимодействие гребней и впадин и называется интерференцией. Однако это название несколько одностороннее (слово интерференция означает помеху), потому что оно относится только к одному из возможных результатов встречи волны, и было бы более естественно назвать это явление сложением волн. Только в некоторых точках две системы волн взаимно уничтожают друг друга, в других они складываются, вызывая двойное действие.

В меньшем масштабе мы видели то же самое явление в сосуде с водой; форма поверхности воды в какой-нибудь момент является суммой форм, придаваемых ей отдель-

ными системами волн. Смотря на поверхность воды, мы всегда можем видеть эти интерференционные явления. Например, в море мы замечаем рябь на поверхности больших волн, которые в свою очередь могут бороздить большие океанские валы. Каждая меньшая система движется на искривленной поверхности больших волн так же, как если бы последние были плоскими.

Когда Томас Юнг в первые годы XIX в. высказал принцип интерференции и применил его для объяснения некоторых замечательных оптических явлений, его гений позволил ему усмотреть сходство последних с обычными фактами, которые можно наблюдать на каждом шагу.

По существу этот принцип не отличается от принципа дифракции, так как оба они являются следствием аддитивности („складываемости“) волновых движений, но в то же время эти явления отличаются друг от друга по своим проявлениям, и поэтому-то мы рассматриваем их в отдельности.

В качестве примера интерференционных цветов мы возьмем цвета мыльных пленок. Это явление рассматривал Юнг и он дал ему объяснение.

Мыльная пленка представляет тонкий слой воды, содержащей молекулы вещества, входящих в состав мыла. Свет свободно проходит сквозь пленку. Когда световой луч падает на пленку, он отражается частично от первой поверхности и частично от второй. Оба отраженные луча двигаются от пленки и интерферируют так же, как две системы волн, обошедшие остров, о котором мы говорили выше. В отражении от мыльной пленки имеется,

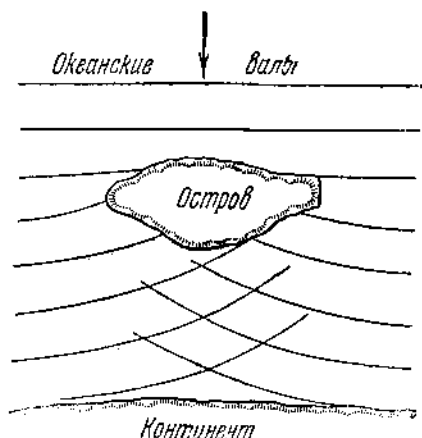


Рис. 70. Океанские волны огибают остров с двух сторон и встречаются

однако, определенная закономерность. Система волн, отраженных от первой поверхности, складывается с другой, которая прошла толщу пленки дважды, и поэтому несколько отстала от первой. Обе системы накладываются друг на друга; при этом там, где совпадают гребни волн, получается двойной эффект, и т. д.

Величина запаздывания одной отраженной системы волн по отношению к другой зависит от того, сколько времени затрачивается на двукратное прохождение пленки, а это в свою очередь зависит от толщины пленки и направления, в котором ее проходил свет. Запаздывание можно измерять в длинах данной световой волны. Предположим, что это количество составляет целое число длин волн: одну, две, три или больше. Тогда две системы волн будут двигаться вместе, гребень к гребню, впадина к впадине. Они сложатся и составят волну с двойным размахом (амплитудой). Можно показать, что ее энергия будет при этом четырехкратной по сравнению с энергией каждого из отраженных лучей.

Следует отметить, что к запаздыванию, вычисленному геометрически, необходимо вследствие одного физического явления прибавить еще полволны. Одно отражение происходит от поверхности воды в воздухе, а другое — в воде от воздушной поверхности. Оба отражения различны по характеру и в первом случае при отражении волна испытывает добавочное запаздывание в полволны, как показано на рис. 71¹. Это явление аналогично тому, которое имеет место в органных трубах; отражение звука от открытого и закрытого концов трубы имеет различный характер. Легко видеть, что сделать такое допущение необходимо, потому что в противном случае при уменьшении толщины пленки до полного ее исчезновения два отраженных луча оказались бы в точности в одной фазе, тогда как при этом отражение должно исчезать. Потеря полуволны вполне объясняет тот факт, что у очень тонкой пленки отражение совершенно отсутствует: гребни волн, отраженных от первой поверхности, совпадают со впадинами волн, отраженных от второй.

¹ В подлиннике запаздывание на полволны ошибочно приписано действию нижней границы пленки. Это не влияет на вывод результата интерференции, однако мы все же исправили как текст, так и рис. 71. (Прим. перев.)

Простое наблюдение показывает, что очень тонкая мыльная пленка не отражает света; такую пленку обычно называют черным пятном, хотя, строго говоря, его можно сделать настолько большим, что название „пятна“ не совсем соответствует действительности.

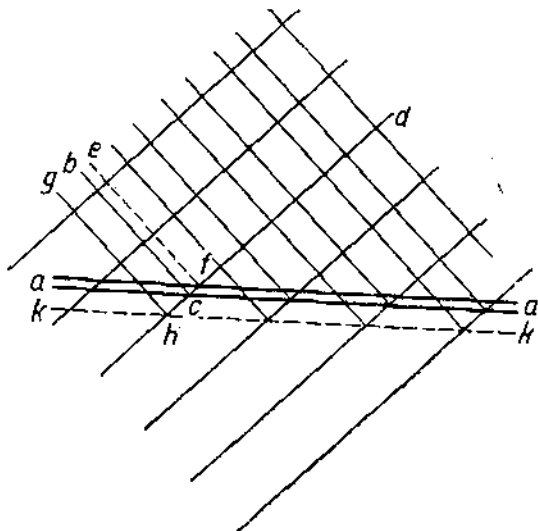


Рис. 71. Луч волн падает на тонкую пленку какого-нибудь прозрачного вещества aa . Волны достигают верхней поверхности и здесь отражаются. Одновременно волны проникают внутрь пленки и здесь отражаются от второй поверхности ee . bc — отраженная волна, а cd еще не достигла нижней границы пленки. При отражении от первой поверхности происходит потеря полуволны. Пунктирная линия ef показывает, где находился бы гребень волны, отраженной от первой поверхности, если бы это отражение носило тот же характер, что и при отражении от второй поверхности. Потеря полуволны сдвигает отраженную волну в положение g/b . Первое отражение происходит так, как если бы оно имело место на поверхности, совпадающей с пунктирной линией hk .

Если запаздывание составляет целое число волн определенной длины, происходит интенсивное отражение. Но такое же запаздывание может составлять для волны другой длины нечетное число полуволн. В этом случае два отраженных луча уничтожат друг друга, и отражение света этой длины волн не будет иметь места; вся энергия этой части спектра пройдет сквозь пленку неослабленной. Таким образом пленка рассортировывает цвета, от-

ражая некоторые из них и пропуская другие; она делается окрашенной при наблюдении как в отраженном, так и в проходящем свете.

Цвет, отраженный под некоторым углом, зависит таким образом от толщины пленки. Если круглую проводочную рамку окунуть в мыльный раствор и затем держать вертикально, жидкость постепенно стекает вниз, вследствие чего пленка утолщается книзу. Соответственно этому цвета появляются в виде горизонтальных полос. Можно показать один из прекраснейших оптических опытов, если поверхность пленки обдувать тонкой струей воздуха, направленной под углом так, чтобы на пленке возникали вихревые движения. Также как на поверхности воды вращение вблизи центра заставляет жидкость двигаться наружу по направлению к краям пленки. Тогда цвета располагаются около центра в виде овалов. Таким образом можно получить очень яркие цвета, потому что обдувание пленки и вихревые движения на ней уменьшают ее толщину, а как мы знаем из опыта, цвета мыльного пузыря становятся отчетливее по мере того, как он делается тоньше, и они лучше всего видны незадолго до того, как появляется черное пятно или пузырь лопается.

Это обогащение цветов нетрудно объяснить; оно чрезвычайно интересно.

Предположим, что запаздывание одного отражения по отношению к другому равно $0,002$ м. Красные лучи, длина волн которых составляет около $0,0008$ м, не видны в отраженном свете, потому что $0,0008 \cdot 2,5 = 0,002$, т. е. запаздывание красных волн составляет две с половиной длины волны. Также будут отсутствовать две другие длины волны видимого спектра, именно равные $0,00057$ и $0,00044$ м, потому что $0,00057 \cdot 3,5 = 0,00044 \cdot 4,5 = 0,002$. Им соответствует запаздывание в три с половиной и четыре с половиной длины волны. Таким образом в спектре отраженного света будут провалы в крайнем красном цвете ($0,0008$), желтом ($0,00057$) и синем ($0,00045$); других провалов в пределах видимого спектра не будет. Окраска отраженного света определяется остающимися цветами.

Предположим теперь, что запаздывание больше предыдущего; скажем, что оно составляет $0,004$ м. Тогда

спектре отраженного света будет больше темных мест, и следовательно, каждая из темных областей делается уже. Мы имеем $0,004 = 0,00073 \cdot 5,5 = 0,00062 \cdot 6,5 = 0,00053 \cdot 7,5 = 0,00047 \cdot 8,5 = 0,00042 \cdot 9,5$; все эти длины волн 0,00073; 0,00062; 0,00053... находятся в пределах видимого спектра. Опыт показывает, что если из спектра вырезаны на равных расстояниях друг от друга несколько полос длин волн, то в результате сложения остающихся цветов получается свет, окрашенный лишь весьма слабо. Только когда пленка так тонка, что запаздывание очень мало и составляет лишь полволны или полторы волны, цвета получаются насыщенными.

Юнг показал это, исследуя свет, отраженный от мыльной пленки при помощи призмы. Он помещал призму на пути света, проходящего сквозь узкую щель, и наблюдал спектр подобно тому, как мы это делали со светом дуги. При этом в спектре наблюдались темные пропуски, представляющие собою не что иное как размытые полосы; эти полосы немногочисленные и далеко отстоят друг от друга в спектре верхней части пленки и увеличиваются в числе по направлению книзу, где пленка толще.

Юнг приводил это простое объяснение цветов тонких пленок в качестве аргумента в пользу волновой теории. Сам Ньютон ранее принимал это объяснение, но он считал его лишь вспомогательной и сложной гипотезой, необходимой в качестве дополнения к его корпускулярной теории. Установив принцип интерференции, Юнг сделал большой шаг вперед и показал, что представление о свете, как о волнах, достаточно для объяснения всех явлений, бывших известными в его время.

Мы не видим большинства явлений окраски тонких пленок, но и то, что мы замечаем, встречается достаточно часто. Сюда следует причислить цвета „побежалости“ закаленной стали, покрытой тонкой пленкой окиси железа, так же как и яркие цвета, появляющиеся, когда керосин или другая маслянистая жидкость разливаются на поверхности воды. Мы видим эти цвета в трещинах стекла или другого прозрачного вещества; они же позволяют нам любоваться так называемыми кольцами Ньютона, появляющимися, когда выпуклую линзу накладывают на стеклянную пластинку, так что при

этом между линзой и пластинкой получается тонкая воздушная пленка; благодаря тому, что толщина этой пленки возрастает от центра к краям, цвета расположены концентрическими кольцами с общим центром в точке касания.

Мы еще встретимся с принципом интерференции в другой области, где он позволит нам объяснить явления, происходящие с рентгеновскими лучами, при помощи которых определяют строение кристаллических тел. Он важен также для инженера-электрика, которому приходится иметь дело с суммарным действием нескольких электрических токов, каждый из которых можно рассматривать как волну, распространяющуюся вдоль провода.

Этот принцип имеет также очень большое применение в акустике, где он позволяет объяснить биения и другие явления, происходящие с музыкальными звуками. Когда громкоговоритель издает определенную ноту, в помещении могут найтись точки, в которых гребни звуковых волн постоянно встречают впадины и где звук будет слышен сравнительно слабо, и в то же время будут иметься другие места в том же помещении, где звук будет слышен громко. Это происходит вследствие интерференции между первоначальным звуком и звуками, отраженными от стен и от предметов, находящихся в комнате. Двигая голову, мы замечаем при этом изменения интенсивности звука.

Глава V

ЦВЕТ НЕБА

ИЗБИРАТЕЛЬНОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА

Различная окраска неба, чаще всего синяя, гало, окружающее иногда Солнце и Луну, золотистый, красный или зеленый восход и закаты Солнца, — все эти и еще другие явления происходят в результате воздействия на световые волны молекул и различных частиц, составляющих атмосферу и взвешенных в ней. В атмосфере нет окрашивающих веществ, ведущих себя наподобие красок, поглощающих одни цвета и пропускающих другие; в этом случае происходит разделение цветов, а не уничтожение их. Когда-то считали, что воздух или содержит какой-то синий газ или сам является таковым и поэтому поглощает красные лучи. Но если бы это было так, то Солнце, Луна и звезды казались бы все более и более синими по мере приближения к горизонту, потому что при этом их лучи проходят все больший слой воздуха, прежде чем достигнуть глаза. Мы видели бы бледную синеву над головой, темнеющую к горизонту. Однако это не имеет места в действительности.

Волновая теория позволяет дать лучшее объяснение. Свет должен рассеиваться частицами, взвешенными в воздухе так же, как морские волны разбиваются и рассеиваются скалами, стоящими на их пути. Короткие световые волны, составляющие синий конец спектра, должны легче изменять направление своего движения, чем более длинные красные волны, точно так же как мелкая рябь рассеивается теми скалами, мимо которых свободно проходят большие морские волны. Таким образом происходит разделение волн, вызывающее окраску. Согласно

этой гипотезе мы должны ожидать, что свет Солнца будет желтеть или даже краснеть при приближении его к закату или перед восходом, потому что длинный путь в воздухе должен „отфильтровывать“ синие лучи более полно. В то же самое время свет рассеянный в стороны должен порождать синеву неба.

Примеры этого явления очень обычны. Дым, поднимающийся из трубы, на темном фоне кажется синим, особенно когда частицы угля, вызывающие рассеяние, очень малы, как, например, в дыме от горящих дров или угля. Уголь, конечно, — черный, но рассеяние света весьма маленькими его частицами, находящимися в дыме, играет большую роль, чем поглощение; для того чтобы получился хороший синий цвет, частицы должны быть меньше длины световой волны, а в этом случае влияние поглощения относительно мало. Если же дым рассматривать напросвет, то на фоне светлого облака или на фоне самого Солнца свет, проходящий сквозь дым, оказывается коричневым или красным.

В Поднимающийся вверх дым от горящего конца папиросы — синий, а выходящий из мундштука — серый. В последнем случае частицы покрываются влагой от теплого дыхания и вследствие увеличения их размеров они начинают рассеивать длинные волны почти в той же мере, что и короткие.

Сквозь туманную атмосферу красный свет проходит лучше, чем белый, потому что водяные частицы рассеивают длинные волны красных лучей меньше, чем волны синего света. Детали ландшафта, закрытого „дымкой“, можно хорошо сфотографировать, если перед объективом аппарата поставить желтое стекло, так как при этом синий цвет будет поглощен. Шоферу часто мешает свет фар его машины, попадающий в глаза вследствие рассеивания. Поэтому в фары иногда вставляют красные стекла, не пропускающие коротких волн. По той же причине пользуются красными сигнальными огнями для маяков, действующих в тумане. Последние опыты показывают однако, что в данном случае применение красного света может быть не вполне оправдано, потому что частицы тумана достаточно велики, для того чтобы почти одинаково сильно рассеивать видимый свет всех длин волн. Инфракрасные волны, которые мы скоро рас-

смотрим, гораздо длиннее видимых, и поэтому они позволяют в значительной мере избежать последствий рассеяния.

МОЛЕКУЛЯРНОЕ РАССЕЯНИЕ

Волновая теория позволяет таким образом объяснить окраску света, проходящего сквозь атмосферу, содержащую мелкие частицы. Последние могут быть пылью или частицами водяного пара, но и те и другие должны оказывать действие на свет. Тиндаль приписывал синий цвет неба последним. Однако Рэлей показал вычислением, что в этом предположении нет необходимости и что сами молекулы воздуха могут быть причиной этого явления. Молекулы воздуха весьма малы, значительно меньше длины световой волны, но суммарное действие огромного числа небольших порций света, рассеянных отдельными молекулами, достаточно велико, для того чтобы приписать причину синевы неба воздуху. Около поверхности земли в воздухе взвешено много частиц, которые также вызывают рассеяние. Но область загрязненной атмосферы не простирается выше, чем на 1000 м, и поэтому результаты измерений интенсивности света, произведенные в обсерватории на горе Вильсон в Калифорнии на высоте 1500 м над уровнем моря, можно было сравнить с цифрами, полученными из теории Рэрея. Величины, найденные экспериментально, полностью совпали с вычисленными по теории Рэрея.

Рассеянный свет солнца, проникающий в нижние слои атмосферы, не такой синий, как в верхних слоях атмосферы, так как на большой высоте нет пыли, рассеяние в которой добавляло бы более длинные волны к свету, рассеянному молекулами воздуха. В северных широтах, особенно в Англии, в воздухе содержится много влаги, и небо имеет цвет бледный и ненасыщенный по сравнению с глубокой синевой южных широт. Но и в этих странах наш глаз не всегда наслаждается ярко синим небом: иногда горячий сухой ветер поднимает облака пыли; синева пропадает, и небо делается тусклым. Только дождь может тогда очистить воздух от пыли и „вымыть“ небо.

Для иллюстрации теории рассеяния Тиндаль воспользовался опытом, показывающим, что синий цвет по-

лучается вследствие присутствия мелких взвешенных частиц. Стеклянная трубка длиной около метра была установлена так, как показано на табл. XIV С. Ее концы были закрыты плоскими стеклами, для того чтобы сквозь трубку можно было пропускать световой пучок. Из трубки был выкачан воздух, после чего она была наполнена воздухом, смешанным с парами соляной кислоты и нитрозобутана. В течение нескольких минут происходящая химическая реакция вызывала появление очень мелких частиц, остававшихся взвешенными в газе. Эти частицы были очень однородны по размерам, что весьма существенно. Они слабо рассеивали в стороны глубокий синий свет, и по мере увеличения их размеров Тиндаль, смотря на трубку сбоку, увидел, что рассеянный свет становится ярче и одновременно делается менее насыщенным. Тиндаль восторженно пишет: „Мы наблюдали синий цвет, который соперничал с цветом самого глубокого и чистого неба Италии, если не превосходил его“.

Этот опыт можно легко показать в несколько ином виде. Для этого нужно стеклянный сосуд наполнить сильно разбавленным раствором гипосульфита. Пучок света пропускают сквозь сосуд и заставляют его падать на экран, где получается световой круг; затем добавляют разбавленную соляную кислоту, и из раствора через несколько минут осаждается сера, частицы которой постепенно увеличиваются в размерах; одновременно с этим свет, проходящий сквозь сосуд, становится сперва желтым, а затем красным, и белый кружок напоминает сначала желтое, а затем красное солнце при закате. Вода в сосуде, имеющая в начале опыта синюю окраску, делается к концу опыта серой, как туман. Цветная фотография этого опыта приведена на табл. XI Н.

Тиндаль считал, что если его стеклянную трубку полностью освободить от пыли и от паров, то ничто не будет в ней рассеивать света, и при наблюдении сбоку пучок, проходящий сквозь трубку, не будет виден. В этом он однако ошибался, так как его опыт хорошо показывает существование рассеяния света частицами и зависимость окраски рассеянного света от размера частиц.

Рэлей младший указал, что можно наблюдать рассеяние света молекулами воздуха даже в такой небольшой трубке, какую применял Тиндаль. Он отметил, что небо

имеет заметную яркость, даже когда оно освещено только Луной, и так как Солнце в полмиллиона раз ярче Луны, то его свет, рассеянный при прохождении слоя воздуха, равного двум миллионным долям всей атмосферы, должен иметь ту же яркость, что и небо, освещенное Луной; отсюда следует, что рассеяние в слое воздуха всего в несколько сантиметров толщиной уже должно быть заметно. Это было доказано соответствующими опытами.

Многие великолепные оттенки, которыми обладают Солнце и небо утром и вечером, получаются в результате того, что свет рассеивается не только самим воздухом, но и пылью и водяными парами, содержащимися в нем. Иногда дым, например от лесных пожаров, добавляет к окраске глубокий красный цвет. Когда полвека тому назад вулкан Кракатау во время извержения выбросил из своих недр тончайшую пыль, которая долго носилась в воздухе, цвет неба в течение многих месяцев был необычайно красивым на всем земном шаре, потому что пыль распространилась по всей земле и осаждалась весьма долго.

Когда мы смотрим сквозь слегка мутный воздух на дальние горы, они кажутся голубыми, но конечно сами они не испускают синего света. Синева появляется в результате рассеивающего действия молекул воздуха и частиц, присутствующих в атмосфере и находящихся в пространстве между нами и горами; это пространство заполнено таким же „небом“, какое мы видим над собой.

Облака, вообще говоря, представляют совокупность капелек, размеры которых достаточно велики для того, чтобы рассеивать все спектральные цвета одинаково сильно. Поэтому, когда облако отражает солнечные лучи, оно кажется нам белым. Находясь между нами и солнцем, оно заслоняет все лучи и кажется темным; только на краях оно пропускает достаточное количество света, и поэтому там вследствие рассеяния появляется серебряная кайма.

ЦВЕТ МОРЯ

Точно так же объясняется и синий цвет моря. На опыте это проверить гораздо труднее, и даже такие великие экспериментаторы, как Рэлей, сомневались в указанном объяснении природы этого явления. Не подле-

жит сомнению, что синева моря в большой степени вызывается отраженным светом неба; с первого взгляда это может показаться даже исчерпывающим объяснением. Мы видим, что под голубым небом море — синее, особенно когда легкий ветер вызывает появление небольших волн на его поверхности, склоны которых отражают к нам свет неба. Под свинцовым небом море кажется серым.

Вблизи берега вода зеленая, потому что в ней имеется взвешенный песок, рассеивающий короткие волны. Когда солнце освещает песчаное дно, отраженный желтый свет смешивается с рассеянным синим. Если в воде имеются водоросли, красновато-коричневый цвет, смешиваясь с синим и зеленым, дает пурпурный. Иногда вода, пресная или соленая, содержит так много взвешенного вещества, мелко раскрошенного или в виде маленьких шариков, что даже небольшое количество воды имеет заметную зеленую окраску. Ледниковая вода озера Пукати в Новой Зеландии имеет заметный зеленый оттенок даже в стакане; без сомнения, это явление встречается нередко.

Таким образом имеется много примеров, показывающих, что взвешенное вещество может являться причиной синего цвета моря, но, кроме того, доказано, что и сами молекулы воды рассеивают синие лучи, так же как молекулы воздуха. Недавно Раман из Калькутты пришел к выводу на основании своих наблюдений, сделанных во время морского путешествия, что синий цвет моря должен объясняться именно этим явлением; он сделал лабораторные опыты, показавшие, что рассеяние наблюдается при прохождении света даже сквозь совершенно чистую воду.

Луч света, падающий на спокойную поверхность чистой воды, не рассеивается по всем направлениям от того места, где он падает на воду. На последней нет деталей, делающих ее заметной, вследствие чего поверхность воды остается невидимой. Тени деревьев не видны на поверхности чистой воды, но они заметны, если вода мутная и в ней находится достаточно много взвешенных частиц, для того чтобы падающий свет сильно рассеялся, прежде чем проникнет вглубь; в этом случае появляется контраст между местами, освещенными солн-

цем и находящимися в тени. Эти тени не следует смешивать с отражением деревьев; первые находятся на поверхности воды, тогда как вторые расположены под водой, на том же расстоянии от поверхности, как сами деревья над ней. На море, покрытом мелкой рябью и мелкими волнами, мы видим тень облака, закрывающего часть света, отражаемого рябью в наш глаз; на гладкой же морской поверхности мы видим отражение облака. Когда с парохода смотрят на тень, отбрасываемую им на воду, эта тень не видна там, где море прозрачно и имеет темно-синий цвет. Она заметна только на корме, где вода вспенена и содержит много пузырьков воздуха.

Стенки пузырьков рассеивают лучи в стороны и посылают их к нам в глаз, так что если корпус парохода заслоняет свет, рассеяние в этом месте исчезает и видна тень.

Тени хорошо заметны на поверхности мутной реки (табл. XIII).

ГАЛО

Гало, окружающее иногда Солнце и Луну, также является результатом рассеяния света, происходящего при особых условиях. Когда взвешенные частицы весьма малы, они рассеивают свет по всем направлениям; когда же они велики по сравнению с длиной световой волны, то от них происходит отражение, как от твердых тел или от водяных капель. Между этими двумя крайностями имеются частицы определенного размера, вызывающие появление гало; это происходит, когда капли имеют величину, приблизительно равную длине волны. Выше мы рассматривали сходный случай, когда наблюдали действие дифракционной решетки, у которой расстояния между штрихами были того же порядка, что и длины волн света (рис. 66). Только в том случае, когда это соотношение размеров выполнялось, можно было наблюдать дифрагированные пучки. Если бы центры отверстий располагались слишком далеко друг от друга, они действовали бы независимо; если бы они были расположены слишком тесно, вторичные волновые поверхности на рис. 66 не могли бы образоваться. Точно так же и в случае дифракционных явлений, наблюдаемых с кап-

аями, последние не должны быть ни слишком большими, ни слишком маленькими.

Легко видеть, что если водяная капля, находящаяся в воздухе, вызывает какое-нибудь дифракционное явление, сопровождающееся разложением цветов, то неизбежно должно образоваться гало. Когда свет определенной длины волны рассеивается преимущественно в каком-

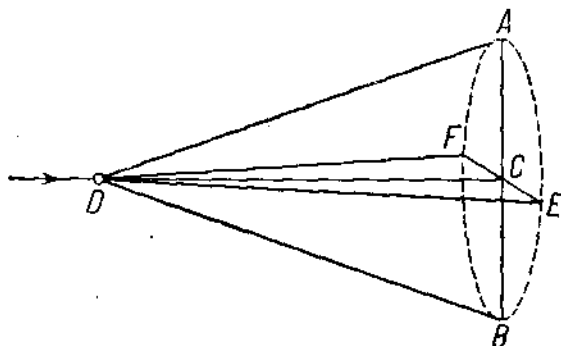


Рис. 72. Если дифрагированный луч от капли D составляет угол ADC с первоначальным направлением CD , вся совокупность дифрагированных лучей образует на экране кольцо, представленное на рисунке, потому что все направления DA , DB , DE , DF составляют с DC один и тот же угол.

нибудь одном направлении, что является характерной особенностью дифракции, то на экране, поставленном на пути рассеянного света, появляется след в виде кольца с центром в точке C (рис. 72), являющейся центром проекции капли на экран. Это должно быть так потому, что в силу симметрии направление рассеяния, которое мы имеем в виду, может располагаться относительно линии CD любым образом, лишь бы только это направление составляло с прямой CD один и тот же угол. Мы можем ожидать, что чем меньше длина волны, тем меньше и угол между направлением рассеяния и первоначальным лучом, так что гало, появляющееся от одной капли, должно быть окрашено, причем синий цвет должен попасть во внутреннюю часть кольца. Это явление легко показать. Однако, прежде чем сделать это, мы рассмотрим теорию несколько детальнее; это позволит нам лишний раз убедиться в могуществе волновой теории.

Начнем с описания одного опыта, который при тщательной постановке может быть осуществлен в лаборатории. Предположим, что мы делаем на экране SS (рис. 73) два маленьких отверстия с центрами A и B и помещаем этот экран перед точечным источником света. Мы имеем в виду „точечный“ источник, потому что источник больших размеров вызвал бы появление накла-

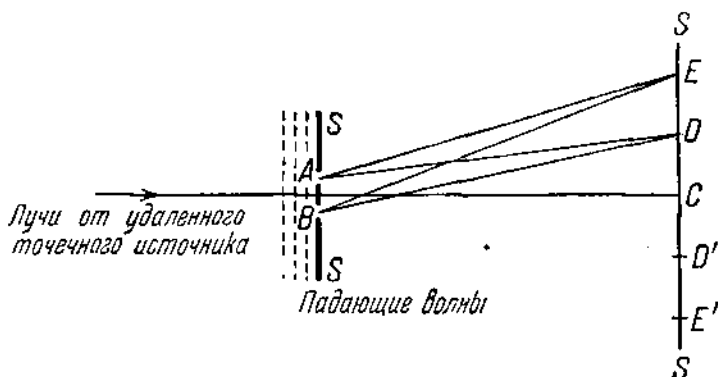


Рис. 73. На два маленьких отверстия в экране слева падают световые волны. В точке C две системы сферических волн, исходящих из A и B , усиливают друг друга, и здесь получается свет. Если DB превышает DA на половину длины волны, точка D не получает света, потому что обе системы волн уничтожают друг друга. В точке E опять будет свет, если EB превышает EA на величину длины волны и обе системы волн придут в точку E в одной фазе. На экране получаются чередующиеся светлые и темные линии. Положение их зависит от длины волны; синие линии располагаются друг к другу ближе, чем красные

дывающихся изображений отверстий, вследствие чего явление, которое мы собираемся наблюдать, было бы смазано. С правой стороны экрана от отверстий A и B расходятся сферические волны, последовательно падающие на экран $S'S'$. В некоторые точки экрана обе системы волн приходят в одной фазе, и их действие складывается.

В других они уничтожают друг друга, и эти места экрана получают темными. Например, в точке C , равно удаленной от A и B , гребни волн складываются и там наблюдается свет. Это относится не только к точке C , расположенной в плоскости чертежа, но и ко всем остальным точкам экрана, так же равно удален-

ным от A и B , независимо от того, находятся они в плоскости чертежа или нет. Получается светлая линия, показанная на рис. 74 горизонтальной прямой, проходящей через C ; этот рисунок изображает картину, получающуюся на экране.

В точке экрана D , где DB превышает DA на половину длины волны, обе системы волн уничтожают друг друга, и здесь получается темное место. Это относится также ко всем точкам линии рис. 74, проходящей через D ; эта линия слегка искривлена, потому что справа и

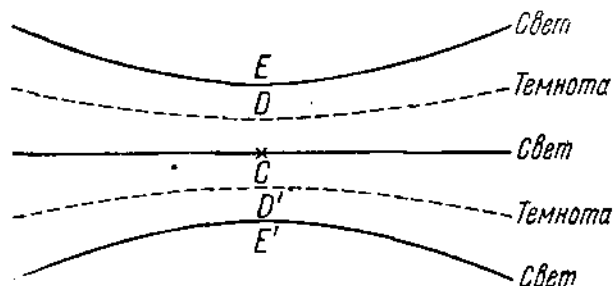


Рис. 74. Вид экрана SS рис. 73. Светлые места представлены сплошными линиями, темные—пунктирными. Получается ряд многочисленных линий, небольшая часть которых изображена здесь. Каждая полоса является узким спектром

слева от точки D расстояния от A и B больше, чем в D , и точки, в которых разность этих расстояний достигает половины длины волны, удалены от горизонтальной прямой сильнее. Таким образом на экране появляется ряд светлых линий.

Это явление сопровождается разложением цветов, потому что положение точек вроде D и E и линий, проходящих через них, зависит от длины волны. Синие полосы лежат ближе к горизонтальной прямой рис. 74, чем красные, и поэтому в действительности полосы представляют ряд спектров.

Предположим теперь, что мы будем вращать экран с отверстиями A и B вокруг оси, перпендикулярной экрану и проходящей посередине между A и B . Одновременно будет вращаться и картина на экране. Отверстия при этом сольются в кольцо или, если они вначале касались друг друга, в один общий кружок. Картина на

экране превратится в гало с центром в точке C и радиусом, несколько превышающим CE . Последний факт можно очень просто показать, проведя на куске картона две черные линии, проходящие через E и E' , и быстро вращая картон в его плоскости вокруг точки C . Если линии раскрасить, сходство с гало будет больше.

Таким образом свет, проходящий сквозь два отверстия, при вращении последних образует гало; и хотя два вращающихся кружка в нашем опыте не вполне эквивалентны одному большому отверстию, ясно, что мы не сделаем большой ошибки, если их примем тождественными, и возникающее гало не должно измениться сколько-нибудь существенно после внесения соответствующей поправки.

Описанный выше опыт представляет большие экспериментальные трудности, потому что он удастся лишь при весьма тщательном подборе всех условий: отдельные элементы установки должны быть чрезвычайно малого размера. Если центры отверстий A и B отстоят друг от друга на $0,5$ мм, а экран находится на расстоянии 1 м, радиус гало составляет всего 2 мм; при этом яркость его весьма мала.

Мы должны сделать еще один шаг, который позволит дополнить наше объяснение. Мы рассмотрели, как возникает гало при прохождении света сквозь маленькое отверстие; в то же время нас интересует результат действия маленького непрозрачного объекта. Можно показать, что оба явления эквивалентны; и в каждом из этих случаев возникает одинаковое гало. Этот факт является простым и очень интересным следствием волновой теории света, на которое обратил внимание в 1837 г. Бабинэ, рассуждавший следующим образом:

Предположим, что экран SS сделан из стекла. Если это стекло будет всюду прозрачным, никакого гало не получится. Если же его зачернить, оставив при этом лишь маленькое отверстие, гало появляется. Далее действие чистого стекла можно рассматривать как сумму действия зачерненного стекла с отверстием, и прозрачного с темным кружком, занимающим то же положение, что и отверстие в первом случае. Результат сложения должен совпадать с действием совершенно чистого стекла, которое, как мы знаем, не вызывает никаких

особых явлений в точках экрана, подобных *Е*. Следовательно, эти два объекта должны вызывать на экране явления, взаимно уничтожающие друг друга. Волновое движение может быть уничтожено только равным ему движением, имеющим ту же самую длину волны и происходящим таким образом, что его гребни совпадают со впадинами другого, и наоборот. Таким образом черный кружок на прозрачном фоне должен порождать

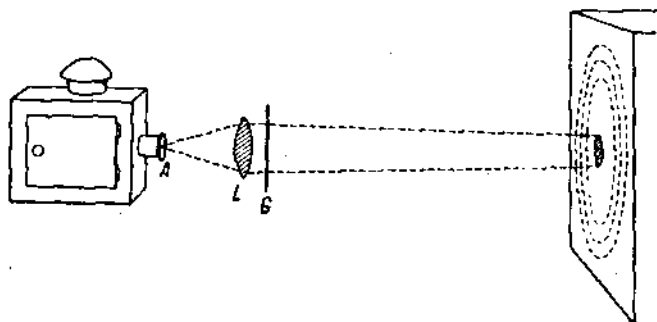


Рис. 75. Свет фонаря проходит сквозь маленькую диафрагму *А* и фокусируется линзой *Л* на отверстие в ящике, изображенном справа. Попадая внутрь зачерненной камеры, свет поглощается так и не мешает наблюдениям. Стекла́нная пласти́нка *Б*, покрытая мелкой пылью или каплями влаги, вызывает появление гало на стенке ящика; устранив прямой пучок, можно видеть сравнительно слабое гало

гало, сходное с тем, которое получается в случае маленького отверстия в непрозрачном экране. Различие между этими двумя гало, вызывающее уничтожение обоих явлений, когда они накладываются друг на друга, совершенно незаметно для глаза, т. к. при этом одна система волн только отстает или опережает другую на полволны.

Мы можем теперь рассмотреть явления, происходящие в действительности. Для того чтобы получилось гало сколько-нибудь значительного размера, частицы должны быть очень малыми — приблизительно от 0,1 до 0,02 мм диаметром. Гало, получающееся при этом, слишком слабо, для того чтобы его можно было увидеть. Но мы можем воспользоваться суммарным действием многих тысяч таких частиц. Если расположить стеклянную пластинку на пути узкого светового пучка и подышать на нее, каждая из мельчайших капель, осевших на стекле, дает гало в одном и том же месте экрана, особенно если все

капли имеют приблизительно одинаковые размеры. Несмотря на то, что частицы занимают различные положения, все гало практически накладываются друг на друга. Суммарная картина хорошо заметна (рис. 75). Чистое стекло, оставленное на некоторое время в спокойной комнате, покрывается при этом тонкой пылью в количестве, достаточном для того, чтобы вызвать появление гало; но если „надышать“ на стекло, число капель делается настолько большим, что явление значительно усиливается. Вначале капли очень малы и забавно наблюдать, как кольца, вызванные пылью, усиливаются другими и затем быстро сжимаются по мере того, как самые мелкие капли испаряются и сливаются друг с другом. Кольца обладают всеми цветами радуги и в темной комнате явление очень красиво. Обычно, осуществляя этот опыт, в центре экрана делают отверстие, при помощи которого устраняют яркий блик, получающийся от прямопроходящего пучка; в противном случае этот блик не позволил бы наблюдать нежной окраски гало.

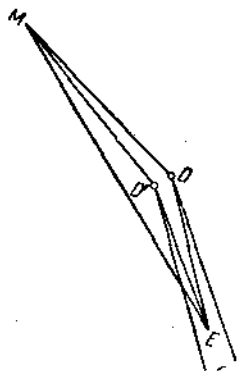


Рис. 76. Капля D посылает в глаз E красные лучи, а D' — синие. Вследствие этого вокруг Луны, видимой в направлении M , получается окрашенное гало

Гало вокруг Луны или Солнца происходит по тем же причинам, но при этом глаз получает от каждой капли только один цвет (рис. 76). Пусть M представляет Луну, а E — глаз. Капля D , находящаяся в воздухе, так же как в описанном выше опыте, вызовет на экране появление гало с центром в точке пересечения экрана с прямой MD . Пусть глаз находится, например, во внешней части этого гало, где на него от капли D падают красные лучи. Он не увидит синего цвета от той же капли, потому что синее кольцо находится внутри красного и синие лучи не попадают в глаз. В то же время капля D' вызывает появление другого гало, от которого в глаз попадают уже только синие лучи. Таким образом мы видим красный цвет от капли D , а синий — от D' , и так как это явление симметрично относительно линии,

соединяющей глаз с Луной, наблюдатель видит последнюю окруженной гало с синим кольцом внутри и красным снаружи. Эта картина в точности совпадает с той, которая получалась на экране в наших опытах; существует лишь небольшое различие в способе образования обоих типов гало.

Для того чтобы гало было отчетливым, капли должны быть одинакового размера; тогда отдельные гало накладываются друг на друга, и яркость их также складывается. Чем меньше размеры водяных капель, вызывающих появление гало, тем больше радиус последнего.

Легко воспроизвести это явление для отдельного наблюдателя. Для этого нужно рассматривать яркую светлую точку сквозь стекло, „запотевшее“ от дыхания.

ЭРИОМЕТР ЮНГА

Томас Юнг применил принцип дифракции для эриометра — прибора, служащего для измерения диаметров шерстяных волокон. Им пользуются на практике до сих пор. Когда тонкое волокно помещают в световой пучок, падающий на экран, на последнем появляются яркие полосы, окаймляющие с обеих сторон тень волокна. Объяснение этого явления аналогично тому, которое мы дали для случая двух маленьких отверстий, и нет необходимости входить в его детали. Если несколько волокон, расположенных в различных направлениях, перпендикулярных световому пучку, поместить на пути света, экран окажется пересеченным рядом полос, направленных также всевозможным образом; и если количество волокон достаточно велико, картина будет сходна с той, которая получилась бы при быстром вращении яркой системы полос, получающихся от каждого волокна, как мы указывали выше, когда пользовались рис. 74. Получается гало, диаметр которого зависит от толщины волокон.

Прибор Юнга изображен на рис. 76-bis; глаз смотрит в этом приборе сквозь большое количество волокон на маленькую светлую точку; последняя осуществляется при помощи яркого фона, перед которым установлен экран с небольшим отверстием. Точка видна при этом окруженной кольцом.

Дифракционные явления наблюдаются на каждом шагу. Уличные фонари кажутся цветными звездами при рассматривании их сквозь зонт. При этом лучи „звезд“ параллельны направлениям нитей ткани зонта. То же явление видно сквозь шелковую занавеску и вообще

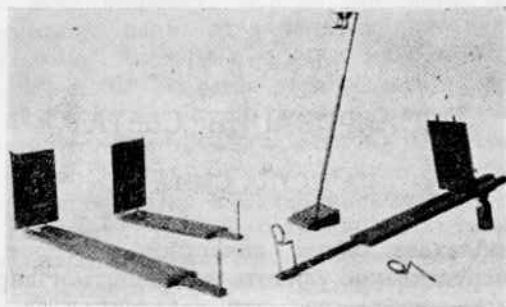


Рис. 76-bis. Эриометры, изготовленные Юнгом. В каждом из них имеется держатель для укрепления измеряемой нити, экран с небольшими отверстиями и подвижная шкала

сквозь любую достаточно прозрачную материю. Дети, смотрящие на огонь сквозь полужакрытые глаза, видят, как они говорят, „дорожки“, идущие из пламени. Жирная тряпка оставляет на стекле параллельные следы, обладающие красной и зеленой окраской.

Дифракционные явления вызывают окраску только вследствие разделения длин волн, и в этом их существенное отличие от действия красящих веществ, которые обладают избирательным поглощением. Как мы убедились на приведенных примерах, дифракция является естественным и весьма характерным следствием волновой теории. В течение столетия, прошедшего со времени Юнга, дифракцию изучали на самых различных явлениях, и тот факт, что ни одно из них не осталось без объяснения, а в ряде случаев оказалось возможным даже предсказать новые, еще неизвестные явления, служит прекрасным подтверждением волновой теории света.

Глава VI

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

КАЧЕСТВА СВЕТА

Свет обладает одним качеством, которое глаз не может непосредственно увидеть и измерить. Направление, интенсивность, цвет — все эти качества глаз замечает и пользуется ими в процессе зрения; эти качества или аналогичные им являются общими для всех волн — эфирных, водяных и воздушных (звуковых). Но все упомянутые волны различаются в одном отношении. Это относится к природе движения волны, и касается движения не самой волны, а той среды, в которой происходят колебания.

Например, когда волны катятся по поверхности моря, вода в каком-нибудь месте при прохождении волн поднимается и опускается. Лишь форма волны движется вперед, а не вещество. Корабль или другой предмет, плавающий на поверхности, не увлекается волной вперед; он только поднимается вверх и опускается вниз, слегка скатываясь каждый раз вперед и назад. Пловца, лежащего на спине в открытом море, проходящие волны качают вверх и вниз, но они не увлекают его в горизонтальном направлении. Лишь вблизи берега, где движение приобретает несколько иной характер, и где оно, строго говоря, является уже не волнами, а „прибоем“, вода накатывается на берег и выносит пловца. Морские волны являются „поперечными“, так как движение воды происходит поперек направления распространения самих волн.

Совершенно иной характер носит движение воздуха в звуковой волне. Молекулы воздуха перемещаются

вперед и назад по направлению движения системы волн, а не из стороны в сторону. Тиндаль на своих рождественских лекциях выстраивал перед кафедрой шеренгу мальчиков, каждый из которых держался за плечи стоящего перед ним. Он толкал крайнего, и толчок проходил всю шеренгу, вследствие чего мальчик на другом ее конце падал на заранее приготовленную мягкую подстилку. Движение происходило при этом вдоль шеренги. Если бы Тиндаль стал качать крайнего мальчика вперед и назад на этот раз не так сильно, последовательные толчки проходили бы вдоль шеренги наподобие системы волн и очень близко имитировали бы распространение звука в материальном теле. Молекулы воздуха соответствуют мальчикам; их движение вперед и назад происходит, конечно, несравненно быстрее, чем можно осуществить в опыте Тиндаля.

Представим себе канат, один конец которого закреплен, а другой мы держим в руке; если мы встряхнем последний, то вдоль каната побегит импульс; это явление из всех приведенных примеров ближе всего соответствует движению световой волны. Световые волны, как и морские, — поперечные, а не „продольные“, как звуковые волны. Но морские волны обладают ограниченным числом возможных направлений колебательного движения; ибо вода только поднимается и опускается, но не может двигаться из стороны в сторону в горизонтальном направлении, которое также перпендикулярно распространению волны. Канат же дает в этом смысле более полную аналогию: поперечные движения могут происходить в любом направлении, перпендикулярном канату. Это как раз то, что необходимо предположить относительно света для того, чтобы можно было дать объяснение некоторым явлениям.

Эта гипотеза важна потому, что мы вынуждены наделять свет новым качеством, не ощущаемым глазом, но которое в то же время можно обнаружить иным путем и которое, следовательно, надо как-то объяснить. Как мы увидим, это свойство обычно обнаруживается при помощи некоторых кристаллов; в сильной степени его можно тогда наблюдать в свете неба и в свете, отраженном от поверхности прозрачных тел, например, моря.

Это свойство чрезвычайно интересно и важно; его

исследование дало очень много развитию наших современных взглядов на природу света. История этого вопроса прекрасно иллюстрирует постепенный рост научной

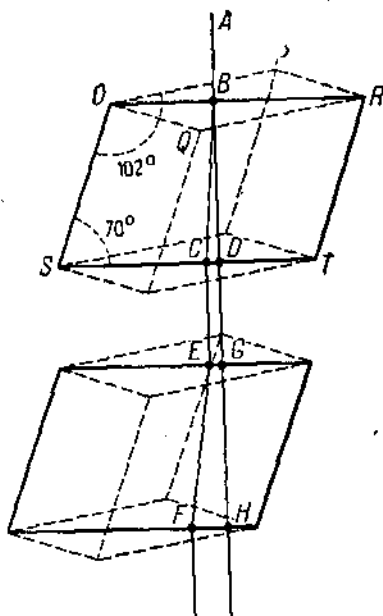


Рис. 77. Копия рисунка Гюйгенса, приведенного в его „Трактате“. Для наглядности предполагается, что кристалл вырезан таким образом, что OP , OQ и OS равны друг другу; в этом случае OT является осью, проходящей через точку O , а $ORTS$ есть сечение, содержащее эту ось. Луч AB падает перпендикулярно грани $OPRQ$, он разделяется на обыкновенный луч BD , являющийся продолжением AB и на BC — необыкновенный луч, составляющий с AB некоторый угол; оба луча расположены в плоскости $ORTS$. Выходя из кристалла, они принимают прежнее направление

мысли, и поэтому мы рассмотрим его в историческом разрезе, начиная со времен Ньютона и Гюйгенса. „Из Исландии, острова, находящегося в Северном море на широте 66° , — писал Христиан Гюйгенс в 1678 г., — был привезен кристалла или прозрачный камень, весьма замечательный по своей форме и другим качествам, но более всего по своим странным преломляющим свойствам“. Мы знаем теперь, что многие кристаллы обладают теми же свойствами, но, без сомнения, „исландский камень“ отличается от других своими размерами, чистотой и исключительно сильным проявлением того оптического свойства, о котором идет речь. Гюйгенс пишет, что Эразм Бартолимус первый обратил внимание на этот кристалл, но тем не менее он в своем „Трактате о свете“ добавляет: „Я принялся с большой тщательностью исследовать эти особенности преломления, для того чтобы быть в них вполне уверенным, прежде чем пытаться объяснить их причины“. Фотографии кусков исландского шпата представ-

лены на табл. XIV и XV. Мы знаем теперь, что он является кристаллом CaCO_3 — углекислого кальция. Шпат легко раскалывается вдоль некоторых плоскостей, так что он естественно принимает ромбическую форму. Это можно видеть на табл. XV А особенно отчетливо на примере

отдельного куска, лежащего на столе под большими кусками, использованными в опыте, или на фотографии табл. XIV А. Два угла ромба O и T (рис. 77) — тупые и составляют приблизительно 102° .

ТРАКТАТ О СВЕТЕ ГЮЙГЕНСА

Внимание Гюйгенса прежде всего привлек тот любопытный факт, что каждый луч (за исключением особых случаев), входящий в кристалл, разделяется на два луча, распространяющиеся в кристалле по различным направлениям; эти лучи по выходе из кристалла хотя и принимали свое первоначальное направление, но все же оставались отдельными лучами, следующими параллельно друг другу. Рис. 77, взятый из „Трактата“ Гюйгенса, изображает это явление. Луч AB представлен для простоты входящим в кристалл перпендикулярно поверхности. При этом он разделяется на два луча BC и BD , которые выходят из кристалла параллельными пучками CE и DG . Фотография XV А отчетливо показывает это явление. В этом опыте луч света направляется на кусок шпата; его путь в воздухе был сделан видимым при помощи дыма. Внутри кристалла следы двух лучей невидны, потому что шпат совершенно прозрачен и рассеивает свет весьма слабо. Выходящие лучи также заметны в дымном воздухе.

Разделение луча на два хорошо видно, если положить кусок шпата на бумагу, на которой нарисована черная точка, или какая-нибудь другая отметка: эта точка видна двойной. На табл. XIV А показано двоение шрифта.

Если сделать аналогичные опыты при различных положениях кристалла исландского шпата относительно падающего света, мы найдем так же, как в свое время нашел Гюйгенс, когда он исследовал это явление, что два пучка, на которые разделяется падающий луч, ведут себя различно. Один из них следует обычным законам преломления. Например, если мы положим кусок шпата на бумагу с нарисованной точкой и будем вращать его, оставляя лежать на бумаге, одно из изображений будет оставаться неподвижным, как если бы это был не исландский шпат, а простое стекло (рис. 78); второе же изображение вращается вокруг первого, и его положение связано с формой и положением кристалла. Линия, соединяющая оба изобра-

жения, параллельна биссектрисе большего угла основания. То изображение, которое остается неподвижным, кажется значительно ближе другого. Очевидно, преломление, происходящее при образовании этого изображения, — больше; свет, образующий его, распространяется в кристалле медленнее, чем тот, который образует другое изображение.

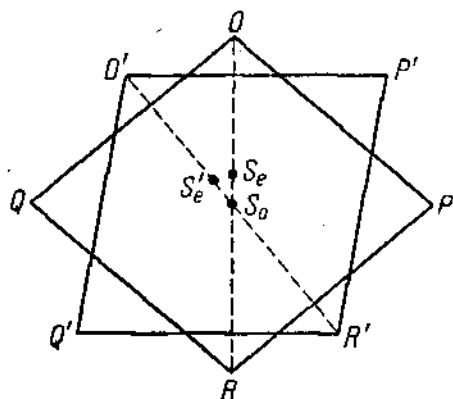


Рис. 78. Соотношение между обыкновенным и необыкновенным изображениями черной точки, рассматриваемой сквозь кристалл исландского шпата. Наблюдатель видит точку в S_o и S_e , на которых первое изображение кажется ближе. Если кристалл повернуть, например, в положение $O'P'R'Q'$, изображение S_o не сдвинется, тогда как S_e перейдет в положение S'_e , лежащее на прямой $O'R'$.

При перемещении кристалла по бумаге без вращения оба изображения остаются неподвижными.

сейчас увидим, объяснения этой неудачи не менее интересны, чем геометрические построения Гюйгенса, оказавшиеся весьма плодотворными.

Более ранние работы Гюйгенса по отражению и преломлению волн на границе между воздухом и стеклом или водой, или вообще на поверхности, разделяющей два любых прозрачных тела, привели его к применению одного геометрического построения, которым мы уже пользовались.

Предположим, что падающая волна встречает экран, в котором имеется большое число отверстий. В опыте, представленном на рис. 66, волновой фронт был параллелен экрану, но теперь мы освободимся от этого ограни-

Луч, подчиняющийся обычным законам, называется обыкновенным лучом, другой — необыкновенным. Гюйгенс задался целью найти законы преломления необыкновенного луча и ему полностью удалось это сделать. В его „Трактате“ описаны остроумные методы, с помощью которых он разрешил эту задачу. Однако он не был в состоянии ни объяснить физические причины поведения этих лучей, ни связать их с природой кристалла. Как мы

чения и будем считать, что волны падают наклонно, как это изображено на рис. 79. Каждое отверстие последовательно делается источником колебаний, от которого распространяются круговые волны, расходящиеся по другую сторону от экрана. Эти волны, как мы видели выше, постепенно образуют один волновой фронт. Если скорость волн по обе стороны от экрана одинакова, новый фронт параллелен прежнему. Если же скорости различны, то наклон волновой поверхности меняется (рис. 79, см. также рис. 20 и 21). На результат не могут повлиять какие-нибудь изменения в числе или размерах отверстий; они могут присутствовать в огромном числе и располагаться совершенно вплотную друг к другу; по существу даже не обязательно предполагать присутствие экрана.

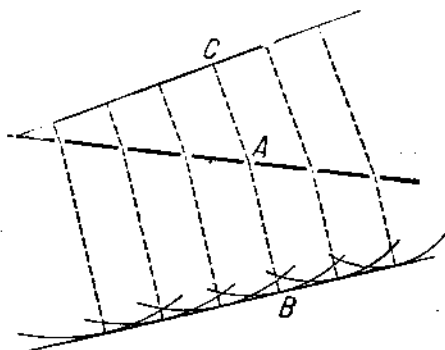


Рис. 79. Система волн проходит сквозь отверстие в экране в среду, где их скорость меньше, чем снаружи. Круговые волны образуют одну из волновых поверхностей

Прежде чем идти дальше, сделаем одно замечание. В нашем опыте волна от точки A достигает точки B , в которой она отдает свою долю энергии волновому фронту. Если отверстие A закрыть, в B окажется некоторый недостаток возмущения; в случае световых явлений это значит, что в этом месте будет несколько меньше света. Если экран с отверстиями отождествлять с границей между двумя средами, закрывание точки A сказывается, как тень в B . Мы можем считать, что AB есть направление светового луча после преломления. Направление его до преломления было CA . Таким путем Гюйгенс объяснял явление преломления.

Аналогичным образом можно объяснить это явление и в случае кристалла, если только внести в это представление некоторые обобщения. Появление второго луча не может быть объяснено иначе, как одновременным существованием в кристалле двух значений скорости

света, что влечет за собой появление двух систем сферических волн. Что двум скоростям должны соответствовать два луча, не вызывает сомнений, но оба они должны были бы подчиняться обычным законам преломления, тогда как в действительности необыкновенный луч подчиняется особым законам, зависящим от ориентировки кристалла по отношению к падающему лучу.

Гюйгенс обнаружил при этом, что законы, управляющие преломлением необыкновенного луча, не могут относиться к распространению сферических волн; он предположил, „что должно иметь место распространение эллиптических или, скорее, сфероидальных волн“. Это оказалось достаточным для решения задачи. Было вполне естественно, что он пытался привлечь для объяснения сфероидальные волны, так как эта форма самая простая после сферы, оказавшейся слишком простой. Сфероид, хорошо известным примером которого является наша Земля, есть тело, образованное вращением эллипса около одной из его осей, являющейся осью получаемой при этом поверхности. Гюйгенс предположил, что распространяющиеся в кристалле волны имеют вид сфероидальных поверхностей. Он нашел, что они должны быть сплюснутой формы, какую имеет Земля; их полярный диаметр, или полярная ось, является наименьшим.

Эти сфероидальные поверхности должны быть связаны с формой кристалла и, следовательно, ось сфероида должна быть определенным образом ориентирована относительно естественных граней, по которым кристалл раскалывается. В противном случае представление о сфероидальной поверхности не будет иметь никакого смысла. Мы усматриваем в этом связь с экспериментальным фактом, заключающимся в том, что необыкновенный луч следует по направлению, определяемому формой кристалла (рис. 77).

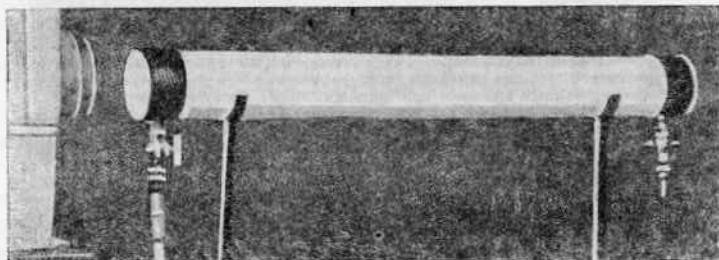
Если это так, то ось сфероида может занимать только одно единственное возможное положение: она должна совпадать с осью кристалла (т. е. с направлением линии, проходящей через вершину O (рис. 77), в которой все три угла равны 102°) и составлять одинаковые углы с тремя гранями, сходящимися в O . Может быть, полезно напомнить, что ось кристалла не является какой-нибудь определенной линией, а только определенным направлением. Ось можно провести через любую точку. На рис. 77



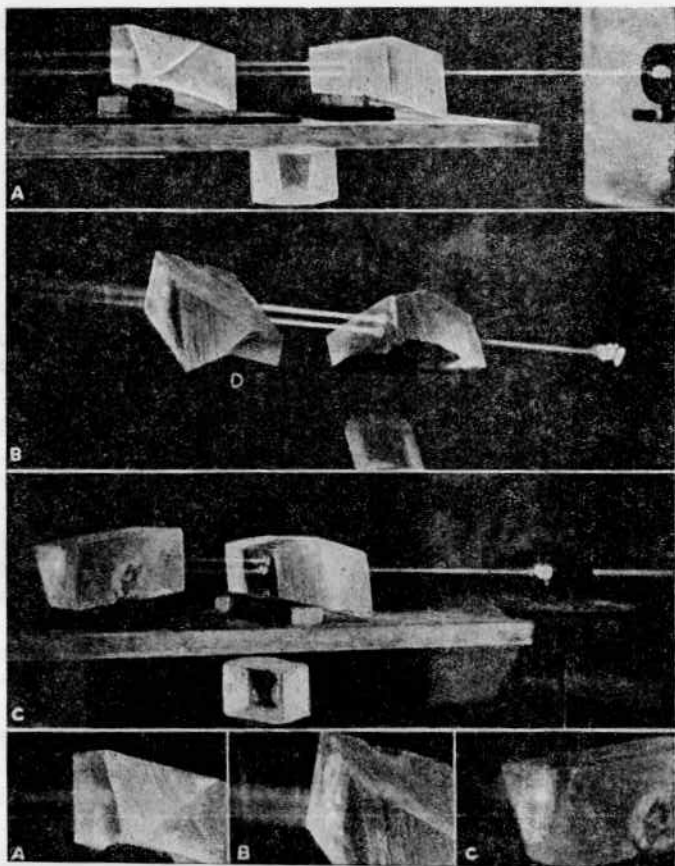
А. Раздвоение изображения предмета, рассматриваемого сквозь призму исландского шпата (стр. 141).



В. Кристалл исландского шпата разделяет первоначальный световой луч на два. Линия, соединяющая точки выхода этих пучков, параллельна бисектрисе тупого угла грани, на которой находятся эти точки. Световые колебания нижнего луча, являющегося обыкновенным, проходят в плоскости, перпендикулярной этой линии; последние в свою очередь расположена параллельно отражающей стеклянной пластинке. Из фотографии видно, что часть обыкновенного луча отражается. Плоскость колебаний в верхнем луче, очевидно необыкновенном, потому что он не находится ни на одной прямой с падающим пучком, параллельна линии, соединяющей точки выхода. Этот луч не отражается (стр. 149).



С. Трубка, в которой Тиндаль производил свои опыты по рассеянию света мелкими частицами, взвешенными в воздухе (стр. 126).



А. Два кристалла исландского шпата установлены так, что их одинаковые грани расположены параллельно. Ромбическая форма кристаллов не придана им искусственно; хорошо заметная параллельность ребер — естественная. Луч от фонаря, сделанный видимым при помощи дыма, рассеивающего свет, раздваивается при прохождении сквозь первую призму; расстояние между лучами увеличивается второй призмой. Обратите внимание, что светлые пятна, отмечающие точки выхода лучей из кристаллов, лежат на прямой, параллельной биссектрисе тупого угла грани, на которой они находятся (стр. 141, 146, 148).

В. В этом случае второй кристалл повернут таким образом, что выходные грани остались у обоих кристаллов параллельными. Теперь каждый из двух лучей, выходящих из первого кристалла, раздваивается вторично. В месте окончательного выхода лучей получается четыре светлых пятна (стр. 146, 148).

С. Второй кристалл повернут на 180° по сравнению с положением на рис. А. Случайно оба кристалла оказались приблизительно одинаковой толщины, и два луча, выходящие из первого, снова соединяются в один при выходе из второго (стр. 146, 148). Выходные грани показаны на дополнительных фотографиях в большем масштабе для того, чтобы светлые пятна в месте выхода были лучше видны.

ось, проведенная через точку O , не проходит через противоположную вершину ромба, если PO , OQ и OS не равны друг другу; последнее же зависит только от того, как мы вырезали кристалл исландского шпата. Положение оси связано со свойствами кристалла, а не с его размерами.

Посмотрим теперь, как Гюйгенс применил новое представление для объяснения результатов своих опытов.

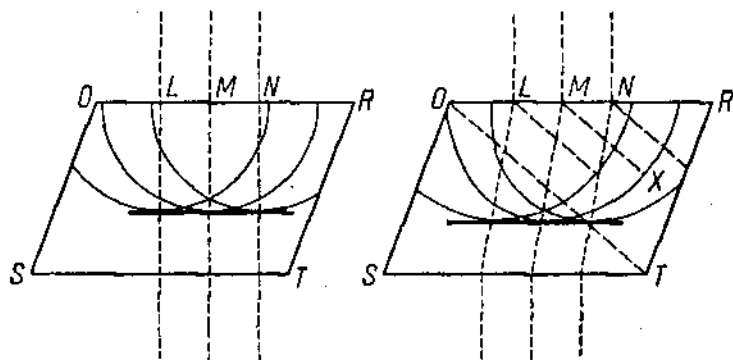


Рис. 80 и 81. Построение Гюйгенса для обыкновенного и необыкновенного лучей в исландском шпате

Возьмем случай, представленный на рис. 77, на котором луч AB представляет ряд волн, падающих на кристалл, с фронтом, параллельным его грани. Волновой фронт (рис. 80 и 81) падает на грань кристалла, и его дальнейшее продвижение согласно методу Гюйгенса можно найти, проведя волновые поверхности, расходящиеся от различных точек грани LMN . В случае, когда действуют обычные законы преломления, мы, как и прежде, рисуем сферические волновые поверхности, и пунктирные линии показывают распространение обыкновенного луча (рис. 80). Обыкновенный луч ведет себя в кристалле так же, как в стекле. Для необыкновенного луча волновые поверхности являются сфероидами с осями, параллельными оси кристалла. На рис. 81 вместо сфер рис. 80 нарисованы эти сфероиды; легко видеть, что волновой фронт движется в кристалле наклонно и, таким образом, наше построение соответствует опыту. Гюйгенс измерил величину откло-

нения необыкновенного луча от обыкновенного и отсюда определил форму сфероида.

Обобщение, сделанное Гюйгенсом, оказалось в полном согласии со всеми опытными данными о взаимном расположении падающего луча и обоих лучей, появляющихся внутри кристалла. Это совпадение теории с опытом в свое время могло считаться поразительным.

„УДИВИТЕЛЬНОЕ ЯВЛЕНИЕ“ ГЮЙГЕНСА

Дальше этого Гюйгенс пойти не мог, потому что он ничего не знал о существовании и природе той особенности света, которую мы называем поляризацией. Трудности, встретившиеся ему, лучше всего выражены его собственными словами. Ниже мы увидим, как он описывает это „удивительное явление, происходящее с лучами при прохождении их сквозь два куска (кристалла), причина которого неизвестна“. Чертеж, сделанный им в качестве иллюстрации, приведен на рис. 77 (фотографии табл. XV *A, B, C* показывают это явление так, как оно происходит в действительности), а описание явления, данное Гюйгенсом, таково:

„Это явление заключается в том, что если взять два куска кристалла и расположить их один над другим, или просто держать на некотором расстоянии друг от друга так, чтобы грани одного были параллельны граням другого, то луч света *AB* разделяется в первом кристалле на два пучка *BD* и *BC*, в результате двух преломлений — правильного и неправильного. Попадая затем во второй кристалл, каждый луч проходит там без дальнейшего раздвоения; но обыкновенный луч *DC* преломляется согласно обычным законам преломления и идет дальше в виде луча *GH*, тогда как другой — *CE* испытывает опять необычное преломление — *EF*.... Удивительно, что лучи *CE* и *DC*, падающие на нижний кристалл из воздуха, не разделяются, как это происходило с первоначальным лучом *AB*. Очевидно, луч *DC* при прохождении в верхнем кристалле теряет какие-то из своих свойств, необходимые для того, чтобы происходило необычное преломление, и аналогично *CE* теряет свойства, способствующие правильному преломлению...“. Иначе говоря, можно ожидать, что обыкновенный луч всегда является обыкно-

Бенным, а необыкновенный должен быть всегда необыкновенным. Далее Гюйгенс продолжает: „Но есть еще один факт, который не соответствует этому заключению. Он заключается в том, что когда два кристалла располагают таким образом, что плоскости, составляющие главное сечение, пересекаются под прямыми углами, ... луч DG , полученный в результате правильного преломления, испытывает в нижнем кристалле только необыкновенное преломление, и наоборот, луч CE , испытавший в верхнем кристалле необыкновенное преломление, в нижнем преломляется обычным образом...“ Иначе говоря, обыкновенный луч становится необыкновенным, и наоборот. Главным сечением кристалла, например $OSTR$ на рис. 77, является то, которое проходит через одно из ребер, сходящихся в тупом угле (рис. 77), и делит угол между двумя другими ребрами пополам.

„Но во всех остальных бесчисленных положениях, кроме тех двух, о которых я уже говорил (главные сечения расположены по отношению друг к другу или параллельно или перпендикулярно), каждый луч DG и CE при преломлении в нижнем кристалле снова раздваивается, так что из одного луча AB получается в результате четыре, иногда одинаково яркие, иногда весьма различные по своей яркости в зависимости от взаимного положения кристалла, но все вместе они содержат света не больше, чем луч AB .“

„Если рассмотреть, при каких условиях лучи CE и DG остаются неизменными, окажется, что это зависит от того положения, которое занимает нижний кристалл, двойт он эти два луча еще раз или нет, а так как первоначальный луч двойтсЯ всегда, отсюда неизбежно вытекает заключение, что световые волны после прохождения первого кристалла приобретают какое-то свойство или склонность, заключающиеся в том, что когда они встречаются вещество второго кристалла, то в некоторых положениях они могут приводить в движение два различных вещества, которым соответствуют два преломления; когда же они встречаются второй кристалл в другом положении, они в состоянии приводить в движение только одно из этих веществ. Но до сих пор я не нашел удовлетворительного объяснения этого факта.“

Таким образом Гюйгенс „предоставил исследование

этого явления другим". Он не мог разгадать, что представляло собой „какое-то свойство или склонность" светового луча после выхода из первого кристалла приобретать „стороны", если пользоваться термином, распространенным в течение долгого времени после Гюйгенса. Ссылка Гюйгенса на „два различных вещества" соответствует его объяснению двойного лучепреломления и теперь не имеет никакого значения.

Опыты Гюйгенса представлены на фотографиях табл. XV. Луч света на табл. XV А при прохождении сквозь правый кусок исландского шпата, разделяется на два; световые пучки сделаны видимыми при помощи дыма, который при фотографировании выпускался в воздух. Второй кусок шпата поставлен так, что его ребра параллельны ребрам первого. Оба кристалла ориентированы при этом одинаково: иными словами, их положения тождественны. В этом случае не происходит вторичного раздвоения лучей; прохождение сквозь второй кристалл сказывается только на увеличении расстояния между пучками.

Лучи можно проследить либо по их следам в дымном воздухе либо по световым бликам, появляющимся вследствие рассеяния на неполированных гранях в тех местах, где свет входит в кристаллы или выходит из них. Легко видеть, что линия, соединяющая эти блики, как указано на предыдущих рисунках, параллельна биссектрисе тупого угла той грани, сквозь которую лучи выходят.

На табл. XV В второй кристалл повернут вокруг оси, совпадающей с направлением лучей. После прохождения пучка через второй кристалл появляется четыре луча. Положение наблюдателя на этом снимке несколько изменено, для того чтобы вторичное двоение пучка было заметнее. Это одно из „бесчисленных возможных положений" Гюйгенса.

На табл. XV С второй кристалл повернут на 180° ; теперь можно видеть, как два луча, выходящие из первого кристалла, снова соединяются в один после прохождения второго.

Эти два куска шпата случайно оказались почти одинаковой толщины, и действие одного из них уничтожает действие другого.

ОПЫТ МАЛУСА

После Гюйгенса прошло целое столетие, прежде чем были сделаны первые попытки выяснить эту тайну. В 1808 г. Малус случайно взглянул сквозь кусок исландского шпата на отражение заходящего солнца в окнах Люксембургского дворца в Париже и с удивлением обнаружил, что два изображения имели различную яркость. Вращая кристалл, находящийся в его руках, так же как это делали мы на рис. 78, — действие совершенно естественное, если его интересовало вращение одного изображения вокруг другого, — Малус увидел, что изображения поочередно то делались ярче, то затухали. Совершенно то же наблюдается в опыте Гюйгенса, изображенном на рис. 78. Таким образом Малус обнаружил, что свет, отраженный от стекла, также имеет „стороны“. Он предложил термин, „поляризации“, для того чтобы отметить это свойство луча, подразумевая, что в данном случае, если смотреть вдоль луча, существует то же различие, какое имеет место между отдельными направлениями на шкале компаса: линия, соединяющая С и Ю, отличается от линии, соединяющей Э и В, или от другого направления. Это название нельзя считать удачным, потому что „поляриность“ есть скорее обозначение различия между двумя концами объекта; оно может относиться к копы, но не к пруту от занавески.

Нетрудно воспроизвести опыт Малуса (табл. XIV В). На фотографии кусок исландского шпата установлен таким образом, что обыкновенный и необыкновенный лучи располагаются в одной вертикальной плоскости. Кусок стекла помещен так, что отражение происходит в той же плоскости. На фотографии видно, что обыкновенный луч отражается, тогда как необыкновенный нет. Эти лучи имеют „стороны“.

Эти открытия были сделаны в эпоху, когда Юнг развивал свой принцип интерференции волн и пытался реабилитировать волновую теорию, бывшую тогда в тени. Философы этой эпохи были непоколебимыми приверженцами корпускулярной теории, базировавшейся на работах Ньютона, и Юнг столкнулся с сильной оппозицией. Открытие, сделанное Малусом, еще более увеличило его трудности, потому что он не представлял себе, каким

образом волны могут иметь „стороны“. Юнг не осознал еще тогда всех возможностей волновой теории. Он представлял, что световые колебания подобно звуковым происходят вдоль направления распространения системы волн. Его представление об этом явлении основывалось на том, что предполагаемое поведение тел вроде стали, стекла или воды подобно поведению шеренги мальчиков в опыте Тиндаля, а такие движения не имеют ничего такого, чему можно было бы приписать определенное направление поперек луча. Лишь много времени спустя Юнг увидел, что указанное затруднение может быть преодолено, если предположить, что световые волны — поперечные. Может показаться странным, когда говорят, что морские волны — поперечные; однако не вызывает сомнения, что если ограничить движение этих волн поверхностью воды, они прекратят свое существование. Это характерно для распространения волнового движения в воде. В свое время это было нелегко заметить. Аналогии иногда „подводят“ нас.

ПОПЕРЕЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЮНГА И ФРЕНЕЛЯ

Итак Юнг нашел наконец спасительный путь. В январе 1817 г. через девять лет после того, как Малус сделал свое открытие, он писал Араго:

„Я обсуждал также те трудности, которые возникают при попытке объяснить явление поляризации света без помощи остроумной волновой гипотезы“. Юнг считал возможным существование поперечных колебаний, распространяющихся в направлении луча, причем движение частиц совершается по отношению к лучу в некотором определенном направлении; это, добавляет он, „и есть поляризация“. Говоря это, он не думал о том, что движение частиц может быть только перпендикулярным, а не под любыми углами к направлению распространения светового луча. Но он сделал очень большой шаг вперед. Блестящий молодой французский инженер Френель понял огромное значение этой идеи и, продолжив ее, показал, что она может служить основой для теории, охватывающей все явления распространения света внутри кристаллов, включая двойное лучепреломление и поляризацию. Френель тогда только что развил теорию интерференции

света, не зная, что Юнг уже решил эту задачу в Англии; как только это ему стало известно, он тотчас принял точку зрения Юнга и стал ее горячим защитником. В 1816 г. он писал Юнгу: „В неудаче моего приоритета меня утешает сознание, что я встретил ученого, который обогатил науку огромным числом важнейших открытий и в то же время значительно укрепил меня в сознании правильности теории, принятой мной.“ Юнг ответил Френелю так же любезно. Доминирующее значение волновой теории в XIX в. конечно обязано прежде всего работам этих двух ученых.

После того как было установлено, что световые волны поперечные, дальнейшее развитие волновой теории шло беспрепятственно до конца столетия. Она развивалась, открывая постепенно огромное множество фактов из различных областей; и в конце концов теоретики и экспериментаторы пришли к выводу, что, пользуясь волновой теорией, можно объяснить самые сложные явления.

Если бы мы стали рассматривать все пути развития волновой теории света, то это отвлекло бы нас слишком далеко от нашей основной цели — дать общий очерк той роли, которую свет играет во вселенной. Кроме того многие исследования остались бы нам недоступными без математических вычислений и ссылок на другие теории, в частности, теории электричества и магнетизма. Однако мы вернемся к опытам Гюйгенса и посмотрим, как все трудности разрешаются при помощи представления о поперечной поляризации. В то же время мы увидим, как все эти вопросы связаны с представлением о кристаллическом строении вещества, получившим такое широкое развитие за последние годы. Прежде всего нам надо будет дать четкое определение терминам, которыми мы пользуемся. В поляризованном луче направление всех движений или колебаний параллельно одному определенному направлению, которое, конечно, перпендикулярно лучу. Морские волны можно назвать поляризованными, потому что в этом случае все колебания вертикальны и, следовательно, перпендикулярны горизонтальному направлению, в котором эти волны распространяются.

Нет необходимости представлять себе что-нибудь, движущееся в световом луче: достаточно понимать волно-

вое движение как последовательную смену возмущения и покоя.

Неполяризованный или нормальный луч не обладает никаким особым направлением колебаний, за исключением того, что все движения совершаются поперек направления луча. Большая часть лучей почти не поляризована, хотя часто некоторая поляризация появляется при отражении. Следует помнить, что глаз не может узнать, поляризован луч частично, или полностью, или вообще не поляризован.

Предположим теперь, что нормальный, или неполяризованный луч, попадая в кристалл, разделяется на два луча равной интенсивности, каждый из которых полностью поляризован, и что колебания в этих двух лучах происходят во взаимно перпендикулярных направлениях. Это согласуется с нашими опытами. Например, на табл. ХVА первоначальный луч содержал поперечные колебания всех направлений, тогда как два луча, выходящие из первого кристалла, следует считать поляризованными. Обыкновенный луч (на этой фотографии верхний, являющийся продолжением первоначального) входит во второй кристалл таким образом, что дальнейшего раздвоения не происходит.

Обыкновенный луч, выходящий из одного кристалла, остается таковым и во втором; все его колебания совершаются в соответствующем этому случаю направлении. Точно так же и необыкновенный луч продолжает оставаться необыкновенным. Но когда второй кристалл установлен, как показано на табл. ХV В, колебания каждого из двух лучей, выходящих из первого кристалла, совершаются в таких направлениях, что они не могут пройти сквозь второй кристалл так, как это сделал бы либо обыкновенный, либо необыкновенный луч. Каждый должен раздвоиться. На табл. ХVС обыкновенный луч, вышедший из первого кристалла, становится необыкновенным во втором кристалле, и наоборот, действие первого кристалла обратно действию второго. Если эта гипотеза справедлива, описанные факты должны каким-то образом являться следствием кристаллического строения вещества.

Каково же кристаллическое строение, вызывающее эти явления?

ПОЛЯРИЗАЦИЯ, ПОЛУЧАЮЩАЯСЯ ВСЛЕДСТВИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВЕЩЕСТВА

Основной факт заключается в особом расположении атомов кристалла, от которого зависят все его характерные свойства. Мы можем считать это свойство универсальным, потому что все твердые вещества стремятся принимать кристаллическую форму, и этот факт в действительности гораздо значительнее, чем это кажется с первого взгляда. Рентгеновские лучи позволяют значительно расширить наш кругозор в этом отношении. Атомы и молекулы, из которых построен кристалл, расположены в правильном порядке, по определенной системе, характерной для данного кристалла. Между куском стекла и кристаллом существует такая же разница, как между резинкой для стирания карандаша, с одной стороны, и шерстяной тканью или куском дерева — с другой. Различные свойства дерева, как-то: теплопроводность, сопротивление излому или растяжению, сжатие в течение года и другие подобные свойства — различны в различных направлениях.

В кристалле отдельные элементы структуры значительно мельче и незаметны для глаза; атомы и молекулы слишком малы, чтобы их можно было видеть. Что их расположение правильное, было предположено уже давно на основании того, что внешняя форма кристалла весьма совершенна и характерна для вещества; теперь рентгеновские лучи позволяют нам изучать кристаллические „решетки“ и относительное расположение в них атомов. Некоторые решетки чрезвычайно просты, например у каменной соли или алмаза. Эти вещества имеют настолько простую структуру, что специфические явления, которые мы связываем с ней, не проявляются заметно: для этого требуется большая сложность строения. Строеие исландского шпата достаточно сложно и носит такой характер, что это сильно сказывается в различных отношениях. Эти обстоятельства и правильная форма кристаллов, иногда довольно больших, являются причиной того интереса, который всегда вызывал шпат.

На рис. 82 изображена модель исландского шпата, построенная по данным рентгеновского анализа. Как и в каждом кристалле, здесь существует некоторая основ-

ная ячейка, и наша модель включает несколько таких ячеек или их частей. В каждой ячейке имеется один атом кальция, один — углерода и три — кислорода. Модель имеет ту же форму, что и кусок шпата на рис 77; этого следовало ожидать, потому что в действительности любой

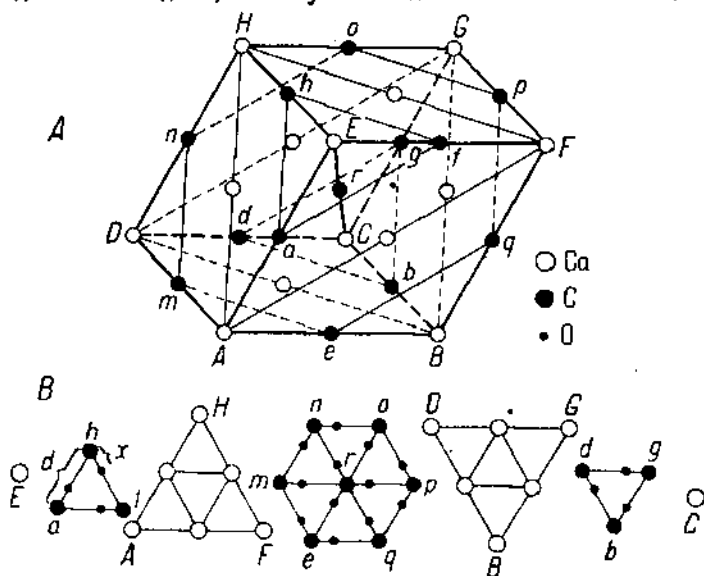


Рис. 82. Рисунок А изображает расположение атомов, из которых состоит исландский шпат CaCO_3 . Белые кружки представляют атомы кальция, а черные — углерода. На этом рисунке для простоты не нарисованы атомы кислорода. Расположение атомов в ряде слоев, перпендикулярных главной оси ЕС, показано на рисунках В. На них кислород изображен маленькими черными точками. Рисунки показывают только относительное расположение атомов. Расстояние между смежными слоями В равно 2,79 А, т. е. примерно трем стомиллионным долям сантиметра. Размеры и форма атомов не показаны на рисунке, так как их определить значительно труднее, чем относительное положение центров атомов

осколок кристалла является многократно повторенной основной ячейкой. На рис. 82 В показаны также различные сечения модели. Эти сечения перпендикулярны линии ЕС и показывают расположение атомов в ряде последовательных слоев: в первом — кальциевом, втором, — содержащем только группы CO_3 , которые представляют атомы углерода, связанные с тремя симметрично расположенными вокруг них атомами кислорода, и т. д. Группа CO_3 видна более отчетливо в точке г на чертеже

среднего слоя. Второе и шестое сечения видны лишь частично. Если мы разрежем кристалл плоскостью, перпендикулярной EC , то такое сечение будет обладать определенной симметрией: оно напоминает проволочное сплетение с шестиугольными ячейками. Направление EC называют осью кристалла, потому что относительно этой линии имеет место симметрия. В опытах симметрия такого сечения кристалла сейчас же сказывается. Так например, кристаллограф Сенармон много лет назад производил измерения теплопроводности кварца с помощью особого устройства. Кварц, так же как и исландский шпат, принадлежит к классу кристаллов, обладающих одной осью симметрии, и поэтому у них многие физические свойства сходны. Сенармон вырезал кварцевую пластинку перпендикулярно оси и высверлил в центре ее отверстие. Пластинка была покрыта тонким слоем белого воска. Проволока, пропущенная через отверстие, нагревалась электрическим током и воск плавился. Сенармон обнаружил, что следы плавления имели круглую форму, говорящую о равномерном распространении тепла во все стороны от проволоки. В то же время, когда он вырезал пластинку не перпендикулярно оси, след плавления уже был не круглым, а овальным. Наибольшее отклонение от круглой формы имело место в плоскости, проходящей через ось. Этот опыт показывает, что теплопроводность имеет наибольшую величину вдоль оси, и наименьшую — в направлении, перпендикулярном ей. В остальных направлениях теплопроводность имеет промежуточное значение.

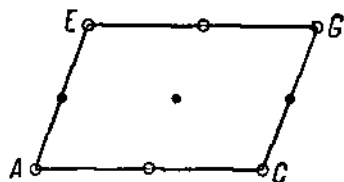


Рис. 83. Расположение атомов исландского шпата в плоскости $EACB$ (рис. 82), соответствующей сечению $OSTR$ рис. 77.

Даже при таком сложном расположении атомов, какое мы имеем в исландском шпате, заметно, насколько большей симметрией обладает сечение, перпендикулярное оси, по сравнению с сечением, проходящим через нее. Расположение атомов кальция и углерода в плоскости, проходящей через ось, показано на рис. 83. Здесь нет шестиугольной (гексагональной) симметрии, хорошо заметной на рис. 82.

Таким образом особая структура кристалла исландского шпата, так же как и большинства кристаллов, сказывается на его физических свойствах и делает их зависящими от направления внутри кристалла. Мы видели это на примере распространения тепла. Когда в веществе распространяется свет, то проходящие колебания, хотя мы и относим их к эфиру, все же связаны с самим веществом. Мы можем поэтому ожидать, что скорость света, проходящего сквозь кристалл, должна зависеть от расположения направлений колебаний относительно особых направлений в кристалле. Все колебания, перпендикулярные оси кристалла, должны быть вполне подобны друг другу, как и в случае распространения тепла. Соответственно этому все лучи, колебания которых перпендикулярны оси, должны распространяться с одной и той же скоростью. Эти лучи Гюйгенс назвал обыкновенными. Все остальные распространяются с иной скоростью и составляют необыкновенные лучи.

Но когда какой-нибудь луч входит в кристалл, то вначале его колебания совершаются во всех направлениях, перпендикулярных направлению его распространения. Почему же происходит разделение лучей, в результате которого в кристалле оказывается только два направления колебаний, одно из которых, перпендикулярное оси, является обыкновенным лучом, а другое — необыкновенным?

Ответ на этот вопрос заключается в общем свойстве распределения энергии колебаний. Мы познакомимся с этим свойством на примере колебаний стального стержня. Предположим сначала, что стержень имеет круглое сечение. Если его держать в центре и ударить по одному из концов, он начнет изгибаться взад и вперед в некоторых пределах и издавать соответствующую ноту. При этом неважно, в каком месте его ударили. Но если стержень имеет эллиптическое сечение, происходящее явление сложнее. Если мы ударим его по плоской стороне эллипса в P (рис. 84), он колеблется медленнее, чем если удар пришелся в перпендикулярном направлении в точке Q ; издаваемый стержнем тон в первом случае ниже, чем во втором. Предположим теперь, что мы ударим стержень в точке R . Он не звучит тоном, средним между теми, которые получаются при возбуждении в точ-

ках P и Q ; вместо этого стержень издает одновременно оба звука. Это чрезвычайно важное свойство. Энергия колебаний, сообщенная при ударе в точке R , сейчас же разделяется на две части, одна из которых идет на медленные колебания, другая — на более быстрые. Если

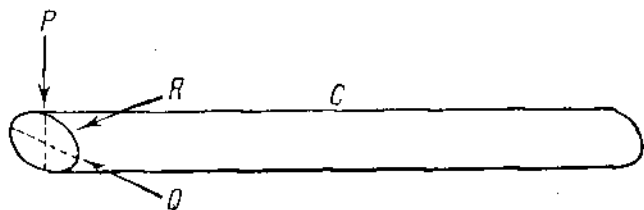


Рис. 84. Стальной стержень, имеющий эллиптическое сечение, издает более высокую ноту, когда его ударяют в точке Q , чем когда его ударяют в точке P , которая находится на плоской стороне. Когда стержень ударяют в точке R , он издает одновременно две ноты, высокую — ту, которую он издает при возбуждении в Q , и низкую — соответствующую точке P , а не промежуточный тон

точка R расположена к P ближе, чем к Q , медленные колебания будут более интенсивными, и наоборот.

Звук, происходящий при ударе по стержню, получается в результате правильных изменений его формы, заставляющих воздух сжиматься; эти сжатия и являются звуковыми волнами. Само изменение формы заключается в периодичном изгибании стержня между двумя положениями, показанными на рис. 85. Более низкая нота соответствует удару в точке P , потому что стержень изгибается в этом направлении легче. Изменение

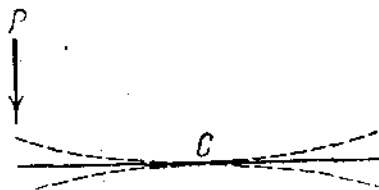


Рис. 85. Колебющийся стержень рис. 84 принимает попеременно формы, показанные пунктирными линиями

формы можно рассматривать так же, как импульс, двигающийся вдоль стержня. Он получается в результате толчка и распространяется со скоростью, зависящей, с одной стороны, от твердости материала стержня и, с другой — от того, насколько он массивен. Дойдя до конца стержня, этот импульс отражается. Такое описание возмущения эквивалентно первому, если принимать в рас-

чёт сложные явления отражений на концах стержня, которые в данном случае гораздо сложнее, чем в случае звучащей струны. Если бы стержень имел бесконечную длину, импульсы, вызванные ударом, бежали бы вдоль него и никогда не возвращались обратно и никакого звука не было бы. Один импульс, именно тот, который возникает при ударе в точке P , будет двигаться при этом медленнее, чем тот, который возникает при ударе в точке Q .

Поэтому первый должен отставать от второго.

Свет, проходящий внутри кристалла, обладает аналогичным свойством. В световом луче колебания происходят в одном из двух или в обоих направлениях, перпендикулярных друг другу; кристалл обладает свойством, аналогичным твердости стержня, так что два отдельных колебания распространяются в нем с различными скоростями и одно из них опережает другое. В исландском шпате „твердость“ оказывается наименьшей для колебаний, перпендикулярных оси, и одинакова для всех таких колебаний, точно так же, как теплопроводность оказалась одинаковой во всех направлениях в опыте Сенармона. Соответственно этому наименьшая „твердость“ будет иметь место для одного из колебаний луча, распространяющегося в произвольном направлении, именно в том, которое перпендикулярно оси. Например, на рис. 77 оно перпендикулярно плоскости чертежа. То колебание, которому соответствует наибольшая „твердость“, должно быть перпендикулярно первому, как и в случае стержня. Если оно оказывается при этом параллельным оси кристалла, распространение его происходит с наибольшей возможной внутри кристалла скоростью; чем ближе направление этого колебания к направлению оси, тем быстрее оно распространяется. Вот почему поверхность, по которой оно распространяется, является сфероидом с осью, совпадающей с осью кристалла. Первое колебание перемещается с одной и той же скоростью, независимо от направления луча, и поэтому его распространение можно описывать сферами. Таким образом проблему Гюйгенса можно считать разрешенной в том смысле, что теперь мы можем объяснить происходящих явлений с помощью механических аналогий или известных физических законов.

ПРИЗМА НИКОЛЯ

Опыты с поляризованным светом значительно упростились после того, как Вильямс Николь придумал следующий прибор. Кусок исландского шпата разрезают на две части, которые затем склеивают канадским бальзамом, разрез делают по линии BD (рис. 86). Скорость света в бальзаме больше, чем скорость обыкновенного луча в шпате, и свет подчиняется в нем обычным законам преломления; но для необыкновенного луча скорость

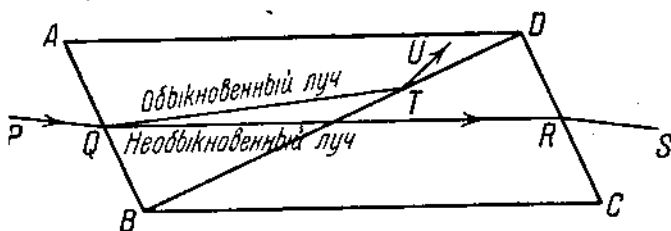


Рис. 86. Кусок исландского шпата разрезают на две части и склеивают канадским бальзамом. Разрез располагают по отношению к естественной форме кристалла таким образом, чтобы только один из двух лучей, на которые разделяется падающий лучок, мог пройти сквозом

света в бальзаме меньше, чем в шпате. В бальзаме оба луча распространяются с одинаковой скоростью; поляризация не влияет на скорость света в каком-нибудь веществе. Только в кристаллах эта скорость зависит от направления колебаний по отношению к собственной форме кристалла. В остроумном устройстве, представленном на рис. 86, обыкновенный луч встречает канадский бальзам под таким углом, что он испытывает полное внутреннее отражение (рис. 45), тогда как другой проходит через бальзам. Таким образом в призме Николя половина энергии падающего луча поглощается оправой призмы, тогда как остальная часть выходит в виде поляризованного света. Хорошие кристаллы исландского шпата встречаются редко, и поэтому большие николевы призмы довольно дороги.

Если, как представлено на рис. 87, луч света пропустить через два „николя“, расположенные один за другим, то интенсивность проходящего света зависит от

взаимного расположения призм. Если первая пропускает световые колебания, лежащие, скажем, в плоскости чертежа, и если вторая призма пропускает также эти колебания, то свет проходит ее без дальнейшего ослабления. Но если вторую призму повернуть на 90° , то она пол-

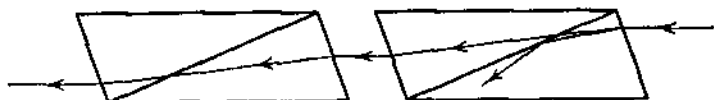


Рис. 87. Две призмы Николя расположены одинаково. Первая разделяет падающий свет на две части, одну из которых пропускает; вторая не делит луч дальше и пропускает свет, прошедший сквозь первую призму. Если вторую призму повернуть на 90° вокруг горизонтальной оси, вся система становится непрозрачной

ностью поглощает поляризованный свет, падающий на нее, и вся система становится непрозрачной. Это явление показано на photographиях А и В табл. XVI.

При помощи „николя“ можно значительно проще, чем прежде, показать поляризацию света, отраженного от поверхности прозрачного тела:

Пучок поляризованного света падает на стеклянную пластинку G (рис. 88). Затем николю постепенно поворачи-

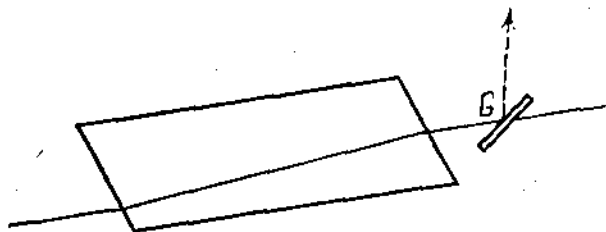
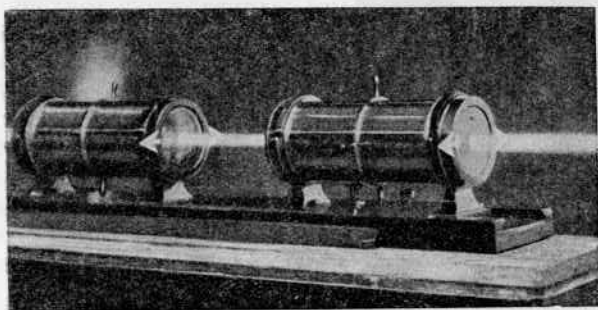
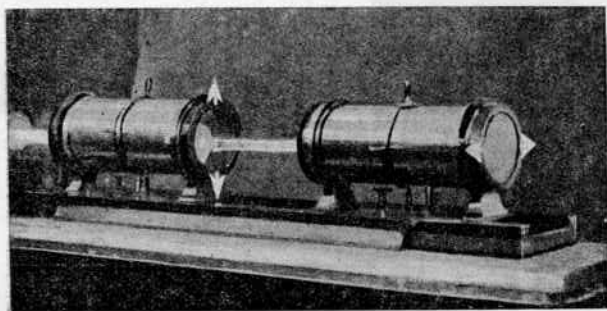


Рис. 88. Поляризованный луч, встречающий стекло, отражается слабо: почти весь свет проходит сквозь. Но если стекло или николю повернуть вокруг направления луча на 90° , отражение становится ярким. В этом заключается опыт Малюса

вают вокруг его оси и при этом заметно, что, когда главное сечение его находится в плоскости рис. 88, отражение сильно ослабляется; когда же николю поворачивают на 90° , отражение делается ярким. Согласно нашим представлениям о том, каким образом происходит поляризация внутри кристалла, это явление говорит за то, что



А



В

Луч света, вышедший из одной призмы Николя, проходит сквозь вторую, если они обе установлены параллельно. Белые стрелки, прикрепленные к призмам, отмечают положение главной плоскости каждого кристалла. Луч не проходит сквозь вторую призму, когда она установлена перпендикулярно первой. Пучки сделаны видимыми при помощи дыма (стр. 160).

Дуговые
спектры

фиолетовый голубой зеленый

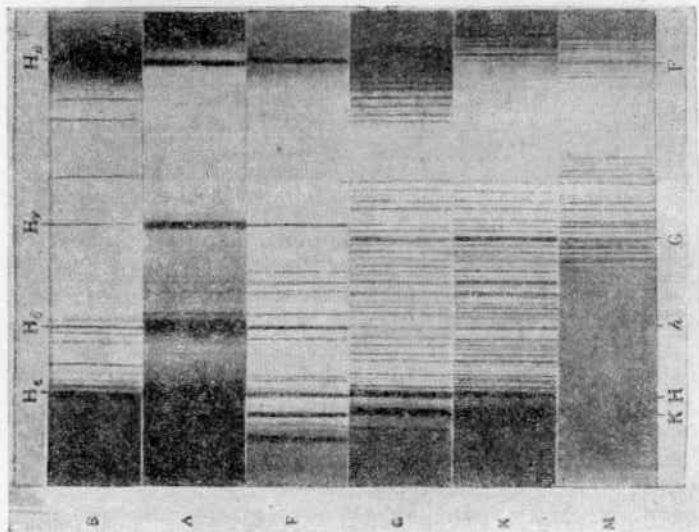
железо

магний

кальций

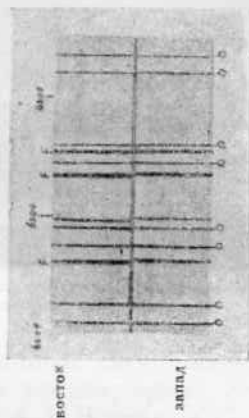
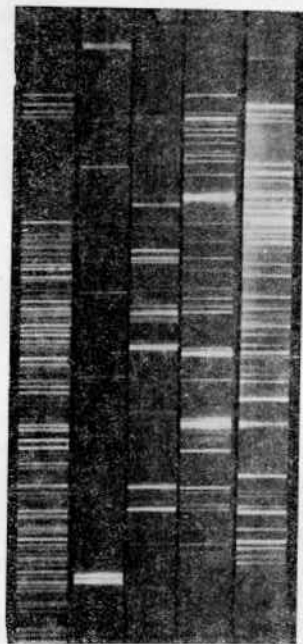
стронций

барий



А. Несколько звездных спектров, на которых заметно, что максимум интенсивности излучения смещается при переходе от горячих белых звезд класса S , представителями которых являются Процион и Канопус, к более холодным красным звездам класса M , к которому принадлежат Антарес и Бетельгейзе (стр. 173).

В. Спектры светящихся паров различных элементов в вольтовой дуге (А. Фаулер) (стр. 176).



С. Явление Доплера, обнаруживаемое при сравнении спектров приближающегося и удаляющегося Красновозмца. На обеих фотографических совмещены «теллурические» линии, принадлежащие кислороду земной атмосферы; при этом линии железа в солнечном спектре не совпадают (стр. 180).

свет отражается лучше всего, когда колебания параллельны поверхности стекла (см. также табл. XIV В). Стекла́нная пластинка должна при этом составлять с лучом угол около 35° . Мы повторяем таким образом опыт Малуса.

Так как свет, отраженный от поверхности прозрачных тел, всегда в большей или меньшей степени поляризован, то отражение от поверхности моря или вообще от поверхности воды должно также вызывать поляризацию, встречающуюся довольно часто. Мы должны помнить однако, что глаз не обнаруживает поляризации, поэтому необходимо пользоваться поляризационными приборами вроде призмы Николя или стеклянной пластинки, установленной под соответствующим углом.

Находясь в определенном положении относительно картины, можно устранить мешающие отражения в стекле последней, если смотреть сквозь никелеву призму, вращая ее до тех пор, пока „отсвечивание“ не исчезнет. Это можно сделать, потому что отраженный свет поляризован. Однако это получается только при определенном положении наблюдателя, и поэтому указанное средство не всегда может быть полезным посетителю картинной галлерей. Таким же образом можно в некоторых случаях избавиться от света, отраженного поверхностью моря, и посмотреть вглубь; этот способ применяют наблюдатели на самолетах, но и в этом случае применимость указанного метода зависит от положения наблюдателя.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА НЕБА

Существует очень интересный случай естественной поляризации света; мы имеем в виду свет неба. Этот случай интересен для нас, во-первых, тем, что он лишний раз показывает нам могущество волновой теории света в объяснении явлений природы, и, во-вторых, тем, что его экспериментальное исследование было весьма остроумным и привело к некоторым очень красивым демонстрациям.

Поляризацию света неба легко наблюдать при помощи призмы Николя (рис. 89). Предположим, что в S находится солнце, в P — рассеивающая частица и в O — глаз наблюдателя. Если призму держать таким образом, чтобы

плоскость ее главного сечения проходила через SP и PO , то небо кажется темным. Но если призму повернуть вокруг оси на 90° , оно становится светлым. Тот же опыт можно, конечно, сделать и со стеклянной пластинкой, но не с серебряным зеркалом. Если пластинку расположить так, как показано на рис. 90, глаз, помещенный в E , уви-

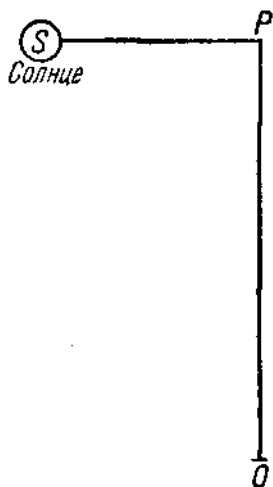


Рис. 89. Наблюдатель, находящийся в O , смотрит на небо в направлении OP . Когда он помещает перед глазом николю, расположенный таким образом, что его главная плоскость $ABCD$ на рис. 86 совпадает с плоскостью SPS , проходящей через OP и линию, соединяющую наблюдателя с Солнцем S , то небо кажется темным. Если призму повернуть вокруг ее оси на 90° , небо становится светлым

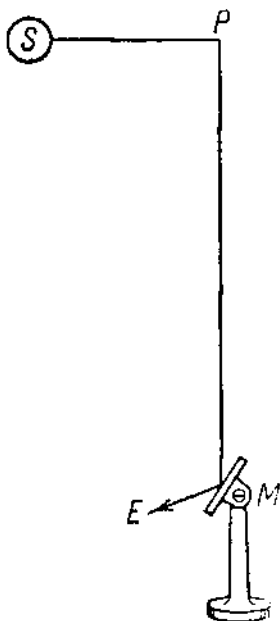


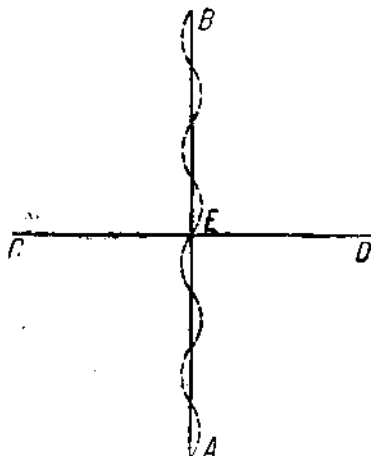
Рис. 90. Вместо николя можно воспользоваться неиспользованным стеклянной пластинкой M , как на табл. XIV В, отражающей свет в глаз, помещенный в E . При том расположении, которое показано на рисунке, видно более яркое отражение неба, чем если пластинку повернуть вокруг линии PM и производить наблюдение в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа

дит отражение неба в M ; но если штатив с пластинкой повернуть на 90° так, чтобы ее плоскость смотрела на нас, отражение потемнеет.

Мы считали, что световые колебания, проходящие сквозь призму Николя, происходят в главной плоскости последней. Таким образом колебания волн, рассеянных

частицей P в направлении стеклянной пластинки или глаза, на наших рисунках перпендикулярны плоскости чертежа. Аналогия поможет нам убедиться, что это следует из волновой теории.

Представим себе два каната в 5 или 10 м длиной, связанных посередине и натянутых не очень сильно четырьмя людьми, каждый из которых держит один конец (рис. 91). Человек A посылает вдоль каната в направлении AE ряд импульсов. Если колебания происходят вверх и вниз в вертикальном направлении, то, когда они приходят в E , узел в этой точке начинает совершать вертикальные движения, и колебания распространяются вдоль EC и ED , так же как и вдоль EB . Если же колебания, совершаемые канатом в точке A , происходят из стороны в сторону, как показано на рис. 91 пунктирной линией, то движение не передается частям EC и ED , потому что узел E не может двигаться так, чтобы появились поперечные колебания, бегущие вдоль EC



и ED , если только первоначальные колебания в точке A не имеют вертикальной составляющей. Если же первоначальные колебания имеют вертикальную составляющую, то движение частично пройдет узел E и передастся части EB , и импульсы, посланные из точки A , дойдут до B , как продолжение поперечных колебаний, бегущих вдоль AE . В реальном явлении, конечно, ничто не соответствует трудности прохождения точки E , которая имеет место в примере с канатами. Свет от A во всех случаях беспрепятственно проходит через точку E .

Рис. 91. Два каната связаны в E и все четыре конца закреплены. Когда в точке A возникает колебание проходящее в плоскости чертежа, показанное волнистой линией, оно приводит в движение часть BE , но не EC и не ED ; если же колебание перпендикулярно плоскости чертежа, EC и ED придут в движение, так же как и EB .

Цель нашего опыта заключается в том, чтобы пока-

зять явление, аналогичное рассеянию света мелкими частицами вроде молекул воздуха. Колебания, бегущие вдоль AE , рассеиваются вдоль EC или ED , только если они перпендикулярны этим направлениям, но не тогда, когда они параллельны им. В промежуточных случаях вдоль EC и ED происходит частичное рассеяние.

Рассмотрим теперь случай, изображенный на рис. 90. Световые волны исходят от Солнца S и движутся вдоль SP . Если их колебания происходят в плоскости чертежа, они не могут вызвать световых колебаний, бегущих вдоль PM ; это соответствует первому случаю рис. 91. Но если эти колебания перпендикулярны плоскости чертежа, то они в состоянии при встрече с рассеивающей частицей P вызвать распространение поперечных волн вдоль PM , так же как и в случае с канатами. Свет солнца, падающий в направлении SP , состоит из поперечных волн всех направлений, но свет, идущий вдоль PM , должен содержать только те колебания, которые перпендикулярны плоскости чертежа. Таким образом оказывается, что свет неба поляризован.

Это явление можно показать на нескольких красивых опытах. Свет фонаря поляризуют при помощи призмы Николя и затем отражают посеребренным зеркалом M , установленным таким образом, чтобы отраженный пучок направился вниз в сосуд J (рис. 92). Луч, отраженный зеркалом, также поляризован. Предположим, например, что световые колебания по выходе из призмы совершаются в горизонтальной плоскости и следовательно перпендикулярны плоскости чертежа, тогда они сохраняют свое направление и внутри сосуда. Наполним сосуд водой, к которой примешано небольшое количество смолы; последняя взвешена в виде очень мелких частиц, рассеивающих свет. В данном случае это рассеяние оказывается не одинаковым в различных направлениях. Глазу, помещенному в точке E в плоскости чертежа, сосуд виден светящимся; но если наблюдатель встанет около сосуда так, чтобы видеть его с той стороны, с которой мы рассматриваем его на рисунке, сосуд оказывается темным. Такое же изменение будет иметь место, если наблюдатель останется на месте, а николь будет повернут. Если вокруг сосуда находится несколько наблюдателей, он кажется светлым некоторым из них и темным—остальным.

Этот поразительный опыт в несколько измененном виде необычайно красив. В сосуде растворяют некоторое количество сахара. Последний, как и многие другие вещества, оказывает любопытное действие на поляризованный свет, проходящий сквозь него, независимо от того, находится ли он в твердом состоянии или растворен. Направление световых колебаний меняется вдоль пути света, вращаясь вокруг него наподобие винта. Когда свет входит в раствор сахара, колебания расположены, скажем,

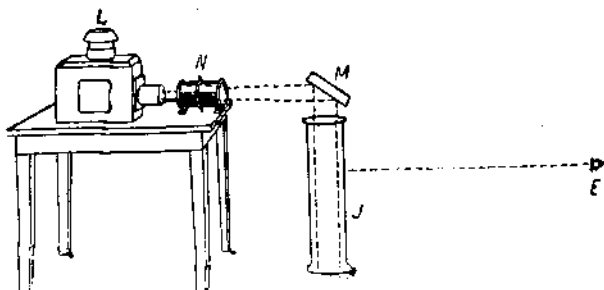


Рис. 92. Свет фонаря L поляризуют призмой Николя N и отражают зеркалом M в высокий сосуд J , наполненный жидкостью, содержащей во взвешенном виде мелкие крупинки вещества. Интенсивность рассеянного света, как объяснено в тексте, зависит от направления, в котором производится наблюдение

перпендикулярно плоскости чертежа (рис. 92). По мере прохождения света вглубь сосуда, колебания меняют свое направление и на некоторой глубине оказывается, что они совпадают с плоскостью чертежа. При этом глаз больше не видит рассеянного света. Несколько ниже глаз, расположенный в E , опять видит свет. Эти изменения происходят через промежутки, величина которых зависит от длины волны, а именно: в синем свете вращение происходит быстрее, чем в красном. В результате этого сосуд кажется наполненным великолепными красками, насыщенность которых возрастает сверху вниз. Можно заставить эти цвета наполнять весь сосуд сверху донизу, если поместить на пути света между призмой и сосудом кварцевую пластинку. Такая пластинка, вырезанная перпендикулярно оси кристалла, вызывает вращение направления колебаний подобно сахару, и поэтому, если мы ее введем, то различные длины волн будут разделены уже при входе в сосуд.

Глава VII.

СВЕТ СОЛНЦА И ЗВЕЗД

Мы видим звезды яркими точками, движущимися вместе по небу. Уже давно астрономы доказали, что это указывает скорее на вращение Земли, чем на движение самих звезд. Очень тщательные наблюдения показывают, что перемещение звезд друг относительно друга также имеет место, но оно настолько мало, что созвездия можно считать практически неизменившимися с тех пор, как человек впервые сумел описать их. За последние сто лет сильно выросло могущество средств, позволяющих нам расшифровывать сведения, доставляемые светом. Теперь мы почти „дотрагиваемся“ до звезд. Они уже не являются для нас хаосом ярких точек, неправильно разбросанных по небу; и даже не рассеянными в пространстве солнцами, излучающими подобно нашему Солнцу. Они стали для нас элементами вселенной, небольшую часть которой составляет наше солнечная система. Мы можем теперь измерять их расстояния, определять их вес, яркость, состав, движения и даже определять их прошлое и предсказывать их будущее. Мир наших знаний и ощущений внезапно расширился, и мы начали понимать его величайшие законы.

Самая старая наука — астрономия — занималась в давнопрошедшие времена почти исключительно наблюдениями положений небесных светил. Свет при этом служил только средством для измерения углов и для установления видимых движений Солнца, Луны и звезд на небесной сфере. Огромный рост астрономических знаний в последнем столетии начался лишь после того, как стали изучать самый свет, а не только то направление, по которому он приходит. Состав солнечного света и его интенсивность характеризуют природу этого светила и физические условия,

имеющие место на нем; их изучение дает нам новые средства исследования и в то же время открывает новые возможности применения тех средств, которыми мы пользовались в течение многих веков.

РАССТОЯНИЯ ЗВЕЗД

Попытки измерять расстояния в пространстве делались с давних времен. Такие измерения чрезвычайно интересны и важны, ибо вполне естественное удивление вызывает тот факт, что звезды являются не просто яркими точками на небесной сфере, в центре которой находится Земля, но телами, соперничающими с Солнцем по величине, температуре и другим качествам, причем они рассеяны по безграничному пространству, а не сосредоточены в тонком слое небесной сферы. Определение расстояний было поэтому одной из первых задач астрономии, и до сих пор эта задача остается одной из труднейших.

Прежде чем измерять расстояния, необходимо выбрать единицу длины. Всякое измерение длины является сравнением с какой-нибудь стандартной единицей, и последняя должна быть у астронома всегда под рукой. Металлические стержни, тщательно изготовленные и сохраняемые с крайней осторожностью правительственными учреждениями различных стран, служат основой всех измерений длины; из них эталоном метра пользуются наиболее часто, тогда как остальными теперь не пользуются почти совсем. Исходя из этих единиц, астроном проделывает длинный путь, прежде чем он приходит к измерению огромных расстояний до звезд. Этот путь состоит из отдельных стадий, каждая из которых заключается в выражении некоторого определенного расстояния в принятых единицах, причем каждое такое расстояние должно быть, по крайней мере, в 1000 раз больше, чем измеренное в предыдущей стадии.

Прежде всего астроном измеряет, сколько раз единица длины содержится в линии в несколько километров длиной, расположенной на поверхности Земли в направлении с севера на юг. На обоих концах этой линии астроном устанавливает телескопы и измеряет разность широт. Для этого он может, например, выбрать звезду, которая

в некоторый момент находится в плоскости меридиана. В этот момент обе обсерватории измеряют высоту звезды над горизонтом в градусах. Разность этих двух углов определяет разность широт. Если бы Земля была плоской, эта разность равнялась бы нулю, потому что направление горизонта в обоих пунктах было бы одинаковым, а звезда —

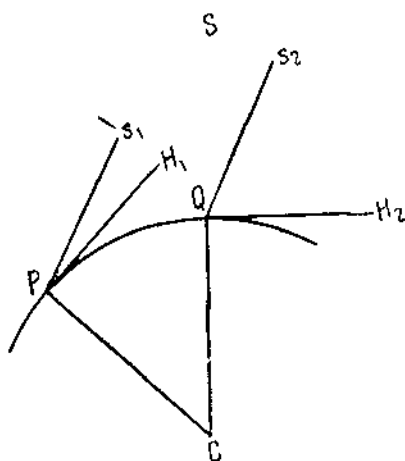


Рис. 93. Наблюдатель в точке P видит горизонт в направлении PH_1 . Угол S_1PH_1 есть угловая высота звезды S над горизонтом. Угол S_2QH_2 — угловая высота той же звезды, наблюдаемой в пункте Q . Разность этих углов равна углу PCQ , который является разностью широт пунктов P и Q .

очень удалена. В действительности разность высот зависит от кривизны Земли, и знание этой разности позволяет определить кривизну.

Таким образом, если P и Q (рис. 93) — две точки на поверхности Земли, PS_1 и QS_2 — две линии, направленные к звезде S , практически параллельные между собой, и если PH_1 и QH_2 — горизонтальные направления в пунктах P и Q , то разность между двумя измеренными углами S_1PH_1 и S_2QH_2 равна углу между PH_1 и QH_2 ; последний же равен

углу между двумя радиусами Земли, проведенными из точек P и Q в центр Земли C . Зная длину дуги PQ и угол PCQ , можно определить радиус Земли PC . Земля не вполне круга: она является сфероидом, а не шаром. Полярный радиус составляет почти точно 6360 км, тогда как экваториальный на 21 км больше.

После этого можно сделать следующий шаг: сама Земля становится теперь базой для дальнейших измерений, потому что ее форма известна, и расстояние между любыми двумя точками на ее поверхности может быть найдено из измерений широт и долгот, которые производятся с помощью только телескопа и часов; без всякого участия метровой линейки.

При измерениях мы пользуемся телескопом — инструментом весьма точным. Он является не просто увеличительным прибором, которым большинство из нас привыкло пользоваться. Астроному телескоп дает гораздо больше. Как объяснялось в гл. II, объектив образует изображение некоторой части неба в фокусе. Там же помещают систему тонких проволочек или нитей так, что глаз видит их с помощью окуляра вместе с изображениями звезд. Телескоп двигают до тех пор, пока звезда или какой-нибудь другой объект не совпадут с одной из этих нитей. Если затем перемещать телескоп до совпадения с той же нитью изображения другой звезды, величину смещения можно очень точно измерить при помощи приделанных к телескопу кругов, разделенных на градусы. Можно телескоп оставить неподвижным и наблюдать совпадение с нитью звезды, попадающей в поле зрения в результате видимого (суточного) движения небесного свода, при этом в расчеты входит время обращения Земли вокруг ее оси. Такие измерения развивались в течение веков и достигли теперь высокой степени совершенства, охватывая постепенно все более и более удаленные объекты.

Следующий шаг заключается в измерении расстояний Луны и Солнца; последнее расстояние необходимо знать для дальнейшего продвижения вперед. Если момент, в который Луна проходит мимо определенной точки на небе, например, мимо звезды или края Солнца во время затмения, наблюдать из двух пунктов на земной поверхности, то оказывается возможным вычислить расстояние Луны от Земли. Такие измерения дают в результате скорость движения Луны, так же как скорость автомобиля может быть найдена из наблюдений двух полисменов, находящихся на известном расстоянии друг от друга.

На рис. 94 линии PM_1 и QM_2 параллельны друг другу лишь приблизительно, но их можно принять параллельными без сколько-нибудь значительной ошибки и, следовательно, M_1M_2 равно PQ — некоторому известному расстоянию на поверхности Земли. Это позволяет найти скорость движения Луны, а т. к. время обращения ее вокруг Земли известно, то отсюда можно вычислить радиус лунной орбиты (рис. 94).

Почти так же, хотя при этом вычисления производят

несколько косвенным путем, находят расстояние от Земли до Солнца из наблюдений прохождения по солнечному диску Венеры или Эроса; наблюдатели, находящиеся на известном расстоянии друг от друга, отмечают моменты, когда планета касается края солнечного диска. Эти моменты различаются весьма мало, и даже если наблюдатели ведут свои наблюдения на противоположных концах Земли, эта разница не превышает пяти минут.

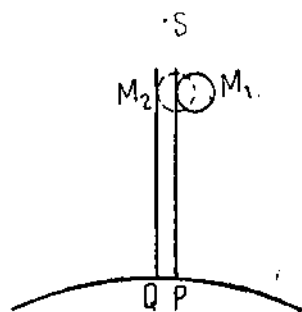


Рис. 94. Наблюдателю в пункте P звезда S кажется «покрытой» Луной, когда последняя находится в положении M_1 ; в Q «покрытие» наступает, когда Луна находится в M_2 . Расстояние M_1M_2 равно известному расстоянию PQ . Отсюда находят скорость Луны

Таким образом был измерен радиус земной орбиты, оказавшийся равным приблизительно 150 млн. км. Астроном получил в распоряжение базу, с помощью которой он наконец проник в звездные пространства.

Роль этой базы в определении относительных движений Земли и звезд была известна еще задолго до того, как с ее помощью могли быть сделаны какие-нибудь измерения. Пользуясь простой аналогией, которой мы обязаны Джинсу¹, мы можем сказать, что как ребенок на качели видит близкие предметы, окружающие его,

движущимися вперед и назад относительно более далеких, так и наблюдатели на Земле также должны видеть некоторые из звезд движущимися по отношению к другим, и такое движение должно иметь место все время, пока Земля вращается на своей орбите вокруг Солнца. Это движение не удавалось обнаружить до 1838 г., потому что оно, будучи крайне малым, находилось за пределами возможностей недостаточно совершенных инструментов. В 1838 г. удалось обнаружить смещения трех звезд — β Лебеда, α Центавра и α Лирь — относительно соседних. Существование этих смещений, несмотря на их малую величину, не вызвало никаких сомнений. Звезды настолько далеки, что их свет летит несколько

¹ Имеется русский перевод: Джинс, «Вселенная вокруг нас», Г. Т. Т. И., 1932.

лет, пока он достигнет Земли; например, в случае *α* Центавра, это время составляет 4,31 года. Огромная величина этого расстояния станет понятнее, если это время сравнить с 500 сек., в течение которых свет проходит 150 млн. км, отделяющих Солнце от Земли.

Лишь расстояния немногих ближайших звезд могут быть найдены таким путем. Остальные звезды удалены настолько, что сильнейшие телескопы не позволяют обнаружить разницы в их положениях при наблюдении с противоположных точек земной орбиты. Удивительно, что и об этих сравнительно „близких“ звездах известно так много, потому что они находятся от нас в миллион раз дальше, чем ближайшие планеты. Астрономы выражают их расстояния в „световых годах“.

СКОРОСТЬ СВЕТА

До сих пор мы не рассматривали численной величины скорости света, так как ни одно из тех явлений, с которыми мы встречались, не зависело от этой величины. Теперь мы должны составить некоторое представление о скорости света, если хотим, чтобы термин „световой год“ имел определенный смысл.

Время, необходимое свету для прохождения расстояний на Земле, настолько мало, что оно может быть обнаружено только весьма чувствительными приборами. Попытки Галилея заметить это время окончились неудачей. Неудивительно, что первые измерения, показавшие, что свет распространяется не бесконечно быстро, касались времени прохождения светом диаметра земной орбиты, равного 300 млн. км.

В конце XVII в. Олаф Ремер наблюдал в Париже затмения спутников Юпитера. Из своих наблюдений он вычислил среднее время обращения каждого спутника. При этом он обнаружил, что когда Земля и Юпитер находятся на наименьшем расстоянии друг от друга, затмения происходят почти на 8 мин. раньше момента, вычисленного из среднего периода обращения. Когда же обе планеты находятся на наибольшем возможном расстоянии, затмения настолько же запаздывают. Ремер правильно заключил, что эти отклонения от вычисленных средних моментов затмений получаются в резуль-

тате того, что свет затрачивает на прохождение через орбиту Земли некоторое время. Можно привести простой пример. Предположим, что деловой человек в Англии еженедельно получает письма из Австралии, доставляемые ему, где бы он ни находился. Если он постоянно разъезжает между Лондоном и Дублином, он будет получать свои письма раньше, когда они приходят к нему в Лондон, и с некоторым запозданием, когда он получает их в Дублине. Разница между временем доставки письма в Дублин и Лондон, очевидно, равна времени, в течение которого почта идет от Лондона до Дублина. Следовательно, раз свет затрачивает на прохождение диаметра земной орбиты около 1 000 сек., то, так как это расстояние составляет 300 млн. км, скорость света получается отсюда равной 300 000 км в секунду. Существуют другие способы определения этой скорости, и теперь она известна с большей точностью. Скорость света есть скорость распространения всех волн в эфире; в прозрачных телах, как например, в стекле и воде, она несколько меньше, а в воздухе почти равна скорости в эфире. Часто указывают, что при передаче концерта по радио слушатели далеких стран принимают эфирные волны раньше, чем звуковые волны доходят до последних рядов концертного зала, из которого ведется трансляция.

При измерениях видимых расстояний между звездами светом пользуются только для определения направлений. Свет служил для этой цели в течение тысячелетий и особенно успешно после того, как Галилей впервые применил для астрономических наблюдений телескоп. По мере того как телескоп совершенствовался, точность измерений углов увеличивалась, и ценность их возрастала. С другой стороны, вместе с изучением состава света, испускаемого звездами, возникла совершенно новая наука, позволяющая делать выводы относительно природы и движения этих светил.

АНАЛИЗ СВЕТА ЗВЕЗД

Первый шаг в направлении изучения света звезд мы можем сделать, разлагая свет призмой или дифракционной решеткой. В обоих случаях мы увидим одни и те же спектральные цвета от красного до фиолетового, ибо

наш глаз вообще может видеть только эту часть сложного излучения звезд. Однако различные части спектра имеют различную интенсивность у разных звезд, и так как голубые звезды всегда горячее красных, то таким образом можно определить температуру звезды по положению самой яркой части спектра. Этого нельзя было бы сделать, если бы не имел места один замечательный закон, согласно которому состав света, излучаемого накаленным телом, зависит, за исключением особых случаев, только от температуры, а не от состава тела. Если, например, смотреть на место в кузнечном горне, почти полностью прикрытое раскаленными углями, где все находится при одинаковой температуре, то мы не видим контуров кусков угля, железа или шлака, если они нагреты докрасна. Находясь при одинаковой температуре, уголь, металл и шлак испускают излучение одинакового состава, и поэтому их нельзя отличить друг от друга. Если температуру повысить, то состав света изменится и будет другим, чем в первом случае. Он будет более белым, потому что наиболее яркая часть спектра сместится к его синему концу; количество синих лучей возрастает. Если бы температуру можно было довести до $6\,000^{\circ}$ Цельсия, свет сделался бы одинаковым с дневным, потому что примерно такова температура Солнца. Некоторые звезды еще горячее, и в их свете относительное количество синих лучей еще больше. Таким образом о температуре звезды можно судить по ее спектру, а именно по относительному распределению энергии между различными длинами волн. Этот метод предполагает предварительное нахождение лабораторным путем зависимости спектрального состава света от температуры, и так как в лаборатории нет возможности получить такие высокие температуры, какие господствуют на звездах, измерения звездных температур не могут быть вполне точными. Мы должны предположить, что закон, имеющий место при тех температурах, с которыми мы имеем дело в лаборатории, справедлив также и в области более высоких звездных температур, находящихся за пределами возможностей лабораторного опыта. Примеры звездных спектров приведены на табл. XVIIА.

Связь между спектральным составом света и температурой источника можно иллюстрировать следующим

простым опытом. Мы проектируем на экран спектр вольтовой дуги и выключаем ток. По мере остывания углей их яркость падает; в исчезающем спектре мы видим, что синий цвет гаснет раньше красного.

Наблюдая спектры звезд более детально, мы можем сделать заключение об их природе. Разлагая свет звезд при помощи призмы, мы получаем спектр, который если не обращать внимания на различия, вызванные температурой, вполне подобен спектру любого накаливаемого тела, например угля в вольтовой дуге, за исключением одной весьма важной детали. В спектрах хорошо заметно отсутствие некоторых, обычно чрезвычайно узких, областей длин волн.

Мы уже встречались с подобными случаями поглощения излучения, когда рассматривали причины возникновения окраски тел; однако данный случай отличается тем, что отсутствующие области спектра чрезвычайно определены, резко ограничены и обычно весьма многочисленны. Эта особенность звездных спектров заметна на фотографиях, приведенных на табл. XVIIА.

Мы уже знаем объяснение этого явления; его можно построить на той аналогии, которой мы когда-то пользовались, именно на аналогии с камертонами и радиоприемниками. Рассмотрим несколько ближе отмеченную прежде важную связь между источниками и приемниками различных видов излучения — звука, радиоволн и света.

Первый факт весьма прост. Камертон издает очень чистый тон; иными словами, его звук является воздушной волной одной определенной частоты. Эта звуковая волна расходится по всем направлениям. Если в каком-нибудь другом направлении она встречает другой камертон, настроенный точно на ту же самую ноту, волна приводит его в движение и, конечно, отдает при этом часть своей энергии. Поэтому звук, распространяющийся далее в этом же направлении, оказывается ослабленным — произошло поглощение. Потеря энергии не возмещается звучанием второго камертона, потому что он испускает звук во все стороны и не посылает достаточного количества энергии в данном направлении. Это обстоятельство является основой поглощения, которое, как мы уже видели, вызывает окраску тел. Следует отметить, что источник и приемник должны быть настроены на одну

и ту же ноту. Совершенно также каждая радиостанция посылает волны строго определенной частоты; если бы это не выполнялось с большой тщательностью, радиовещание стало бы невозможным; при этом когда приемник остро настроен на ту же самую частоту, он поглощает часть энергии, излученной передатчиком, вследствие чего ее количество несколько уменьшается. Можно, по крайней мере в небольшой степени, заставить радиоприемник излучать, и при этом посылаемые им волны будут обладать той же частотой, что и волны передатчика, на которые он настроен. Некоторые приемники допускают весьма острую настройку; и если передатчик посылает волны в весьма узком интервале частот, то такие приемники могут принимать только в том случае, если настройка произведена весьма тщательно; при этом принимаемые сигналы оказываются весьма сильными.

Аналогичным образом приходит в колебания и атом в результате нагревания твердого тела или газа, частью которых он является. Если излучение, посылаемое им, встречает некоторое количество атомов, способных колебаться с точно такой же частотой — или с точно такими же частотами — его энергия частично поглощается и проходит ослабленной. Здесь также большую роль играет точность настройки. Каждый атом, не подверженный влиянию соседних, подобен хорошему радиопередатчику: посылаемые им колебания ограничены весьма узкой областью частот. Правильнее было бы сказать не областью, а областями частот, потому что атом скорее можно сравнить с колоколом или со скрипичной струной, чем с камертоном. Звук камертона крайне прост и ограничен почти исключительно одной нотой; в то же время атом, так же как колокол и струна, испускает одновременно несколько нот. Каждая нота определена весьма резко, и на нее можно настроиться очень точно. Эта острота настройки характерна для атомов газа, так как в этом случае в течение большей части времени различные атомы не зависят один от другого; конечно между ними происходят столкновения, но время, в течение которого атомы находятся настолько близко друг к другу, что это может сказаться на их колебаниях, лишь незначительно. Таким образом атомы, множество которых составляет газ, при излучении действуют как

хороший радиопередатчик и как хороший или „избирательный“ приемник, если они принимают колебания.

Поэтому, когда луч белого света, содержащий все частоты, проходит сквозь собрание таких „избирательных“ атомов, происходит резкое поглощение определенных частот: в спектре появляются узкие провалы, показанные на табл. XVII А. Когда газ излучает, его свет содержит те же самые частоты, какие он поглощает. Спектры светящихся газов (паров) показаны на табл. XVII В.

СПЕКТР СОЛНЦА

В спектре Солнца имеется огромное число этих резко ограниченных провалов или, как их обычно называют, „линий“. Когда различные вещества — железо, кальций, водород и т. д. — нагревают до состояния светящихся паров, каждое из них начинает излучать строго определенные частоты. Каждой темной линии солнечного спектра соответствует линия излучения различных веществ.

Отсюда, очевидно, следует, что солнечный свет проходит сквозь облака, состоящие из этих атомов, находящиеся где-то в пространстве; в случае, когда речь идет о таких веществах, как железо или кальций, а также о большинстве других элементов, это может иметь место только на самом Солнце; больше нигде они не могут находиться на пути света в виде паров, потому что только на Солнце температура достаточно высока для того, чтобы привести эти вещества в парообразное состояние. Если исследовать спектры Солнца, звезд и других светящихся тел и сравнить их в лаборатории со спектрами различных веществ, приведенных в состояние светящегося газа, можно сейчас же сказать, имеется тот или иной земной элемент на небесных телах или нет. Такие исследования впервые были произведены в большом масштабе Гюггинсом, Локиером и их современниками. В настоящее время такие исследования имеют еще большее значение, потому что, как теперь известно, анализ света дает значительно больше, чем установление тождества между положением определенных частот в спектрах поглощения и испускания. Частоты, характеризующие каждый элемент, зависят от условий, в которых он находится; от атома могут быть оторваны один или несколько электронов

и каждое такое изменение сопровождается изменением его характерных нот. Эти условия зависят от температуры и плотности газа, и, следовательно, звездные спектры сообщают данные не только о составе звезд, но и об их физическом состоянии.

Вещества, имеющиеся на земле, найдены и на звездах. В одном замечательном случае существование элемента было установлено Локьером в результате исследования солнечного спектра раньше, чем этот элемент был открыт на земле. В спектре Солнца имеются хорошо заметные линии, которым не соответствовало ни одно известное вещество, и Локьер приписал их новому элементу, который он назвал „гелием“; прошло немного времени, и этот элемент был получен из клевеита и других минералов. Гелий теперь широко известен как газ, наиболее подходящий для наполнения дирижаблей, потому что он почти также легок, как водород, и не горюч. Он представляет чрезвычайный интерес для лабораторных исследований, так как альфа-частицы, испускаемые радиоактивными веществами, являются атомами гелия. Вследствие огромной скорости альфа-частицы могут проникать в другие атомы, вплоть до самого ядра, иногда даже разрушаемого ими, отталкивание которого заставляет их обычно отклоняться от своего пути. Исследование этих явлений послужило главным экспериментальным основанием для современной атомной теории; опыты Резерфорда и его сотрудников позволили создать ядерную теорию строения атома и все, что базируется на ней.

Следует выяснить один весьма важный вопрос. Мы предполагали, что излучение Солнца имело бы сплошной спектр, если бы световые лучи не проходили сквозь атмосферу, окружающую Солнце, состоящую из различных элементов, находящихся в газообразном состоянии. Эти газы сами по себе должны светиться и испускать те самые частоты, которые они поглощают, вызывая появление черных спектральных линий. Как же возникает первоначальное „сплошное“ излучение? Оно должно быть настолько интенсивным, что поглощение солнечной атмосферой составляет заметный контраст с непоглощенным фоном, не возмещаемый яркостью самой атмосферы.

Энергия этого „сплошного“ излучения распределена

по всему спектру, а не ограничена некоторым числом определенных частот.

Мы уже видели, что изолированные атомы испускают только присущие им „собственные“ частоты. Но атомы никогда не бывают полностью независимыми; некоторое время они находятся вблизи друг друга, когда движение приводит их к столкновениям. В течение этого времени испускаемые ими частоты ограничены более широкой областью спектра. Если атомы расположены так тесно, что большую часть времени сильно влияют друг на друга, области испускаемых ими частот расширяются настолько, что они сливаются вместе и излучение приобретает сплошной спектр. Пользуясь грубой аналогией, это можно уподобить некоторому количеству отдельных камертонов, лежащих, как попало, в ящике. Если последний сильно встряхнуть, получается дребезжащий звук, который состоит уже не только из собственных нот отдельных камертонов. На Солнце атомы расположены весьма близко друг от друга и под влиянием чудовищной температуры находятся в состоянии весьма быстрого движения; этим и объясняется непрерывность солнечного спектра. Атмосфера, окружающая Солнце, обладающая более низкой температурой, поглощает некоторые частоты,¹ в результате чего появляются темные линии.

Мы можем воспроизвести эти условия в лабораторном опыте. Для этого возьмем электрическую печь, изображенную на рис. 95 и представляющую собой камеру из огнеупорного материала, в которую помещены угли, нагреваемые электрическим током. Угли сначала приводят в соприкосновение, а затем раздвигают. В дугу помещают кусок натрия.

При этом появляется яркий желтый пар, который в виде облака поднимается вверх и выходит через отверстие печи; свет дуги выходит через отверстие в стенке печи, проходит линзу и призму и разлагается в спектр, отброшенный на экран. Яркая желтая линия натрия прекрасно видна. Прикроем теперь отверстие над дугой; тогда раскаленный газ может выходить только через боковое отверстие. Свет дуги проходит при этом сквозь слой пара в несколько сантиметров толщиной; желтая линия исчезает, и на ее месте появляется черная;

пар поглощает в свете дуги только те частоты, которые сам испускает.

Когда происходит полное солнечное затмение, раскаленные пары в атмосфере Солнца становятся заметными за пределами закрытого Луной диска; их спектр, как и следовало ожидать, состоит тогда из ряда ярких линий.

Интересно, что светящийся газ, который, вообще говоря, обладает „линейчатым“ спектром, дает сплошной спектр, если его количество достаточно велико. Наряду

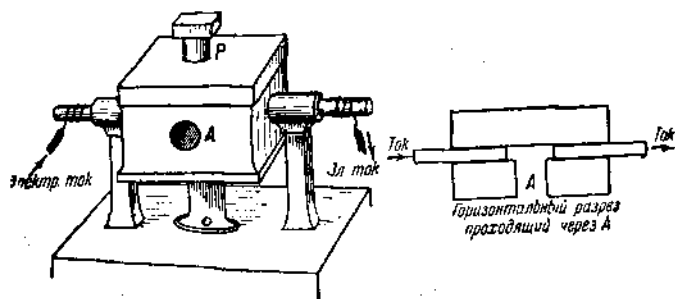


Рис. 95. Из огнеупорного материала сделана небольшая печь. Внутри нее помещена вольтова дуга. Металлы вводятся в печь через отверстие сверху. Когда это отверстие открыто, пары улетучиваются и свет, выходящий через отверстие А, имеет спектр, состоящий из ярких линий. Когда вставляют пробку Р, пары выполняют канал, ведущий к отверстию А, и свет проходит сквозь них. В тех местах спектра, где прежде были яркие линии, теперь появляются темные

с собственными частотами атомов газа всегда имеется некоторое количество и остальных лучей спектра. Первые при прохождении сквозь газ поглощаются сильнее, чем вторые, и поэтому всегда оказывается, что собственные частоты достигают наблюдателя только от внешних слоев, тогда как интенсивность остального излучения определяется всей толщиной облака газа. Если толщина газовой массы достаточно велика, большое поглощение яркого излучения и малое поглощение слабого приводят к тому, что оба сорта излучения выходят одинаково интенсивными и спектр оказывается сплошным. Его характер определяется тогда температурой и не зависит от природы излучающего вещества. Таким образом, если какой-нибудь небесный объект обладает сплошным спек-

тром, это еще не значит, что он состоит из твердого вещества, а только, что он содержит его достаточно много.

ДВИЖЕНИЯ ЗВЕЗД ПО НАПРАВЛЕНИЮ К ЗЕМЛЕ И ОТ НЕЕ

С помощью точных спектральных исследований можно определить скорость, с которой звезда приближается к земле или удаляется от нее. Если, скажем, звезда двигается по направлению к земле, волны, испускаемые ею, располагаются теснее друг к другу, все длины волн сокращаются и делаются более преломляемыми. Совершенно также приближающийся автомобиль „теснит“ звуковые волны, а удаляющийся „разрежает“ их. Каждый раз, когда автомобиль проходит мимо нас, тон издаваемого им шума резко понижается. При скорости около 40 км в час это понижение достигает полутона. Если бы свет звезд имел сплошной спектр без линий, мы не могли бы обнаружить этого смещения, потому что длины волн крайнего фиолетового цвета укоротились бы и стали невидимыми, тогда как в другом конце спектра длины волн, слишком большие для того, чтобы быть видимыми, также укоротились бы и превратились в красный цвет. Все длины волн, и видимые и невидимые, стали бы короче, видимые цвета остались бы для нашего глаза прежними, и мы не обнаружили бы никаких изменений. Заметное смещение наблюдается лишь у спектральных линий; на это явление впервые указал Допплер. Благодаря тому, что положение спектральных линий может быть измерено с очень большой точностью и величина смещения пропорциональна скорости звезды относительно земли, с помощью спектральных измерений можно определить движение звезд относительно земли вдоль линии, соединяющей эти светила. „Смещение Допплера“ представлено на фотографии табл. XVII С. Два спектра, приведенные на этой фотографии, получены от двух краев солнечного диска — восточного и западного. В первом случае источник света движется вследствие вращения Солнца по направлению к Земле, во втором — он удаляется. В обоих случаях свет проходит сквозь земную атмосферу, и некоторые спектральные линии появляются в результате поглощения света кислородом воздуха.

Спектры сложены вместе так, что эти кислородные линии совмещены и, следовательно, одинаковые длины волн обоих спектров в точности совпадают друг с другом. При этом заметно, что остальные линии несколько не совпадают, — это линии поглощения в солнечной атмосфере. Несовпадение является результатом явления Допплера, причем линии, смещенные в сторону коротких волн, получены от приближающегося края Солнца, и наоборот. Присутствие кислородных линий делает возможным точное измерение. Измерить смещения линий в спектрах звезд значительно труднее, чем в случае Солнца. Конечно, у всех линий спектра это смещение одинаково.

Такие изменения в спектре не зависят от расстояния светила, и отсюда возникает любопытное положение, заключающееся в том, что большинство звезд оказывается слишком далекими, для того чтобы можно было различить их движение по небу, и в то же время их приближение к Земле или удаление от нее могут быть измерены со значительной точностью. Таким образом, например, было обнаружено, что далекие туманности, по крайней мере, те из них, которые достаточно ярки для спектральных наблюдений, удаляются и, повидимому, тем быстрее, чем они дальше от нас; отсюда возникло представление о расширяющейся вселенной. Многие звезды приближаются и удаляются периодически; ясно, что каждая такая звезда должна иметь вблизи себя темного спутника, вокруг которого она вращается. Однако подобные вопросы относятся скорее к астрономии, так же как и выводы, которые можно, например, сделать из сопоставления яркости и температуры звезд. Для наших целей достаточно было показать, как много мы можем узнать от света, попадающего к нам из отдаленных областей вселенной.

Остановимся немного на общеизвестной особенности света звезд. Я имею в виду мерцание, которое является результатом недостаточной однородности атмосферы. Оно аналогично дрожанию предметов, рассматриваемых сквозь горячий воздух над костром или над свечей. Лучи звезды идут по пути, который иногда минует наблюдателя. Иногда свет вовсе не попадает в глаз, потому что некоторая область атмосферы несколько изменила свои преломляющие свойства по отношению к прилегающим

к ней слоям воздуха, и заставила лучи отклониться в сторону. При этом появляется окраска, так как попадающие в глаз красные лучи звезды идут не совсем по тому же пути, что синие, и мешающая область атмосферы отклоняет только одни из них. Это не вполне очевидно для наблюдателя, непосредственно смотрящего на звезду, но тотчас заметно, если наблюдать отражение звезды в зеркале, которому сообщено непрерывное слабое дрожание. Светлая точка растягивается при этом в цветное ожерелье. Еще более детальное исследование с помощью спектроскопа показывает, что при этом по спектру звезды проходят черные тени,двигающиеся от красного конца к синему или наоборот в зависимости от того, находится звезда на западе или на востоке. Это нетрудно объяснить. Вследствие вращения Земли области атмосферы, вызывающие мерцание, увлекаются с запада на восток. В случае, когда звезда находится на западе, тени двигаются от красного конца спектра к синему, потому что красные лучи от звезды, находящейся на западе, как менее преломленные, попадают в глаз более прямым путем, чем синие.¹

НЕВИДИМОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Теперь мы можем выйти за пределы, которыми ограничивались вначале, и рассмотреть длины волн, невидимые глазом. Мы начнем с тех из них, которые прилегают к видимой области. При этом мы находимся в полной зависимости от инструментов, служащих для наблюдения. К счастью, имеется много методов обнаружения невиди-

¹ На рисунке звезда находится далеко слева внизу. Ее лучи проходят в атмосфере криволинейно, причем разные длины волн следуют по различным путям. На чертеже изображены только те красные и синие лучи, которые попадают в глаз наблюдателя Q, когда он видит звезду в западной части горизонта. Вследствие вращения земли, происходящего в направлении стрелок, одна из многочисленных областей атмосферы, вызывающих мерцание, P, сначала действует на красный луч, следующий по более короткому пути, а затем, пройдя промежуточные длины волн, — на синий. Это и вызывает движение темной полосы, пробегающей в это время по спектру звезды от его красного конца к синему. Это явление тождественно с „звевым лучом“, описанным на стр. 63 (Прим. перев.)

мых лучей. Среди них основной — фотография. Пластины можно „очувствитель“ к самым различным лучам. В частности, обычные фотографические пластины, применяемые уже в течение многих лет, чувствительны не только к самым коротким волнам видимого спектра, но также и к ультрафиолетовым лучам, которые лежат за его пределами. Трудным является получение пластинок, чувствительных к длинным волнам; но за последние годы и это затруднение было преодолено. Полученные при этом результаты чрезвычайно интересны. Некоторые из них являются прекрасной иллюстрацией многих фактов, рассмотренных в этой книге.

Мы видели, что красные лучи в гораздо меньшей степени, чем синие, отклоняются от своего пути атомами и молекулами, а также пылью и парами, находящимися в воздухе. Соответственно этому, если пластинка чувствительна к красным лучам, и тем более, если ее чувствительность простирается в инфракрасную область спектра, можно заснять такие объекты, которые для глаза закрыты дымкой. Таким образом снимали горы, находящиеся на расстоянии десятков и даже сотен километров и получали прекрасные фотографии дальних ландшафтов при таких условиях, при которых глаз ничего не мог видеть. Фотографии табл. XVIII являются прекрасным примером этого применения инфракрасных лучей. Конечно, фотографический аппарат всегда обладает огромным преимуществом перед глазом благодаря тому, что его восприятие накапливается со временем; особенную ценность это свойство приобретает в астрономии. Большое применение имеют „фильтры“, не пропускающие коротких волн видимого спектра. Часто также пользуются фильтрами, поглощение которых простирается вплоть до красных или даже инфракрасных лучей; при пользовании ими необходимо лишь увеличивать время экспозиции. Разумеется, эти волны еще достаточно малы для того, чтобы передавать точные детали.

На инфракрасных фотографиях всегда сильно выступает зеленая растительность. Вспомним, что хлорофилл не поглощает темнокрасных лучей, и поэтому свет, отраженный листьями и травой, сильно действует на специально приготовленную чувствительную пластинку. В результате этого деревья, кусты и трава выглядят на

фотографиях так, как если бы они были покрыты снегом.

Для физика инфракрасные лучи представляют особый интерес, потому что они являются результатом колебаний скорее молекул, чем атомов; поэтому изучение длинных волн позволяет узнать строение молекул.

Под ультрафиолетовыми лучами обычно понимают те невидимые солнечные лучи, достигающие поверхности земли, в состав которых входят волны меньшей длины, чем волны видимого света. Кроме них в солнечном свете должны присутствовать еще меньшие длины волн, но они задерживаются атмосферой. Их длина ограничена таким образом пределом 0,00003 см; никакая радиация более короткой длины волны не достигает поверхности земли. Поглощение излучения связано с нагреванием атмосферы, и на высоте 160 км и выше воздух должен быть теплее, чем на поверхности земли. Этот слой настолько сильно отличается по своим свойствам от находящихся под ним, что он, как мы уже отмечали выше, прекрасно отражает и звуковые волны и радиоволны.

ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ

Энергия ультрафиолетовых лучей обладает многими характерными свойствами, причем некоторые из них начинают изучать только теперь. Одно из наиболее замечательных свойств заключается в том, что некоторые вещества под влиянием этих лучей светятся. Это свойство было известно и применялось уже давно. Если мы отбросим спектр дуги на экран, покрытый раствором сернокислого хинина, то за фиолетовым концом спектра будет заметно свечение, и ультрафиолетовые лучи становятся, таким образом, видимыми. Это явление чрезвычайно усиливается, если вместо стеклянных линз и призм пользоваться кварцевыми. Кварц пропускает ультрафиолетовые лучи значительно лучше стекла; последнее совершенно непрозрачно для самых коротких волн. Следует иметь в виду, что для нас стекло прозрачно потому, что оно не поглощает видимых лучей; и если бы глаз был устроен таким образом, что видел бы ультрафиолетовые или инфракрасные лучи, мы называли бы „прозрачным“ кварц в первом случае и каменную соль — во втором.

Смотря на ту часть экрана, обработанного сернокислым хинином, на которую падают ультрафиолетовые лучи, мы замечаем синеватое свечение. Это свечение не является новым цветом; если его исследовать спектроскопом, оказывается, что оно состоит из лучей определенной части видимого спектра. Ультрафиолетовые лучи не стали видимыми для глаза, они лишь вызвали видимое свечение. Излучение одной длины волны исчезло, и вместо него появился свет другой длины волны. С первого же взгляда это явно противоречит нашим опытам с волнами; до сих пор мы всегда предполагали, что ни отражение, ни преломление, ни дифракция не меняют длины волны; такое явление ни разу не встречалось в наших опытах. Однако в действительности дело происходит именно так; наше заключение правильно и вполне соответствует опыту. Мы просто не имеем при этом дела с обычным отражением или преломлением, а с явлением совершенно иного порядка. В этом случае мы встречаемся с первым примером того, что волновая теория недостаточно полна.

Мы не говорим, что она ложна, и не собираемся менять нашей точки зрения на природу световых явлений. Мы лишь находим явления, которые не объясняются волновой теорией; и по мере того, как мы будем двигаться дальше, этот круг явлений будет становиться все более и более обширным.

Можно показать очень интересный опыт, иллюстрирующий наш вывод. Солнечный свет впускается в затемненную комнату через щель в ставне; спектр, полученный при помощи линз и призмы, отбрасывается на поверхность воды, налитой в сосуд, в который введено некоторое количество эозина или других сильно флуоресцирующих красок. Красные и желтые лучи проходят сквозь жидкость и освещают дно сосуда; остальные лучи остаются на поверхности воды. Их цвет меняется, и вместо зеленого и синего появляется темнозеленая полоса, как бы плавающая на воде. Она продолжается за пределы синего цвета, что можно легко проследить, если ввести в спектр кусок белой бумаги. При узкой щели хорошо заметны главные линии солнечного спектра; они имеются и в ультрафиолетовой области, и это служит лишним доказательством того, что по существу нет никакой раз-

ницы между видимым и невидимым излучением. Синие и зеленые лучи проникают в жидкость весьма незначительно; их превращение в лучи большей длины волны происходит полностью на протяжении очень небольшого расстояния от поверхности. Красные лучи проходят с ничтожным ослаблением. Можно наблюдать очень заметную „деградацию“: исчезающие цвета, заменяясь другими, „смешаются“ всегда к красному концу спектра (см. табл. XI С).

Флуоресценция — довольно обычное явление. Она сказывается, например, в виде синей окраски на поверхности минерального масла, налитого в стеклянный сосуд.

Как мы уже говорили, воздух сильно поглощает очень короткие волны, так что солнечный свет содержит лучи, лишь начиная с некоторой длины волны. Есть много способов получать волны более короткие, чем те, которые присутствуют в солнечном свете, причем оказывается, что флуоресценция значительно усиливается при уменьшении длины волны. Ртутная лампа — очень интенсивный источник коротких длин волн, и если ее колба сделана из кварца, эти лучи выходят наружу. Смотреть на такую лампу опасно для глаз; солнечный свет также был бы вреден, если бы короткие волны не поглощались в атмосфере. При свете ртутной лампы многие вещества, ничем не отличающиеся при дневном свете, ярко светятся.

Цвета, появляющиеся при этом, весьма разнообразны, и все явление очень красиво. Можно изготовить такой „фильтр“, который поглощал бы все видимые лучи и пропускал бы только ультрафиолетовые. В этом случае флуоресцирующие вещества кажутся самосветящимися.

Мы можем посмотреть через такое стекло на кварцевую лампу, — сама она, конечно, при этом видна не будет, — так как в течение короткого времени ослабленные лучи не будут вредны для глаз. Тогда мы видим странное явление: вся комната кажется наполненной светящимся туманом. Он виден вследствие флуоресценции, возбужденной ультрафиолетовыми лучами в глазной жидкости. Если закрыть лампу экраном так, чтобы лучи не попадали в глаза, явление пропадает.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД ПОД ВЛИЯНИЕМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ ЛУЧЕЙ

Другое замечательное свойство ультрафиолетовых лучей заключается в способности уничтожать отрицательный электрический заряд на некоторых металлах, освещаемых ими, в частности на щелочных и на цинке. Это очень просто показать. С помощью электрической машины получают ряд искр между двумя электродами. Один из электродов, сделанный из цинка, покрыт ртутной амальгамой; машина приключена к нему отрицательным полюсом. Другой электрод соединен с землей. При таких условиях машина заряжает цинковый электрод отрицательным электричеством до тех пор, пока между электродами не появляется разности потенциалов большей, чем это допускает воздушный промежуток; тогда возникает разряд и проскакивает искра.

Если теперь цинковый электрод осветить каким-нибудь источником ультрафиолетовых лучей, искры прекращаются. Отрицательное электричество не может накапливаться на этом электроде, потому что ультрафиолетовые лучи разряжают его, как только оно появляется. Если между источником света и электродом поместить стеклянную пластинку, искры появляются снова, потому что стекло, прозрачное для видимого света, не пропускает ультрафиолетовых лучей.

Странно видеть появление и исчезновение искрового разряда при введении и удалении стеклянной пластинки.

Такие опыты создают впечатление, что чем меньше длина волны, тем сильнее действие лучей; это наталкивает нас на продолжение опытов с лучами возможно более короткой длины волны. Производя такие опыты, мы можем рассчитывать сделать некоторые явления более очевидными и нам легче будет тогда прийти к общим выводам. Поэтому мы воспользуемся рентгеновскими лучами.

Мы должны будем прежде всего убедиться, что их можно рассматривать как эфирные волны в такой же мере, как и свет. Затем мы рассмотрим их свойства и обнаружим при этом, что они вызывают те же явления,

что и ультрафиолетовые лучи, но только в гораздо более сильной степени. Мы увидим, что волновая теория не в состоянии объяснить многих поразительных экспериментальных фактов; она необходимо должна быть дополнена каким-то, до сих пор еще не вполне понятным, образом. Мы вступаем в круг вопросов, еще не разрешенных полностью, и поэтому особенно интересных.

Глава VIII

РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ

В 1895 г. Рентген открыл новый вид излучения, которое он назвал за его таинственные свойства икс-лучами. Эти лучи сейчас же сделались объектом многочисленных исследований. В течение нескольких недель после своего открытия Рентген установил основные свойства лучей, не придя ни к какому заключению относительно их природы. Лишь в 1912 г., когда Лауэ показал, что они могут дифрагировать так же, как обыкновенный свет, стало очевидным, что рентгеновские лучи являются эфирными колебаниями крайне малой длины волны. В качестве дифракционной решетки Лауэ воспользовался кристаллом; ниже мы рассмотрим его опыты. Рентгеновские лучи по своей природе совершенно подобны видимому свету, но сильно отличаются от него по своим свойствам. Поэтому они являются чрезвычайно удачным примером для обобщения наших сведений об излучении. Данный случай особенно интересен тем, что исследование коротковолнового излучения показывает недостаточность волновой теории, в то время как до сих пор она всюду оправдывалась хорошо; в старом виде волновая теория оказывается неприемлемой, потому что она не в состоянии объяснить большого числа новых фактов. Постепенно формируется более общая схема, и современное положение представляет огромный интерес.

Рентгеновские лучи появляются при прохождении электрического разряда или искры через пространство, наполненное крайне разреженным воздухом или другим газом. Электрическая искра долгое время являлась объектом многочисленных исследований, но новые явления были обнаружены только после того, как разряд произ-

вели в стеклянной колбе, из которой воздух был выкачан более или менее полностью.

По мере уменьшения давления искра становится длиннее, шире и приобретает более отчетливую окраску. Когда Крукс усовершенствовал воздушный насос так, что стало возможным получать давления порядка миллионной доли атмосферного, обнаружили новые явle-

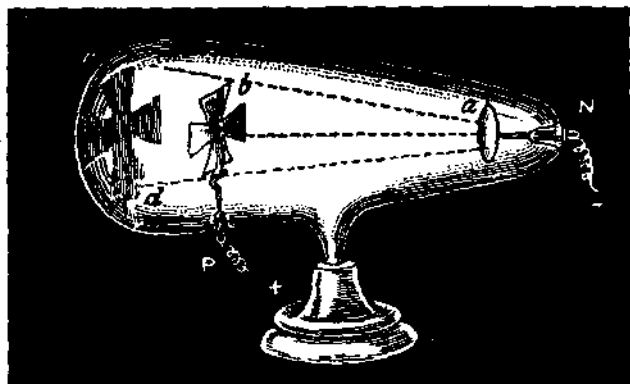


Рис. 96. Катод, или отрицательный электрод, находится в *a*. Лучи идут через трубку прямолинейно и возбуждают флуоресценцию противоположной стенки. Металлический крест *b*, отбрасывает резкую тень

ния. Отрицательный электрод разрядной трубки начинает при этом испускать лучи, распространяющиеся прямолинейно и обладающие механическим действием. Эти лучи нагревают противоположную стенку колбы или какого-нибудь тела, помещенного на их пути; они вызывают яркую флуоресценцию стекла и многих минералов; они заставляют вращаться легкую мельничку, когда ударяются в ее лопасти. Наиболее интересное свойство этих лучей заключается в том, что они отклоняются магнитом. Последнее говорит за то, что пучок лучей состоит из летящих заряженных частиц. Такой пучок эквивалентен электрическому току и поэтому должен реагировать на присутствие магнита. На рис. 96, 97, 98 и 99 представлены опыты Крукса. Эти иллюстрации сделаны с клише оригинальных рисунков, приложенных к сообщению Крукса, представленному им Королевскому

институту в апреле 1879 г. Он утверждал, что его насос дает настолько хорошее разрежение, что остающиеся в трубке немногие молекулы могут двигаться, не сталкиваясь друг с другом на протяжении расстояний, сравнимых с длиной трубки. Такие условия, говорил он, так же отличаются от газа, как последний от жидкости. В конце работы, представленной в том же 1879 г., Крукс

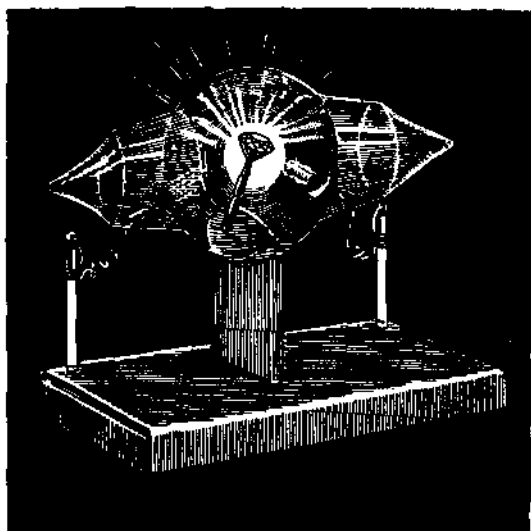


Рис. 97. Лучи вызывают яркую флуоресценцию алмаза, помещенного в центре трубки

сделал в неясной форме следующее предсказание, которое частично оправдалось впоследствии:

„Явления, наблюдаемые в этих откачанных трубках, открывают перед физикой новый мир, в котором материя существует в четвертом состоянии, где хорошо оправдывается корпускулярная теория света и свет не всегда движется прямолинейно; но мы никогда не сможем проникнуть в этот мир и всегда должны будем наблюдать и управлять им снаружи“.

Дж. Дж. Томсон, Вихерт и др. показали, что лучи Крукса состоят из частиц, несущих отрицательный электрический заряд, масса которых меньше массы атома

водорода. Они были названы „электронами“. Электроны могли быть вырваны, повидимому, из любого атома, если только приложить достаточно большое электрическое напряжение индукционной катушки или другой электрической машины; электроны, полученные из самых различных веществ, оказались совершенно одинаковыми.

Становилось очевидным, что электрон является главной составной частью материи. Пучок электронов был

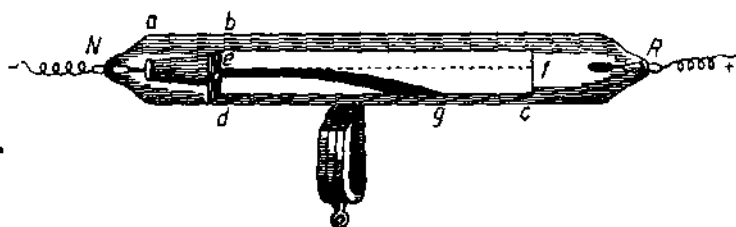


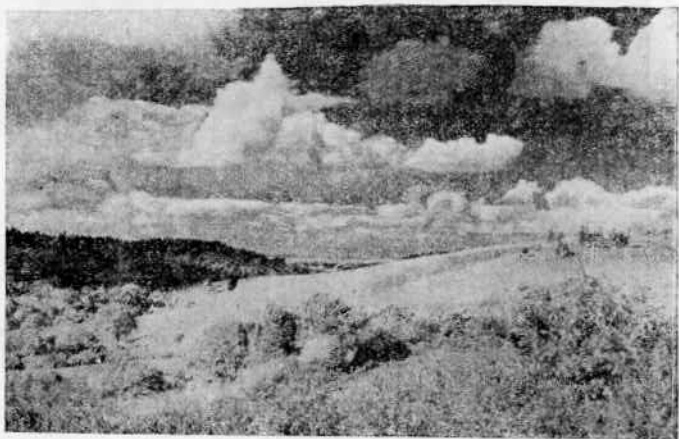
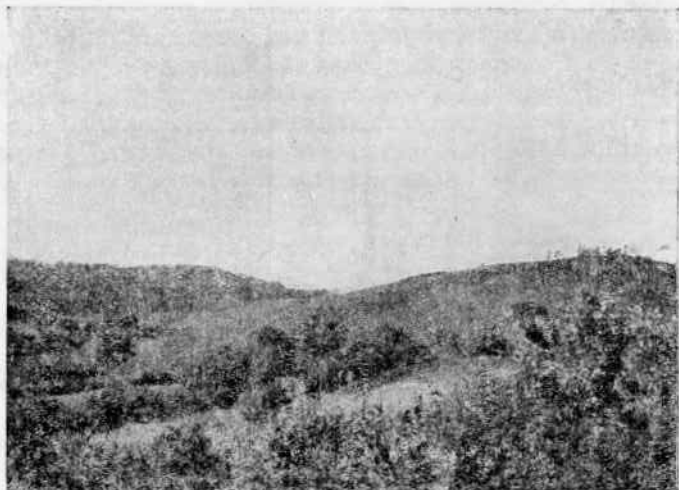
Рис. 98. При помощи щели, установленной перед катодом *a*, выделяется узкий пучок катодных лучей. Он отклоняется подковообразным магнитом

назван катодными лучами, потому что он исходит из отрицательного электрода, или катода.

Исследуя катодные лучи, Рентген обнаружил, что закрытая фотографическая пластинка, находящаяся вблизи экспериментальных приборов, „вуалируется“, несмотря на то, что она не подвергается действию света. Он выяснил, что причиной этого является излучение, исходящее от стеклянной колбы, именно от того места ее, на которое падают катодные лучи; он начал тогда исследовать основные свойства открытых им лучей.

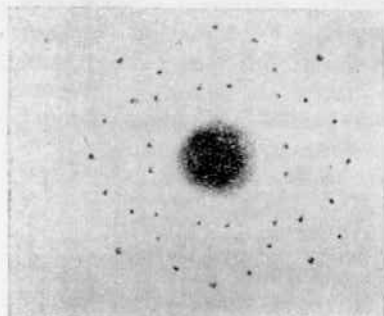
Во многих отношениях они напоминали свет. Они двигались прямолинейно и оставляли резкие тени, они пронизывали пространство, незаполненное веществом, действовали на фотографическую пластинку, вызывали в некоторых веществах флуоресценцию и, подобно ультрафиолетовым лучам, заставляли проводники терять электрический заряд. В других отношениях рентгеновские лучи, повидимому, сильно отличались от света. Зеркала, призмы и линзы не оказывали на них никакого действия; обычные дифракционные решетки не заставляли их дифрагировать; ни двойное лучепреломление, ни поляризация не наблюдались при прохождении их

ТАБЛИЦА XVIII

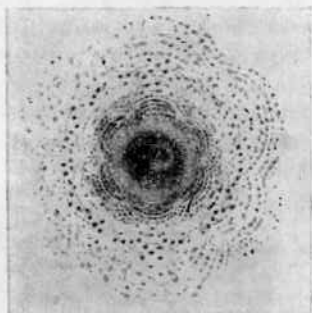


Нижняя фотография снималась сквозь светофильтр, пропускающий только инфракрасные лучи, верхняя — обычным образом. Обратите внимание, что синее небо вышло в первом случае черным, так как оно не рассеивает инфракрасных лучей. В то же время трава и деревья, сильно отражающие инфракрасные лучи, получились белыми. Весь ландшафт на нижней фотографии кажется необычным, потому что глаз не видит инфракрасных лучей, в которых этот снимок сделан. Обратите также внимание на исключительную видимость деталей, особенно вдали (стр. 183).

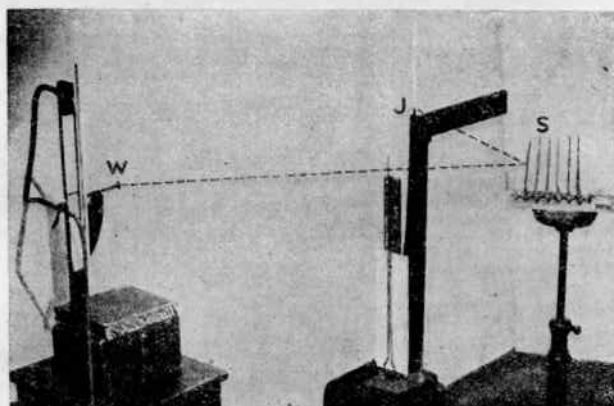
ТАБЛИЦА XIX



А. Дифракция рентгеновских лучей от кристалла каменной соли.



В. Дифракция рентгеновских лучей от калцифилиита (стр. 206).



С. Фотография установки опыта Рэлея, описанного на стр. 204. Свисток находится в *W*, система экранов в *S*, чувствительное газовое пламя в *J*. Пунктиром отмечен путь звуковых волн, действующих на пламя. Фотография показывает вид пламени при отсутствии звука или при таком расположении экранов (видных на снимке с ребра), при котором элементарные отражения не усиливают друг друга. Отверстие, через которое выходит газ в *J*, придана такая форма, что пламя не реагирует на звук, падающий непосредственно от *W* к *J*. При определенном расположении экранов пламя становится шире и „садится“.

сквозь кристаллы. Кроме того они обладали замечательной способностью проникать сквозь вещество. Казалось, ничто не задерживало их полностью, хотя в некоторых веществах обнаружилось заметное поглощение: именно в тяжелых атомах сильнее, чем в легких. Благодаря этому стало возможным наблюдать внутреннее строение человеческого тела, непрозрачного для света: кости дают тени значительно более плотные, чем окружающие их ткани.

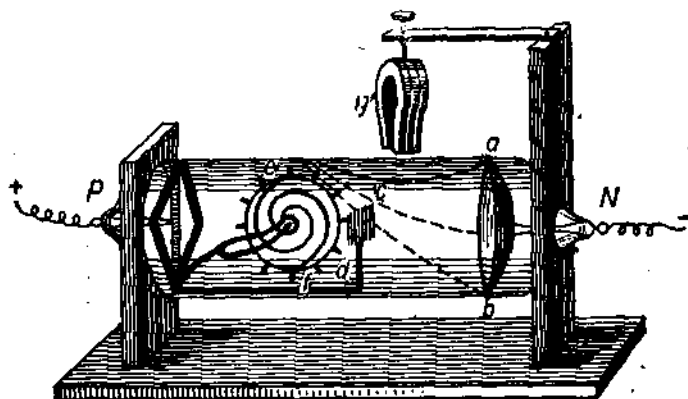


Рис. 99. Катод *a* сделан в форме блюдечка; это заставляет лучи собираться в одну точку. Нормально на пути лучей стоит экран *c*, но если подвести магнит *g*, то он отклоняет пучок так, что лучи проходят над экраном и ударяются в лопасти небольшого колеса *e*, которое начинает быстро вращаться. Если магнит повернуть на 180° , лучи идут под экраном *c* и колесо вращается в противоположную сторону

Если бы удалось показать, что скорость рентгеновских лучей равна скорости света, то тем самым было бы доказано тождество этих двух видов излучения; но такой опыт был слишком труден. Баркла показал, что пучок рентгеновских лучей может иметь „стороны“, или быть поляризованным при соответствующих условиях возникновения лучей, но их поляризация в некоторых отношениях отличается от поляризации света. Опыт, сделанный Лауэ, положил конец спорам, так как он показал, что дифракция рентгеновских лучей во всех отношениях аналогична дифракции света; и если дифракция света является доказательством его волновой природы, то это относится и к рентгеновским лучам.

Рассмотрим детальнее знаменитый опыт, позволивший сделать удивительные выводы. Его расположение крайне просто. Узкий пучок рентгеновских лучей пропускают сквозь кристалл, и фотографическую пластинку помещают таким образом, чтобы на нее падал пучок, прошедший кристалл и вышедший с другой стороны его (рис. 100). Лауэ предвидел, что на пластинке кроме центрального изображения прошедшего пучка должны получиться еще дополнительные изображения. При своем предсказании ожидаемого явления Лауэ основывался на световых явлениях, наблюдаемых в ряде случаев. Когда эфирные волны падают на пластинку, покрытую рядом параллельных штрихов, или когда они проходят сквозь такую пластинку или сквозь атмосферу, в которой ввешены мелкие частицы одинакового размера, поток энергии следует по нескольким определенным направлениям, представляющим дифрагированные пучки. Мы уже встречались с ними и рассмотрели несколько примеров этого явления. Во всех таких случаях необходимо, чтобы не было большого различия между длиной волны и расстоянием, разделяющим штрих решетки, или диаметром частиц. Лауэ считал, что неудачи, которые имели место при попытках обнаружить дифракцию рентгеновских лучей, следует приписать несоблюдению этого условия. Если бы длина волны рентгеновских лучей оказалась в тысячи раз короче, чем у света, как Лауэ имел основание предполагать, было бы бесполезно искать дифракционные явления обычным путем на обычных дифракционных решетках. Следовало пользоваться такими решетками, штрихи которых расположены в тысячи раз ближе друг к другу, чем у решеток, обычно применяемых на практике. Однако это неосуществимо: невозможно нанести полмиллиона параллельных штрихов на протяжении 1 см.

Сама природа построила решетку, недоступную рукам человека. Для рентгеновских лучей подходящей решеткой могли явиться кристаллы, если вспомнить о правильном расположении в них атомов, о котором можно было подозревать. Расстояния между атомами, поскольку их можно было подсчитать, оказывались того же порядка, что и длина волны рентгеновских лучей. Правильно или нет

было обосновано это предсказание, теперь уже не важно. Но когда в 1912 г. опыт с дифракцией был произведен сотрудниками Лауэ, Фридрихом и Книппингом, он удался полностью. На фотографической пластинке появились сложные симметричные следы, которые хотя и не были похожи на дифракцию света, но, очевидно, имели ту же природу. Сейчас же обнаружилось, что каждый кристалл вызывает появление системы характерных для него следов. Опыт Лауэ оказался не только новым методом исследо-

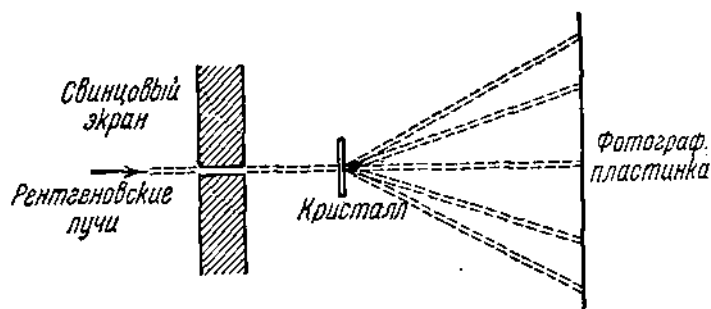


Рис. 100. Рентгеновские лучи пропускают через маленькое отверстие в свинцовом экране и направляют на кристалл. На фотографической пластинке появляется дифракционная картина Лауэ

вания рентгеновских лучей, но так же новым способом изучения строения кристаллов. Примеры дифракционных следов приведены на табл. XIX А, В. По характеру они сходны с табл. XX С.

Для того чтобы эти факты были вполне ясны, нет необходимости вдаваться слишком глубоко во все детали опыта. Мы уже познакомились с некоторыми особенностями кристаллического строения на примере исландского шпата; уместно еще раз остановиться на этом вопросе и обсудить его более полно.

Наиболее поразительной и характерной чертой кристалла является правильность его формы, абсолютная гладкость граней и острота ребер. Если мы сравним друг с другом различные кристаллы одного и того же вещества, мы обнаружим, что углы между гранями у всех экземпляров совершенно одинаковы; площади граней могут при этом различаться весьма сильно. Выражаясь специальным языком, грани различных экземпляров могут

быть неодинаково развиты. Естественно заключить, что в основе правильной структуры лежит пространственное повторение определенного элемента, который сам по себе настолько мал, что невидим. Простой аналогией может служить кусок ткани, состоящий обычно из волокон, пересекающихся под прямым углом. Как бы мы ни рвали материю, всегда получаются куски прямоугольной формы;

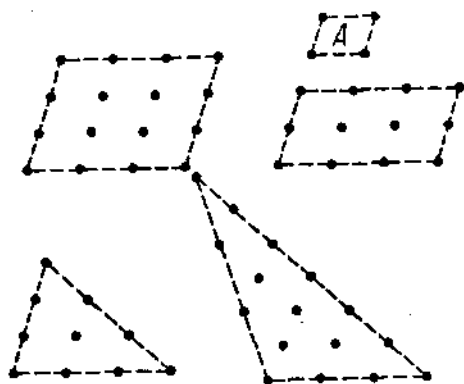


Рис. 101. Элементарная ячейка плоскостного рисунка представлена контуром А. Многократное повторение этой ячейки может дать в результате самые различные фигуры, примеры которых изображены на рисунке. Углы между сторонами этих фигур имеют всегда некоторые определенные значения

при этом они могут и не быть квадратными. Существует два основных направления, перпендикулярных друг к другу; все естественные разрывы ткани происходят по одному из этих двух направлений. Если они равноценны решительно во всех отношениях, например, если ткань разрывается в обоих направлениях одинаково легко, и разодранные края получаются одинаковыми, основа

и поперечные нити (уток) идентичны: они должны состоять тогда из одинаковых волокон, расположенных с одинаковыми промежутками. Мы вправе утверждать, что материя состоит из „квадратных“ элементов. Это имеет место даже в том случае, если как основа, так и поперечные нити имеют сложное строение: например, если они состоят из правильно расположенных цветных волокон. Если только их последовательность в обоих случаях одна и та же, мы можем считать элементы квадратными. Примером этого может служить материя шотландских пледов.

Сравнение с тканью недостаточно передает всю сложность строения кристаллов, потому что основа и поперечные нити не могут составлять друг с другом угла, отличного от 90° . Но эта аналогия иллюстрирует важное свойство кристаллической структуры, заключаю-

щееся в том, что в любой системе, являющейся многократным пространственным повторением одной ячейки, углы должны быть всегда одними и теми же, тогда как к размерам граней это не относится. Основная ячейка определяет величину углов. Если, например, такая ячейка плоской системы имеет вид небольшого параллелограмма (А на рис. 101), вся система может иметь различные

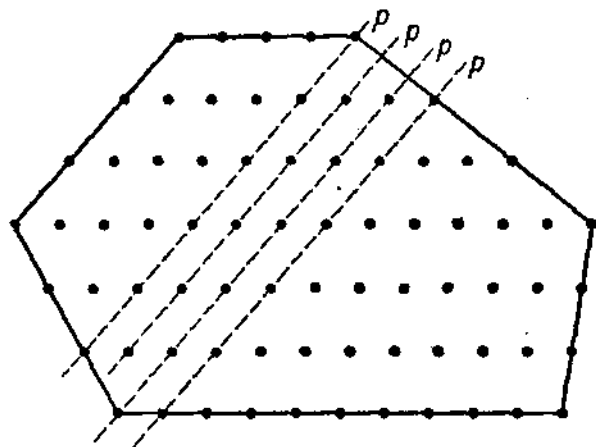


Рис. 102. Точки на рисунке можно расположить рядами бесчисленным количеством способов

формы вроде представленных на рисунке 101. Углы не обязательно должны быть такими же, как у ячейки А, но смежные стороны у всех экземпляров наклонены друг к другу одинаково.

Точно так же и различные грани кристалла могут быть развиты неодинаково, но их взаимный наклон остается всегда постоянным. Этого следует ожидать, если кристалл состоит из многих элементарных ячеек, многократно приставленных друг к другу во всех направлениях, и так как факты прекрасно согласуются с нашим объяснением, мы заключаем, что наше первоначальное представление о строении кристалла соответствует действительности.

Что же происходит, когда эфирные волны встречаются такое кристаллическое тело?

Каждый кристалл можно представлять состоящим из

ряда слоев, равноотстоящих друг от друга, так же как на плоскости правильное сочетание точек можно рассматривать как систему равноотстоящих рядов. Аналогично тому как в этом более простом случае разбивку на ряды можно произвести многими способами, видными на рис. 102, так же и кристалл может быть мысленно разбит

на параллельные слои бесчисленным количеством способов.

Мы рассмотрим дифракцию рентгеновских лучей последовательно: сначала мы будем иметь в виду рассеяние элементарной ячейкой, затем слоем ячеек и, наконец, всем кристаллом, состоящим из ряда слоев. Элементарная ячейка кристалла состоит из нескольких атомов, расположенных определенным образом; род атомов и их расположение меняются от кристалла к кристаллу. Когда ячейку встречают волны, они рассеиваются ато-

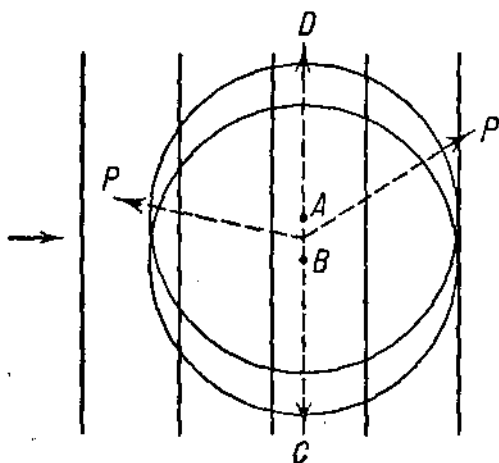


Рис. 103. Волны, представляемые вертикальными линиями, достигают двух атомов A и B , которые рассеивают небольшую часть энергии. Атомы находятся на расстоянии половины друг от друга. Обе рассеянные сферические волны взаимно уничтожаются в направлениях ABC и BAD , потому что гребни одной совпадают со впадинами другой. В то же время энергия рассеивается в других направлениях, отмеченных стрелками P . Это является частным случаем явления, изображенного на рис. 73

мами, причем каждый атом можно рассматривать как центр системы расходящихся сферических волн.

Очень скоро эти волны сливаются вместе, и в конце концов получается одна сферическая волна с центром где-нибудь внутри ячейки. Эта волна обладает одной особенностью, — она имеет неодинаковую интенсивность в различных направлениях. В качестве простого примера рассмотрим ячейку (рис. 103), состоящую из двух атомов A и B , расстояние между которыми равно половине длины волны. Пусть падающие волны достигают одновременно обоих атомов. Волны, рассеянные атомами

A и B , излучаются также одновременно. В направлении ABC обе системы волн постоянно находятся в противоположной фазе: гребень одной системы совпадает со впадиной другой. В этом направлении действие волн уничтожается. То же самое происходит и в противоположном направлении BAD . Но во всех остальных полного уничтожения не получается: так, в направлениях, отмеченных стрелками P , волны частично усиливают друг друга тем больше, чем дальше P отстоит от C и D . Таким образом рассеянная волна имеет сферическую форму, но интенсивность ее неодинакова в различных направлениях. Имеются два направления C и D , в которых эта волна совершенно исчезает. Это изображено на рис. 103.

Иное расположение атомов приводит к другому распределению интенсивности сферической волновой поверхности, причем чем сложнее расположение атомов, тем сложнее и это распределение.

Любое усложнение не оказывает, однако, существенного влияния на окончательные выводы, и наш пример был выбран лишь для того, чтобы сделать описание наиболее конкретным. Существенным является тот факт, что независимо от рода и расположения атомов в каждой ячейке последние ведут себя все совершенно одинаково. Отвлечемся от неравномерного распределения энергии по поверхности рассеянной волны и будем лишь иметь в виду, что эти волны превращаются в конце концов в сферические и что можно считать их возникающими в ряде правильно расположенных точек, представляющих положения элементарных ячеек.

Мы можем рассмотреть теперь суммарное действие ячеек одного слоя. Предположим, что точки на рис. 104 изображают ячейки слоя кристалла, расположенного перпендикулярно чертежу. Система падающих волн представлена линиями pp , $p'p'$ и т. д. Когда волны достигают поочередно отдельных ячеек, от последних рассеиваются сферические волны, совместное действие которых является отраженной волной. Мы имеем здесь новое применение принципа Гюйгенса. В этом случае происходит обычное отражение, отличающееся от отражения в зеркале только тем, что лишь небольшая часть первоначальной энергии приходится на долю отражен-

ной волны. Мы знаем из опыта, что в случае одного кристаллического слоя эта часть крайне мала: лишь миллионы таких слоев отражают рентгеновские лучи полностью.

Аналогичное явление часто наблюдают с звуковыми волнами. Правильное отражение звука иногда происходит

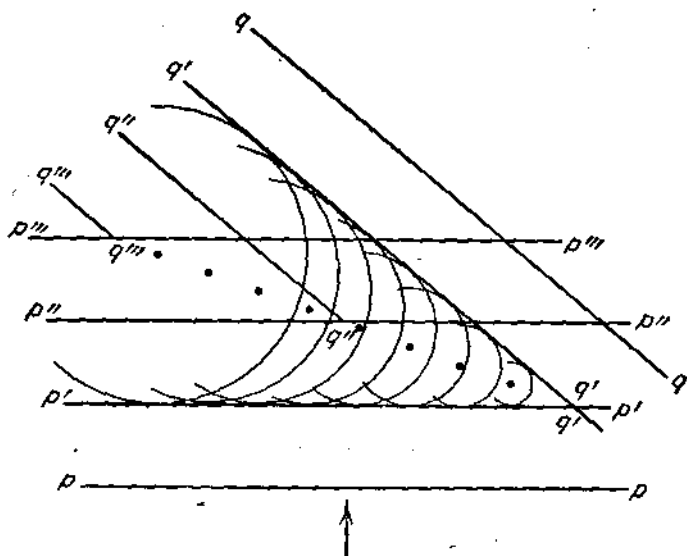


Рис. 104. Волны pp' , $p'p'$, ... достигают ряда ячеек, где происходит некоторое рассеяние. Большая часть энергии проходит насквозь, тогда как небольшая доля ее отражается в виде волн qq' , $q'q'$, ...

от прутьев железных решеток, причем большая часть энергии проходит насквозь. Можно слышать это отражение, проезжая мимо решетки в экипаже.

Следует отметить, что в правильном расположении ячеек или точек, изображающих их на рис. 104, нет необходимости, когда речь идет о действии одного слоя. Прутья решетки не обязательно должны чередоваться правильно для того, чтобы было слышно эхо; отражение звука наблюдается даже от обыкновенной изгороди. Правильность расположения неважна до тех пор, пока мы не рассматриваем отражение от большого числа плоскостей кристалла.

На рис. 105 представлено сечение ряда таких слоев, изображенных в виде линий S_1, S_2, S_3 и т. д. Эти линии нарисованы сплошными, а не в виде рядов точек, потому что расположение внутри слоя элементарных ячеек или представляющих их точек не играет роли. Для удобства на рисунке вместо самих волн начерчены направления, по которым они распространяются (лучи). Таким образом линия aPa_1 представляет уже рассмотренное выше отражение в одном слое. Кроме отражения aPa_1 происходят

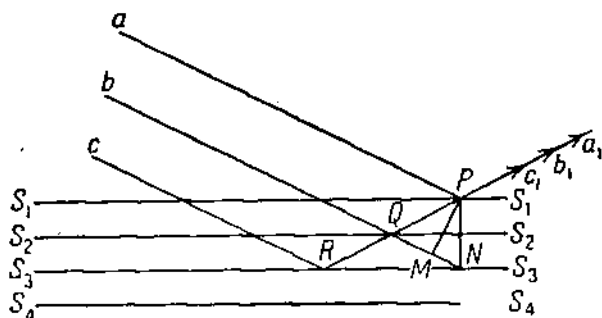


Рис. 105. Отражение волн рядом правильно расположенных слоев, каждый из которых отражает небольшую часть энергии

другие; bQb_1, cRc_1 и т. д. Размеры на рис. 105 в некоторых отношениях не соблюдены, для того чтобы можно было показать результат отражения более отчетливо. Расстояния между слоями в действительности ничтожно малы по сравнению с шириной пучка. Каждый луч, вроде bQb_1 , изображает волны, двигающиеся таким широким фронтом, что различные отраженные волны накладываются друг на друга.

Волны bQb_1 проходят до встречи с aPa_1 больший путь, чем последние. Если провести перпендикуляры PM и PN , разность путей будет равна отрезку MN .

Путь волны cRc_1 превышает bQb_1 на ту же величину, на какую последний превышает aPa_1 , потому что все слои разделены равными расстояниями. Волна, отраженная кристаллом, является суммой всех волн, отраженных отдельными слоями. Это сложение можно иллюстрировать рис. 106, на котором кривые изображают системы волн, отраженные последовательными слоями; каждая из них

отстает от предыдущей на расстояние MN . Все волны нужно сложить; например, вдоль вертикальной линии, показанной на рис. 106, мы должны сложить отрезки Oa , Ob , Oc и т. д., имеющие положительный знак, если они расположены над горизонтальной линией, и отрицатель-

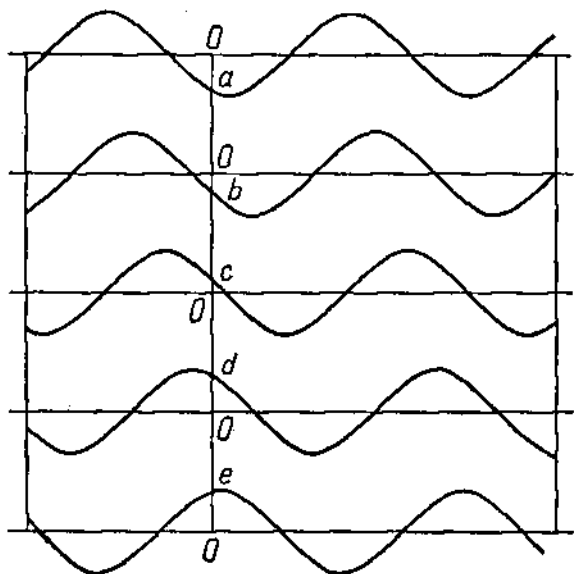


Рис. 106. Отраженные волны предыдущего рисунка обладают нулевой энергией, если все они не находятся в одной фазе. Сумма $Oa + Ob + Oc + \dots$ равна нулю, потому что среди миллионов таких слабых есть равное количество положительных и отрицательных. Исключение представляет случай, когда все отражения происходят в одной и той же фазе и гребни всех волн, так же как и впадины, в точности совпадают

ный—если под ней. Вообще говоря, сумма этих величин будет равна нулю, потому что среди миллионов отрезков различной величины одинаковое количество их придется над горизонтальной осью и под ней. Это значит, что отраженного пучка, вообще говоря, не получается: элементы, составляющие его, взаимно уничтожаются. Есть одно исключение из этого правила. Если запаздывание равно в точности одной длине волны, двум, трем или вообще любому целому числу волн, то одинаковые точки кривых, изображенных на рис. 106, располагаются в точ-

ности друг под другом, и тогда сумму можно заменить умножением одной из этих кривых на их число, а так как последнее весьма велико, то и отражение получается интенсивным. Разумеется, количество отраженной энергии не может превышать количества падающей; вычисление показывает, что в пределах весьма малого угла, расположенного по обе стороны от направления отраженной волны, отражение полное.

Величина запаздывания зависит от двух факторов: от угла, под которым лучи падают на кристалл, и от расстояния смежных слоев. Если лучи падают почти перпендикулярно слоям, отставание равно удвоенному расстоянию между соседними слоями и имеет наибольшее значение. Чем более наклонно падают лучи, тем меньше отставание; при скользющем падении оно делается весьма малым. Таким образом, если только длина волны не слишком велика, всегда должен найтись такой угол падения, при котором отставание в точности равно целому числу длин волн; эти углы отражения сильно отличаются от остальных.

Если падающие лучи содержат только одну длину волны, мы должны поворачивать кристалл до тех пор пока угол падения не примет соответствующего значения. В случае, когда угол падения имеет определенное значение, мы можем получить отражение, если пустим на кристалл пучок лучей, состоящий из многих длин волн. При этом отразятся только лучи с определенной длиной волны, тогда как остальные пройдут сквозь кристалл.

Покойный лорд Релей однажды показал на одной из своих лекций аналогичный акустический опыт. Благодаря тому, что масштаб в этом случае значительно больше, чем в опыте с рентгеновскими лучами и кристаллом, он помогает нам наглядно понять явления, происходящие в последнем случае. Звуковые волны очень высокого тона получают при помощи свистка, служащего охотникам для подражания птичьему крику. Волны имеют при этом длину около 3 см, т. е. они значительно короче, чем длина волны звуков обычного разговора, но в сотни миллионов раз длиннее эфирных волн рентгеновских лучей. Этот звук настолько высок, что многие люди, особенно пожилые, не слышат его.

Ряд квадратных муслиновых экранов, около 1 дм^2 каждый, располагают параллельно друг другу на приспособлении, напоминающем старинные щипцы для свечей, позволяющем менять взаимное расположение экранов, оставляя их равноотстоящими. Экраны соответствуют кристаллическим слоям, изображенным на рис. 105; каждый из них отражает лишь небольшую часть падающей звуковой волны, а все остальное пропускает.

Если теперь свисток и систему экранов расположить так, как представлено на фотографии табл. XIX С, звук отражается. Наличие отраженных звуковых волн очень легко обнаружить „чувствительным пламенем“. Последнее представляет язык горящего газа, выходящего под большим давлением через маленькое отверстие из длинной тонкой трубки. Давление подбирается таким, чтобы пламя только начинало становиться подвижным; при этом высокие звуки заставляют его резко сокращаться и менять форму весьма причудливым образом. Причина этого явления заключается в быстром изменении давления, происходящем под действием звуковых волн. Чувствительное пламя помещено таким образом, что оно может реагировать только на отраженные волны, будучи защищено от непосредственного действия свистка.

При этом оказывается, что если постепенно увеличивать при помощи „щипцов“ взаимное расстояние экранов, пламя оказывается последовательно то прыгающим, то спокойным, свидетельствуя тем самым о появлении и исчезновении отраженных звуковых волн. Этот факт аналогичен рассмотренным выше явлениям, сопровождающим отражение рентгеновских лучей. Когда пламя начинает волноваться, это значит, что отражения от всех экранов происходят согласованно, что случается, когда расстояния, между ним, соответствуют отставанию волн, отраженных смежными экранами, на целое число длин волн.

Ралей пользовался этой аналогией для объяснения яркой окраски кристаллов бертолетовой соли. Эти кристаллы имеют особое строение, представляющее последовательный ряд слоев кристаллического вещества, отличающихся только ориентацией оси. Толщина каждого слоя — порядка длины волны видимого света. Она в тысячи раз меньше промежутков между муслиновыми

экранами, но во столько же раз больше расстояния между элементарными слоями кристалла. Одно и то же объяснение применимо ко всем трем рассмотренным явлениям.

Прежде чем рассмотреть опыт Лауэ, мы коснемся еще одного пункта. Следует иметь в виду, что разбить кристалл на параллельные слои можно бесчисленным количеством способов. Пусть, например, рис. 107 представляет расположение ячеек в кубическом кристалле; на этом плоском рисунке изображено только сечение такого кристалла. Можно рассматривать слои, параллельные ab , и при падении на кристалл рентгеновских лучей будет иметь место частичное отражение, соответствующее этим слоям.

Из первоначального пучка, содержащего некоторую область длин волн, в направлении Y будут отражены только те лучи, для которых отставание равно целой длине волны; это отставание, как мы уже указывали, зависит от расстояния между смежными кристаллическими слоями и от угла падения лучей.

Тот же кристалл можно разбить на слои, пересекающие плоскость чертежа по прямым, параллельным cd . В этом случае мы найдем, что отражение происходит по другому направлению и отраженные лучи имеют другую длину волны. Отраженный луч идет в направлении Z и оставляет на фотографической пластинке новое пятно.

Таким образом одновременно имеет место много отражений, и каждое из них оставляет свой след на

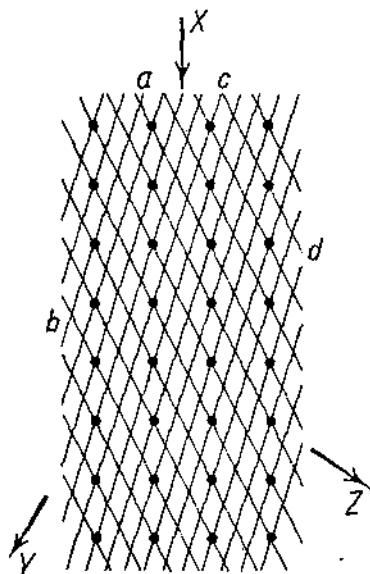


Рис. 107. Точки изображают ячейки кубического кристалла. Масштаб равен приблизительно 100 000 000 : 1. Стрелка X указывает направление падающих рентгеновских лучей. Отражение происходит от плоскостей, параллельных ab , в направлении Y , и от плоскостей, параллельных cd , в направлении Z , кроме того волны отражаются и в других направлениях, не показанных на чертеже

фотографической пластинке. Если кристалл имеет кубическое строение, а падающие лучи параллельны одной из граней кубической ячейки, фотография получится симметричной относительно двух перпендикулярных прямых. Такая фотография представлена на табл. XIX А. Если же кристалл имеет гексагональное (шестиугольное) строение, получается шестисторонняя фигура, изображенная на табл. XIX В. Полное согласие между экспериментальными фактами и теоретическими расчетами доказывает правильность основной гипотезы. Рентгеновские лучи могут считаться эфирными волнами с таким же правом, как и лучи видимого света.

Две приводимые фотографии Лауэ (табл. XIX) сильно отличаются друг от друга; это является примером значительного разнообразия получаемых таким образом следов. Каждый кристалл оставляет на пластинке свой паспорт. В некоторых случаях по этой характерной картине очень легко судить о строении кристалла, в других — задача представляет известные трудности; в большинстве случаев этих данных бывает вполне достаточно для требований современной техники. Так как каждое твердое вещество содержит кристаллические элементы, а многие из них являются совокупностью кристаллов, то понятно, каким образом строение этих кристаллов часто позволяет объяснить различные свойства вещества. Примеры строения кристаллов приведены на таблицах XX А, В.

Детальное рассмотрение этого вопроса не входит в нашу задачу. Оно представляет значительные трудности, потому что в настоящее время в этой области известно огромное количество фактов и требуется глубокое знакомство с предметом, для того чтобы его можно было изложить в соответствующем объеме. Для нас важно, что рентгеновские лучи являются эфирными волнами; это можно считать доказанным.

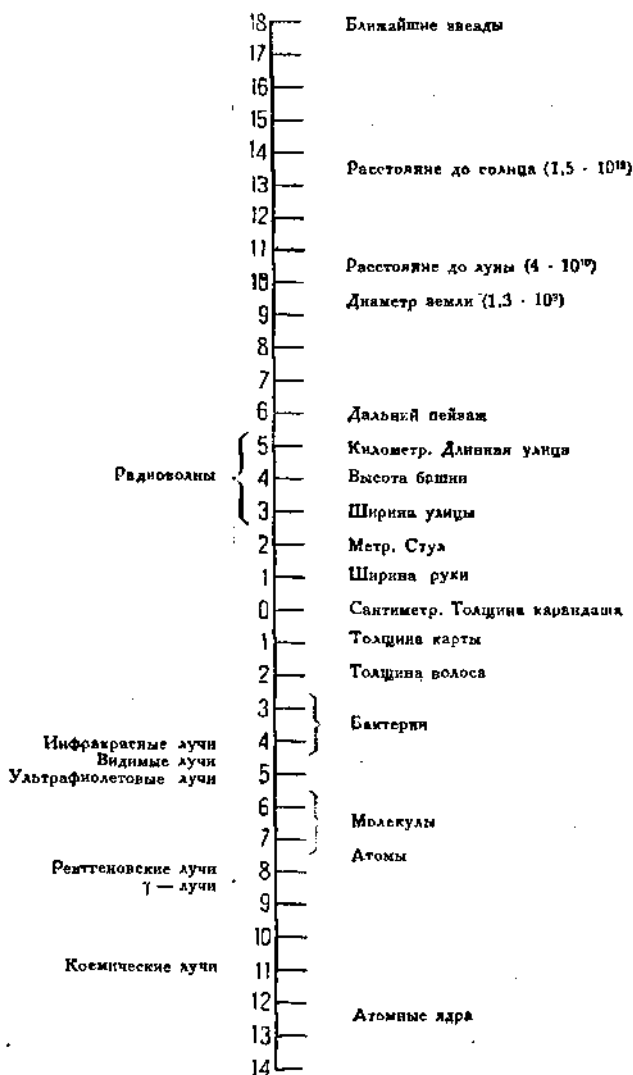
Ту же природу имеют некоторые лучи, испускаемые радиоактивными веществами. Они называются гамма-лучами. Вскоре после открытия Лауэ было показано, что гамма-лучи отражаются от кристалла каменной соли совершенно так же, как рентгеновские лучи. Следовательно, раз последние являются эфирными волнами, то и гамма-лучи также являются эфирными волнами. Они

обладают гораздо большей проникающей способностью, чем рентгеновские лучи, и без заметного ослабления проходят сквозь сантиметровые слои свинца.

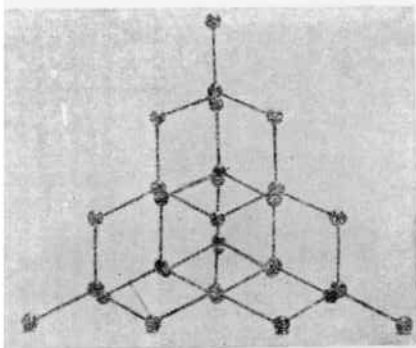
На другом конце шкалы длин волн находятся волны, применяемые в радиотехнике. Они могут быть получены при помощи электрических приборов. Кларк Максвелла доказал, что они имеют ту же природу, что и свет. Он вычислил скорость этих волн и нашел ее тождественной со скоростью света. Вскоре после этого на основе представления о свете, как об электромагнитном возмущении, было сделано много теоретических предсказаний, подтвержденных на опыте.

Таким образом мы приходим к заключению, что эфирные колебания могут иметь самую разнообразную длину волны. Мы начинаем с больших волн, применяемых в радиотехнике, имеющих длину в сотни метров; их получают электрическим путем. Уменьшая размеры электрических генераторов, можно соответственно укоротить длину волны, и таким образом получают волны длиной в 2 или 3 см. Ниже этой длины волны в спектре имеется пробел, существование которого объясняется часто техническими трудностями получения коротких радиоволн¹, но мы схватываем нить снова, когда подходим к колебаниям, называемым инфракрасными лучами, длина волны которых составляет несколько десятитысячных долей сантиметра. Затем следует видимая область спектра, о которой мы, естественно, знаем больше, чем об остальных. Она очень узка: крайние красные лучи имеют длину волны около одной десятитысячной доли сантиметра, а крайние синие — примерно в два раза меньше. Весь видимый спектр заключен в пределах одной октавы. Следующими идут ультрафиолетовые лучи, под которыми обычно понимают лучи, непосредственно примыкающие к видимым. Они простираются неопределенно далеко в сторону коротких волн примерно до длины волны, равной одной соты тысячной сантиметра. После ультрафиолетовых лучей идет область спектра, изучение которой

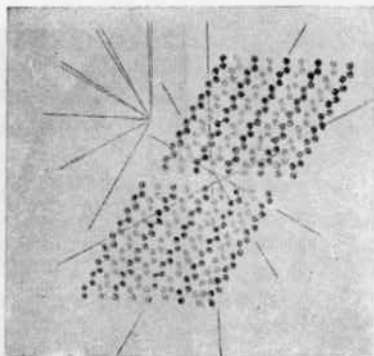
¹ Советские ученые Глаголева-Арнадьева и Левитская независимо друг от друга получили эти промежуточные волны. Однако до сих пор их еще не удавалось наблюдать монохроматическими. (Прим. перев.)



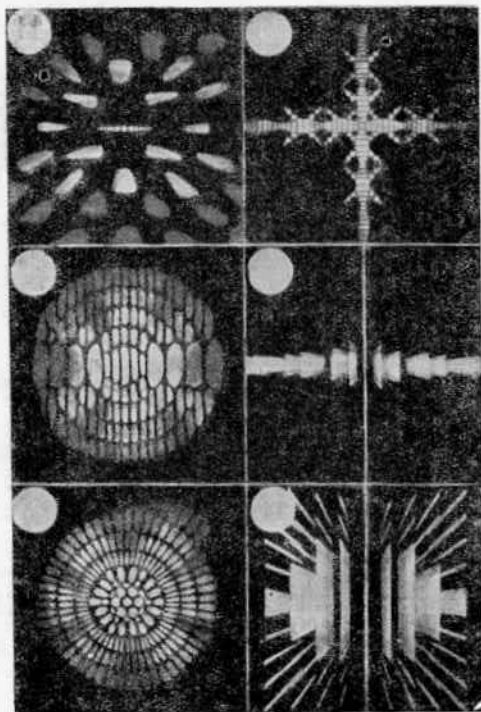
Эта таблица показывает относительные размеры различных предметов, видимых и измеряемых нами. Она похожа на ряд полок, на которые мы ставим образчики предметов и величин начиная от очень больших и кончая очень малыми. На средней полке, отмеченной ну-



А. Модель, показывающая строение алмаза. Шарики представляют атомы углерода в отношении их взаимного расположения, но не формы и размеров. Расстояние между центрами соседних атомов составляет $1,54 \text{ \AA}$ (стр. 206).



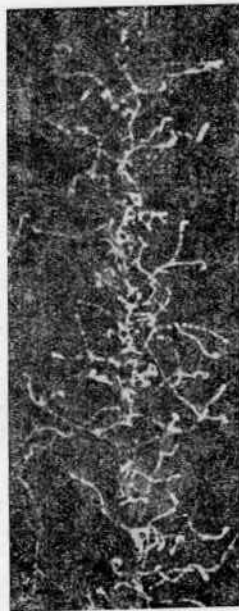
В. Расположение молекул в кристалле стеариновой кислоты. Каждый зигзаг представляет атомы углерода одной молекулы. Расстояние между центрами соседних атомов углерода равно, как и в алмазе, $1,54 \text{ \AA}$. Масштаб моделей А и В — различный. Крайние группы и атомы водорода не изображены.



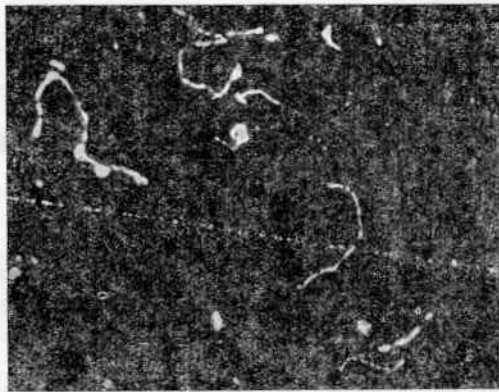
С. Оптические дифракционные спектры, зарисованные Фраунгофером. Во всех изображенных случаях свет дифрагировал при прохождении сквозь экран, содержащий правильно расположенные маленькие отверстия, именно сквозь птичье перо. Оригинальные рисунки раскрашены; приводимая репродукция не передает окраски. Эти оптические спектры сходны с рентгеновскими, изображенными на табл. XIX А, В (стр. 195).



А. Следы альфа-частиц — атомов гелия, — летящих прямолинейно почти на всем протяжении снимка. Капли тумана столь многочисленны и расположены так тесно, что следы кажутся непрерывными светлыми линиями. Частицы, следы которых видны на фотографии, выделены из радиоактивного вещества (стр. 226).



В. Следы, появившиеся под действием рентгеновских лучей. Сами лучи совершенно не оставляют следов. В данном случае они проходили слева направо узким пучком посредине снимка, но никаких линий, напоминающих табл. XXI С, не появилось. Следы, которые видны на этой фотографии, принадлежат электронам, вырванным из атомов рентгеновскими лучами. Характерна извилистость их траекторий; электроны в отличие от альфа-частиц слишком легки, чтобы двигаться прямолинейно, при встрече с атомами они отклоняются от своего пути. Это служит иллюстрацией того, что рентгеновские лучи, возникающие под действием летящих электронов, в свою очередь вызывают движение положительных ионов (стр. 226).



С. Здесь представлено несколько отдельных следов, некоторые из них принадлежат очень быстрым электронам — бета-лучам, — летящим в пределах небольшой части пути, видной на снимке, прямолинейно. Рентгеновские лучи проходят сверху вниз. Один из следов держит так мало капель, что он едва виден (стр. 226).]

весьма затруднительно, потому что эти лучи очень сильно поглощаются в воздухе и их исследование приходится производить в пустоте. Перекинуть мост через эту часть спектра и достигнуть рентгеновских лучей, следующих за ней, было очень трудно, но тем не менее это было сделано за последние годы. Область рентгеновских лучей легко поддается изучению, с помощью новых методов, основанных на применении естественных кристаллических решеток. Затем мы переходим к гамма-лучам, обладающим большей проникающей способностью, чем рентгеновские, и к предполагаемым „космическим“ лучам, попадающим к нам, повидимому, из мирового пространства, обладающим огромной проникающей силой и которые, возможно, родственны гамма-лучам. Все длины волн удобно расположить в виде таблицы, в которую для сравнения помещены размеры различных объектов.

ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИН ВОЛН

Краткий обзор спектра эфирных волн мы закончим описанием методов, с помощью которых измеряют различные длины волн. Большинство этих способов основано на применении дифракционной решетки, описанной на стр. 114. Когда световой луч падает перпендикулярно на решетку, появляются дифракционные световые пучки, составляющие с центральным углом, зависящие от отношения длины волны к расстоянию между штрихами решетки. Решетку изготовляют на делительной машине, и число штрихов в 1 см, зависящее от установки машины, всегда точно известно. Следовательно, измерение угла

лем, у нас находится сантиметр, а толщина карандаша является примером предмета приблизительно этой величины. На полке повыше находятся предметы, величина которых порядка сотни сантиметров, как, например, малые предметы домашней обстановки. Ширина улицы представляет тысячу сантиметров, высота башни может быть равна десяти тысячам сантиметров, или ста метрам, и т. д. Ниже нулевой полки идет сначала полка, на которой находятся предметы, толщина которых порядка 1 мм, как, например, карта, на следующей полке — волос и т. д. Бактерия находится на различной высоте, на третьей и четвертой полке книзу, молекулы на шестой и седьмой, атомы еще ниже. По другую сторону вертикальной линии приведены точно так же различные длины волн. Расстояния иногда даны числами. Расстояние от Солнца составляет пятнадцать миллионов сантиметров, или, как это принято писать, $1,5 \times 10^{13}$ см. Оно находится на тринадцатой полке вверху.

отклонения дифракционных пучков позволяет легко вычислить длину волны.

Дифракционные решетки применяют также при исследовании инфракрасных и ультрафиолетовых и даже рентгеновских лучей. Применить решетку для измерения длины волны рентгеновских лучей удалось лишь недавно. Первые измерения были сделаны с помощью кристалла, играющего роль дифракционной решетки. Как только стало известным строение простых кристаллов, вроде каменной соли или кальцита, можно было вычислить расстояние между соседними элементарными ячейками кристаллов. Веса атомов известны с достаточной точностью из химических и физических соображений. В каменной соли атомы расположены прямолинейными рядами, а так как вес 1 см^3 кристалла известен, так же как и атомные веса натрия и хлора, то отсюда можно вычислить расстояние между ячейками. Наблюдая отражение пучка рентгеновских лучей от кристалла (рис. 105) и измеряя угол отражения, можно вычислить длину волны лучей. Более полные данные об этих измерениях можно найти в книгах, описывающих новые методы исследования.

Недавно удалось получить дифракцию рентгеновских лучей с помощью обычной решетки. Для этого необходимо, чтобы лучи падали очень наклонно, так как длина волны очень сильно отличается от расстояния между двумя смежными штрихами искусственной решетки. Вспомним, что такой дифракционный опыт когда-то казался безнадежным, вследствие чего Лауэ и воспользовался кристаллом. Попытки в этом направлении делались с целью доказать тождество природы рентгеновских лучей и света, и в конце концов они увенчались успехом. Возможно, что этот новый метод даже точнее, чем дифракция в кристалле, и во всяком случае он более прямой. Интересно отметить, что сравнение различных длин волн рентгеновских лучей при помощи дифракции в кристаллах является более точным измерением, чем измерение длин путем сравнения с эталоном. Длины волн гамма-лучей также определяют при помощи дифракции в кристаллах. Остаются лишь радиоволны, длину которых можно определить, находя их частоту, т. е. число колебаний в секунду. Скорость всех эфирных волн известна, и, таким образом, по частоте вычисляют длину волны.

Глава IX

ВОЛНЫ И ЧАСТИЦЫ

В предыдущей главе мы видели, что нашему эксперименту доступна широкая область эфирных волн. Некоторые из них, лежащие в очень узкой области, видимы нашим глазом; другие могут быть обнаружены по их действию на фотографическую пластинку. Радиоволны, самые длинные из всех, могут быть обнаружены при помощи системы электрических приборов, составляющих радиоприемник. Ниже мы рассмотрим другие методы обнаружения радиации.

Характерные явления, которые привели нас к мысли, что видимый свет можно рассматривать как волновое движение в эфире, наблюдаются у всех видов излучения; в особенности это относится к дифракции, с которой мы встречались неоднократно. Можно ожидать, что и другие явления, если они обнаруживаются у одного вида излучения, должны в большей или меньшей степени иметь место у остальных.

Существует одно явление, которое весьма заметно проявляется у излучений с короткой длиной волны и в гораздо меньшей степени у лучей с большей длиной волны; оно называется фотоволновым эффектом (или фотоэффектом). В объяснении этого явления волновая теория, так хорошо служившая нам до сих пор, оказывается бессильной. Этот факт вместе с другими, связанными с ним, показывает, что наша волновая гипотеза недостаточно полна; фотоэффект был одним из тех явлений, которые привели современную физику к любопытному положению, и в 1905 г. Эйнштейн высказал мысль, что корпускулярная теория была оставлена слишком поспешно.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Сущность фотоэффекта весьма проста. Когда свет попадает на какое-нибудь вещество, атомы последнего начинают испускать электроны, отчего это явление и получило свое название. Благодаря тому, что рентгеновские лучи и гамма-лучи также могут быть причислены к свету, название „фотоэффект“ относится и к аналогичному явлению, происходящему под действием этих лучей. Так как испускание электронов под действием рентгеновских и гамма-лучей заметно особенно сильно, то гораздо проще изучать фотоэффект, пользуясь этими короткими волнами. Отметим, что фотоэффект заметен и при других длинах волн и если мы предпочитаем изучать фотоэффект при помощи лучей с малой длиной волны, а не при помощи видимых лучей, то исключительно потому, что это легче, хотя фотоэффект для видимого света был известен еще до открытия рентгеновских лучей.

Для получения общего представления о фотоэффекте, легче начать с рассмотрения процесса возникновения рентгеновских лучей в рентгеновской трубке, а затем проследить и дальнейший путь.

Основными элементами рентгеновской трубки (рис. 108) являются: а) сама трубка, чаще всего стеклянная, и б) два металлических электрода: катод и бомбардируемый электронами анод (положительный электрод), или антикатод, или еще иначе „мишень“.¹

Мы уже встречались с некоторыми явлениями, происходящими при пропускании электрического разряда через такую трубку, когда воздух почти полностью выкачан из нее. Из катода вылетает тогда поток электронов наподобие водяной струи из трубы. Электроны двигаются прямолинейно, но могут быть отклонены магнитом; они обладают механическим действием и при ударе нагревают предметы, находящиеся на их пути. Эти предметы начинают испускать рентгеновские лучи, исходящие из того места, где электронный пучок встречает препятствие.

¹ В английской и американской литературе антикатод часто называют „мишенью“ (target). Мы будем пользоваться этим термином, хотя и не принятым у нас, но очень хорошо выражающим роль антикатада в рентгеновской трубке. (Прим. перев.)

Траектория катодных лучей не зависит от расположения положительного электрода, и если анодом пользуются и в качестве антикатада, то его помещают в таком месте, чтобы поток электронов ударялся в него, откуда и происходит название „мишень“. Отдельный положительный электрод может с первого взгляда показаться излишним, однако в действительности это не так, ибо он играет существенную роль в электрической схеме. Он сообщает положительный заряд тем атомам и молекулам, которые являются носителями этого заряда (ионам); будучи сравнительно массивными, эти частицы не могут приобрести такой скорости, как электроны катодного пучка. Последний имеет замечательно отчетливые границы и, покидая катод, обладает резкой направленностью. Когда в трубке имеется небольшое количество газа, пучок становится видимым вследствие столкновений летящих электронов с молекулами газа. Его след представляет тогда тонкий светящийся луч. Опыты показывают, что вид пучка сильно зависит от формы трубки и катода и еще

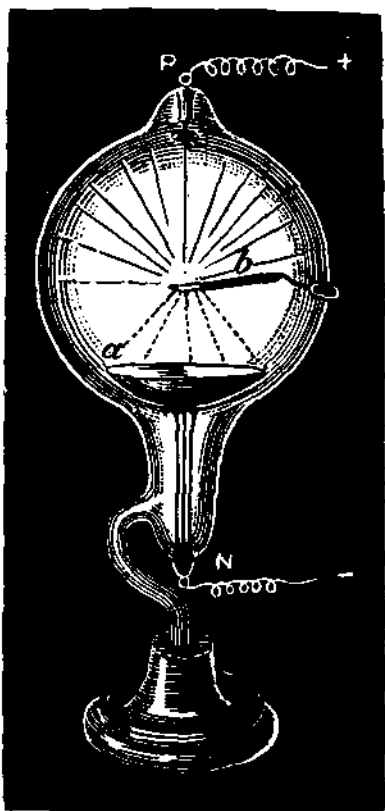


Рис. 108. Этот рисунок, так же как и 96, 97, 98 и 99, представляет собою иллюстрацию к докладу Крукса, представленному в 1879 г. Королевскому Институту. Стекло-вая колба сделана сферической; отрицательный полюс, или катод, находится внизу; сверху имеется положительный электрод, однако его положение несущественно. Платиновая проволока *b* является мишенью; она могла бы служить одновременно и анодом. Вогнутый катод концентрирует катодный пучок на мишени. Крукс пишет: „Платиновая проволока не только накаляется добела, но можно видеть выбрасываемые ею искры, показывающие, что она плавится“. Этот опыт был произведен, для того чтобы показать выделение тепла, тогда еще не было известно, что при этих условиях платина испускает рентгеновские лучи, открытые двадцатью годами позже. Колба, изображенная на рисунке, имеет высоту около 15 см

больше от присутствия электрических зарядов, скопляющихся на стенках трубки.

Крукс предполагал, что катодный пучок состоит из „лучистой материи“, испускаемой катодом.

Это представление было отвергнуто, потому что оказалось, что когда пучок встречает тонкую стенку трубки, он проходит сквозь нее и выходит в воздух, оставаясь слабо заметным в темной комнате. Такая же проникающая способность обнаружилась, когда на пути лучей внутри трубки поместили очень тонкий экран. На основании этого пришли к заключению, что лучи не могут являться частицами, несущими электрические заряды, как это предполагал Крукс, но должны иметь волновую природу. В то время не считалось возможным, чтобы какие-нибудь частицы могли проходить сквозь слой вещества, хотя бы и тонкий. Однако Крукс не ошибался; это было установлено Дж. Дж. Томсоном, который доказал, что катодный пучок состоит из отрицательных „корпускул“, как они им были вначале названы, или электронов, как их назвали впоследствии. Томсон измерил заряд электрона и его массу и показал, что при всех условиях в рентгеновских трубках любого типа эти величины получаются одинаковыми. Масса электрона оказалась весьма малой: масса водородного атома, считавшегося до этого самой маленькой частицей, превышает массу электрона в 1845 раз. Универсальность электрона заставляет считать его элементом, входящим в состав всех атомов; как теперь установлено, атом, находящийся в нормальном состоянии, должен состоять из положительного ядра и некоторого количества электронов, нейтрализующих положительный заряд ядра.

Скорость электронов, вылетающих из катода, определенная электрическими и магнитными методами, оказалась, как и следовало ожидать, тем большей, чем выше электрическое напряжение, приложенное к трубке. Для большей точности можно пояснить это техническим языком: разности потенциалов в 10 вольт соответствует скорость электронов, составляющая 0,01 скорости света; 1000 вольт — около 0,1, а разности в 100 000 вольт соответствует скорость электронов, немного меньшая скорости света. Однако скорость электронов никогда не превышает скорости света; при повышении напряжения она

растет все медленнее и медленнее, приближаясь к предельному значению (равному примерно 300 000 км в секунду).

Современные рентгеновские трубки — прекрасно разработанные приборы. Их основные элементы остались прежними, хотя практика показала, что конструкция играет большую роль. У нас нет необходимости входить в эти подробности.

ПРОЦЕСС ВОЗНИКНОВЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

Мы должны теперь рассмотреть, как возникают рентгеновские лучи. Как мы уже упоминали, Рентген первый обнаружил их существование и показал, что они исходят от того места, в котором катодный пучок встречает стенку трубки или вообще какую-нибудь преграду, помещенную на его пути. Энергия пучка катодных лучей при этом частично превращается в энергию рентгеновских лучей, но большая часть энергии катодного пучка превращается в тепло, выделяющееся в том месте, где пучок ударяется в препятствие; в некоторых трубках это тепло выделяется в таком большом количестве, что стеклянная стенка размягчается и продавливается атмосферным давлением внутрь, если своевременно не выключить ток. Мишени обычно делаются массивными, из металлов с большим атомным весом, например, из платины или вольфрама, но даже такие мишени накаляются докрасна, если в конструкции трубки не предусмотрено водяное охлаждение.

Перейдем теперь к самим рентгеновским лучам, исходящим от того места мишени, в которое ударяется пучок электронов. Для их обнаружения и измерения интенсивности пользуются фотографической пластинкой. Как мы уже отмечали, очень просто установить, что они распространяются прямолинейно и проходят сквозь различные вещества, продолжая и после этого двигаться прямолинейно. Оказалось, что проникающая способность рентгеновских лучей сильно зависит от условий, при которых они возникают. Чем быстрее двигаются электроны в катодном пучке, тем сильнее проникают рентгеновские лучи, возникающие под действием этих электронов. Их качество в некоторых пределах зависит также

от природы мишени, стоящей на пути электронов. Чем больше ее атомный вес, тем больше содержится сильно проникающих лучей в общем „спектре“ рентгеновского излучения; в то же время для того, чтобы получить от какой-нибудь мишени сильно проникающие рентгеновские лучи, электроны должны обладать достаточной скоростью. В медицинских рентгеновских трубках мишень делают обычно из вольфрама; в трубках для исследования кристаллов чаще пользуются медными или железными мишенями, потому что в этом случае необходимы менее проникающие, или „мягкие“ лучи.

Проникающая способность рентгеновских лучей заставляет прибегать к ним для различных практических целей многих исследователей, в том числе врачей и хирургов.

Слишком „мягкие“ лучи, обладающие недостаточной проникающей силой, не позволяют хирургу просветить пораженную часть организма. Лучи не проходят сквозь ткани достаточно хорошо, и на фотографической пластинке тени от тканей получаются почти такими же, как и от костей. Когда повышают напряжение на трубке, скорость электронов увеличивается, и лучи делаются более проникающими; тени от тканей значительно ослабляются, тогда как кости, содержащие кальций и другие тяжелые атомы, все еще поглощают лучи настолько сильно, что их тени хорошо выделяются внутри слабого силуэта тканей. Если вольтаж слишком велик, то кости начинают просвечивать слишком сильно, и их тени становятся также слабыми.

При помощи кристаллического анализа легко показать, что проникающая способность рентгеновских лучей непосредственно связана с длиной их волны. Увеличение скорости электронов, вызывающих появление лучей, связано с уменьшением длины волны последних. В то же время, если увеличивать интенсивность катодного пучка, т. е. количество электронов, ударяющихся в мишень в 1 сек, то интенсивность рентгеновских лучей будет тоже возрастать. Фотографическая пластинка, подверженная их действию, будет чернеть быстрее. Но качество рентгеновских лучей, или, другими словами, длина их волны, совершенно не зависит от числа электронов в катодном пучке, а только от их скорости. Число электро-

нов определяет интенсивность лучей, а их скорость — длину волны.

Теперь мы подходим к фотоэлектрическому эффекту. Рентгеновские лучи заставляют все тела, на которые они падают, испускать электроны. При этом лучи теряют свою энергию. Это явление сказывается не на всем теле в целом, а лишь на отдельных составляющих его атомах. Таким образом лучи имеют дело с индивидуальными атомами; их фотоэлектрическое действие не зависит от того, каким образом атомы связаны в молекулы, а последние в твердое тело. Пучок рентгеновских лучей, падающий на какой-нибудь атом, имеет некоторые шансы подействовать на него и вырвать электрон. Однако эта вероятность обычно весьма мала; энергия лучей растрачивалась бы очень быстро, если бы фотоэлектрический эффект имел место при встрече с каждым атомом. На одну „удачную“ встречу приходится миллионы миллионов „неудачных“. Но какова бы ни была величина вероятности этой встречи, она не зависит от взаимодействия данного атома с другими. Конечно, это не может быть справедливым для всех длин волн; нам хорошо известен тот факт, что поглощение света очень сильно зависит от химического состава вещества. Однако в случае рентгеновских лучей этим явлением можно пренебрегать, ибо известны лишь немногие примеры влияния химического состава, и они чрезвычайно редки, а само явление, когда оно есть, настолько мало, что его даже трудно наблюдать.

Если мы включим в понятие „вырывание электрона“ также те случаи неполного вырывания, в которых действие рентгеновских лучей сводится лишь к смещению электрона из данного его положения в атоме в другое, внутри того же атома, то мы перечислим практически все действия, которые вызывают рентгеновские лучи. Они не влияют на вещество никак иначе и их действие больше никак не проявляется.

Подобно тому как летящие в рентгеновской трубке электроны вызывают появление рентгеновских лучей, так и рентгеновские лучи в свою очередь приводят электроны в движение. Падая на фотографическую пластинку, они вызывают перемещение электронов, которое является сущностью химического процесса, происходящего в плас-

тинке. Когда лучи проникают в человеческое тело, их действие на ткани также заключается в смещении электронов. Дело происходит так, как если бы тело подвергалось обстрелу разрывными пулями.

ОПЫТ ИННЕСА

Чрезвычайно интересно знать, какими скоростями обладают электроны, вырванные из атомов рентгеновскими лучами. Уже давно

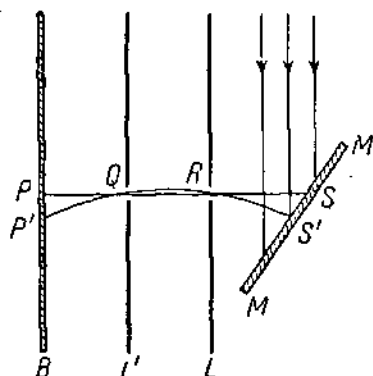


Рис. 109. Принцип опыта Иннеса

делались попытки ответить на этот вопрос. Одна из первых принадлежит Иннесу. Предложенный им в 1907 г. метод был весьма прост. Рентгеновские лучи падают на пластинку MM какого-нибудь вещества (рис. 109), и вырванные электроны летят по всем направлениям. На их пути помещают два экрана L и L' с маленькими отверстиями R и Q . Электроны, прошедшие сквозь эти отверстия, попадают на фото

графическую пластинку P , причем линия PQR — прямая. На рис. 109 показано расположение пластинки и экранов, но на нем не изображены детали, обычно необходимые при работе с чувствительными фотографическими пластинками

Как мы уже указывали, пучок электронов можно отклонить магнитом. При этом траектории электронов делаются круговыми, и пучок стремится повернуться вокруг собственного направления. Величина искривления зависит, с одной стороны, от силы магнита, и с другой — от заряда, скорости и массы носителей электрического заряда. Иннес знал заряд и массу электрона, измеренные Дж. Дж. Томсоном; он не ошибался, предполагая что в этом случае носителями зарядов были именно электроны. Иннес поместил магнит в определенном месте своей установки. Электронный пучок, оставлявший след

на пластинке, в присутствии магнита уже не был прямолинейным; в этом случае траектория представляла кривую $S'RQP'$, являвшуюся другой окружности. Измеряя положение R , Q и P' Иннес находил радиус этой окружности.

Так как сила магнита ему была известна, он мог вычислить единственную величину, остававшуюся неизвестной — скорость электронов.

Эти наблюдения позволили обнаружить факт первоочередной важности. Оказалось, что электроны летят с огромными скоростями, сравнимыми со скоростями электронов в самой рентгеновской трубке. При этом скорость электронов не зависит от интенсивности рентгеновских лучей, что было установлено рядом измерений, произведенных при различных расстояниях рентгеновской трубки от пластинки MM . Даже при удалении трубки в восемь раз, что соответствовало уменьшению интенсивности в 64 раза, не наблюдалось изменения положения пятна P' . Конечно, для того чтобы при этом на пластинке получилось заметное почернение, требовались более длинные экспозиции, но этого и следовало ожидать, ибо электронный пучок значительно ослаблялся. Число электронов уменьшалось, но их скорость оставалась неизменной.

В то же время оказалось, что если электроны в рентгеновской трубке летят быстрее, что сопровождается увеличением проникающей способности лучей, электроны, наблюдаемые в опыте Иннеса, также оказываются более быстрыми.

Вещество пластинки MM играло при этом некоторую роль, однако незначительную. Увеличение атомного веса материала пластинки, например, замена серебра золотом, вызывало появление в общем потоке некоторого количества более быстрых электронов. Электроны, вылетающие из пластинки MM , в действительности имеют разнообразные скорости, находящиеся в некоторых пределах, из которых нижний приблизительно на 20% меньше высшего; при замене серебряной пластинки золотой нижний предел оставался неизменным, тогда как верхний несколько повышался. Сравнение с другими опытами позволило приписать этот факт вторичным явлениям. Справедливость этого заключения теперь доказана.

Выводы Иннеса при повторении его опыта другими исследователями были подтверждены.

Все явление представляется сравнительно простым. Электроны влетают в мишень рентгеновской трубки, скажем, с определенной скоростью, хотя на самом деле эту скорость трудно ограничить узкими пределами. Сейчас же начинается испускание энергии в виде рентгеновских лучей, проходящих сквозь стенки трубки во внешнее пространство. В конце концов появляются вырванные лучами фотоэлектроны, летящие со скоростями того же порядка, но несколько меньшими, что и первоначальные. Дело происходит так, как если бы электронный пучок исчезал в трубке и снова появлялся в другом месте вне ее; конечно, мы не можем предполагать, что в обоих явлениях участвуют одни и те же электроны. К сожалению, мы не можем их отметить, как это можно сделать с потоком воды, окрасив ее. Материалы, из которых сделаны трубка и пластинка ММ, и все расположение опыта сказываются на результатах лишь незначительно или даже совсем не влияют на них. Вначале мы имеем электроны, летящие с некоторой скоростью в одном месте, и в конце концов получаем почти такие же быстрые электроны в другом месте.

Вообразим себе весь процесс сильно увеличенным; это поможет нам составить представление об относительных размерах электронов и атомов и о масштабе этого опыта. Предположим, что мишень рентгеновской трубки, увеличенная в 100 млн. раз, сделалась сравнимой с луной. Электроны, бомбардирующие ее, останутся при этом невидимыми невооруженному глазу. Расстояние Луны от Земли будет примерно соответствовать расстоянию, на котором при обычных условиях находится рентгеновская трубка от наблюдателя. Атом будет при этом иметь размеры вишни или сливы. Луну осыпают чрезвычайно мелкие невидимые частицы, представляющие электроны. Тотчас же такие же частицы начинают вырываться из различных мест Земли: одна, скажем, из камня на одной из вершин Анд, другая из капли воды Индийского океана, третья из листка какого-нибудь дерева в Англии и т. д. Эти отдельные события происходят абсолютно независимо одно от другого. При этом какова бы ни была скорость частиц, обстреливающих Луну, вторичные час-

тицы обладают той же скоростью, меняющейся при изменении скорости первичных частиц.

Совершенно ясно, что объяснение этих фактов находится за пределами возможностей волновой теории, как мы ее представляли себе до сих пор; упомянутые выше странные явления никак не вяжутся с обычными свойствами волнового движения. Особенно трудно объяснить передачу энергии из одного места в другое. Мы не можем себе представить такой передачи. С первого взгляда можно, пожалуй, заключить, что энергия электрона, вырванного из атома под влиянием падающих рентгеновских лучей, берется из самого атома, и что лучи только приводят атом в действие, как мы это делаем с ружьем, нажимая его курок. Однако, если бы это было так, каждый атом выбрасывал бы свою „пулю“ с определенной, характерной для него скоростью, тогда как установлено, что скорость вторичных электронов не зависит от природы атомов, из которых они вылетели. Она зависит от качества падающих рентгеновских лучей, но невозможно себе представить, чтобы скорость пули зависела от особенностей человека, нажимающего курок.

Непригодность гипотезы „курка“ становится особенно ясной, если рассмотреть несколько отличный опыт, который можно сделать с лучами радиоактивных веществ. Эти лучи бывают трех сортов: альфа-лучи, бета-лучи и гамма-лучи. Первые состоят из потока атомов гелия. Мы ими сейчас заниматься не будем. Вторые состоят из электронов, летящих с огромными скоростями, вообще говоря, превышающими скорости электронов в рентгеновской трубке. Третьи, как мы уже указывали, представляют собою излучение, сходное по своей природе со светом и с рентгеновскими лучами; они обладают большей проникающей способностью, чем последние, и бета-лучи по отношению к ним ведут себя во многом так же, как электроны по отношению к рентгеновским лучам, возбуждаемым ими. Когда гамма-лучи падают на атомы, некоторые атомы выбрасывают электроны со скоростями, по большей части равными скоростям электронов бета-лучей, испускаемых радиоактивными элементами вместе с гамма-лучами. Повидимому, этот процесс совершенно аналогичен взаимодействию электронов с рентгеновскими лучами; в сущности говоря, это тот же самый

процесс, лишь происходящий в ином масштабе. Все, что справедливо для одного случая, должно быть справедливо и для другого.

Опыты, детали которых можно не описывать, показывают, что когда гамма-лучи возбуждают бета-лучи, последние не испускаются атомом в каком-нибудь случайном направлении, но более или менее в направлении падающих гамма-лучей. Этот факт трудно объяснить какой-нибудь теорией курка, ибо каким образом направление выстрела может зависеть от того, откуда пришел человек, случайно нажавший курок ружья?

Гипотеза курка должна быть отброшена. Рентгеновские лучи каким-то образом доставляют атому энергию, которой обладает выброшенный им электрон. Как же это происходит?

Если рентгеновские лучи считать волнами, распространяющимися из места их возникновения сферами постепенно растущих размеров, их энергия должна все больше и больше рассеиваться по поверхности этих сфер. Мы видели, что скорость, с которой летят вырванные электроны, не зависит от интенсивности рентгеновских лучей. Может быть, энергия накапливается в каждом атоме до тех пор, пока ее количество не достигнет некоторой величины, после чего происходит нечто вроде взрыва? Но, как показывает вычисление, это накопление занимало бы очень долгое время. Атом очень мал по сравнению с поверхностью сферы, по которой рассеяна энергия волны; эта энергия будет извлекаться атомом так медленно, что для накопления достаточного количества ее не хватит продолжительности жизни рентгеновской трубки. Однако рентгеновские лучи вызывают фотоэффект даже в течение весьма короткого времени. Кроме того попрежнему непонятно, почему скорость электронов совершенно не зависит от атома, выбросившего их, а только от скорости электронов в первоначальном пучке. Это затруднение видно более отчетливо, если мы опять рассмотрим явление в увеличенном масштабе. Предположим, что мы бросаем в море доску, скажем, с высоты 100 м; происходит всплеск, и на поверхности воды расходятся волны. Они проходят мимо многих лодок и кораблей без всяких последствий и, наконец, пройдя тысячи километров, натапливаются на судно, для которого их дей-

ствие оказывается злополучным; из судна вырывается доска и взлетает в воздух на высоту 90 м или 50 или 20—все эти цифры одинаково комичны. Не правда ли, эта аналогия явно непригодна для объяснения фотоэлектрического эффекта при помощи обычной волновой теории?

Избежать затруднения можно только одним путем, этот путь очень прямой и простой и объясняет все рассмотренные нами экспериментальные факты. Для того чтобы связать эти факты вместе, мы должны предположить, что рентгеновские лучи состоят из каких-то частиц, перехватывающих энергию электронов в рентгеновской трубке в тот момент и в том месте, где эти электроны сталкиваются с атомами мишени. Эти частицы обладают способностью проникать сквозь стекло трубки и другие вещества, но в конце концов, в результате одного из бесчисленных их столкновений с атомами, происходит процесс, обратный тому, который вызвал существование частиц; их энергия сообщается электронам, которые при этом выбрасываются так, как это наблюдается в опытах. При этом то обстоятельство, какой атом вызвал первое или второе явление, не должно играть роли, и скорость вторичных электронов должна быть несколько меньше скорости первичных или в некоторых случаях равна ей. Кроме того может иметь место зависимость между направлением движения рентгеновских или гамма-лучей и электронов, возбуждающих их или появляющихся в результате их фотоэлектрического действия.

Это — корпускулярная теория. Мы обнаружили явления, которые можно объяснить скорее частицами, чем волнами, так хорошо служившими нам до сих пор.

Что же представляют собой частицы, позволяющие дать объяснение этим явлениям? Много лет назад (*Philosophical Magazine*, октябрь 1907) я высказал мысль, что они могут являться „нейтральной парой“ — комбинацией электрона с некоторой положительной частицей, несущей компенсирующий электрический заряд. Можно ожидать, что такая пара, будучи незаряженной, должна проникать сквозь материю гораздо легче, чем отдельные составляющие ее частицы, потому что ее электрические и магнитные силы должны быть ограничены весьма малым радиусом действия. Я предполагал тогда, что эта пара может

состоять из элементов двух видов корпускулярных лучей радиоактивных веществ; она может содержать один электрон и один положительно заряженный атом гелия (альфа-частицу). Это предположение не казалось невероятным, потому что тогда еще не было доказано, что рентгеновские лучи имеют ту же природу, что и свет. Но когда сделалось ясно, что рентгеновские лучи являются волнами в такой же мере, как свет, а свет — частицами в той же мере, как рентгеновские лучи, стало невозможно считать свет и рентгеновские лучи отдельными явлениями, для объяснения которых можно было бы применить гипотезу нейтральной пары.

Порции энергии, которыми наделялись еще корпускулы Ньютона, называют теперь фотонами. Свет всех длин волн, рентгеновские лучи, инфракрасные лучи и т. д. можно считать потоком фотонов. Представление о нейтроне, однако, теперь не отвергается, так как недавно было доказано, что он существует в виде тесной комбинации электрона и положительно заряженной частицы — протона ¹.

КАМЕРА ВИЛЬСОНА

С помощью чрезвычайно остроумного прибора, изобретенного в 1911 г. Вильсоном, оказалось возможным проверить новым способом описанные выше результаты опытов и выводы, сделанные из них. Опыт Вильсона чрезвычайно убедителен. Он основан на некоторых физических явлениях, требующих краткого объяснения.

Прежде всего укажем, что электрон, летящий в газе, может отрывать электрон от некоторых атомов, сквозь которые или вблизи которых он проходит. Для того чтобы электрон обладал этим свойством, его скорость должна быть не ниже некоторого предела: около 100 млн. см в секунду; если он летит медленнее, то практически его движение в газе невозможно, так как он задерживается и поглощается первым же атомом, с которым сталкивается. Электроны, вырванные рентгеновскими лучами, имеют скорости, в десять или даже в сто раз превышаю-

¹ Этот взгляд на природу нейтрона не является окончательным. (Прим. перев.)

ТАБЛИЦА XXII



А. На этой фотографии узкий пучок рентгеновских лучей, проходивший справа налево, встречал медный экран. Лучи выбивали из меди облако электронов; заметно, что электроны имеют тенденцию группироваться в такое облако. С той стороны экрана, с которой рентгеновские лучи выходят из него, электронов появляется больше, чем с другой.



В. Дифракция электронов (Дж. П. Томсон). На поверхность кристалла был направлен электронный пучок; при этом пластинку располагали с таким расчетом, чтобы на нее попали дифрагированные пучки электронов (стр. 229).

щие этот предел, а освобожденные гамма-лучами—еще большие.

Первые проходят в воздухе или каком-нибудь газе при обычной температуре и давлении путь, измеряемый миллиметрами или сантиметрами, тогда как „пробег“ вторых измеряется метрами. Во всех случаях этот путь, независимо от того, длинный он или короткий, отмечен теми атомами, от которых были оторваны электроны, и другими, которыми эти вырванные электроны временно захватываются. Таким образом вдоль пути электрона появляются атомы, заряженные как положительно, так и отрицательно. Нормальное состояние восстанавливается очень быстро—атомы, обладающие лишними электронами, отдают их тем, у которых имеется недостаток отрицательного заряда. Однако в течение нескольких секунд или минут оба рода атомов существуют.

Вторая особенность этого прекрасного опыта заключается в использовании хорошо известного явления. Когда газ расширяется, то это сопровождается его охлаждением, потому что он затрачивает на расширение энергию и отдает свой запас тепла. Если газ содержит влагу, последняя стремится при этом конденсироваться. Метеорологи объясняют этим свойством образование облаков, и дождя, которое часто следует за внезапным понижением атмосферного давления.

Когда влага конденсируется, она предпочитает собираться вокруг атомов или других частиц, заряженных электричеством (ионов).

Идея опыта Вильсона теперь становится ясной. Если во влажном газе движется электрон, что сопровождается ионизацией вдоль его пути, и если газ заставляют внезапно расширяться, то влага будет прежде всего конденсироваться вдоль траектории электрона и при соответствующем освещении его след будет виден в виде белой линии на темном фоне. Таким образом пути электронов становятся видимыми.

Приборы, с помощью которых производят опыт Вильсона, крайне просты (рис. 110). Берут цилиндрическую камеру диаметром в несколько сантиметров с металлическими стенками и стеклянным верхом. Дном камеры служит поршень; он может быть выдвинут на определенное расстояние, что создает разрежение воздуха в камере

и вследствие этого его охлаждение. Воздух остается все время влажным вследствие присутствия в камере небольшого количества воды. Лучи, которые желают исследовать, либо впускают через специальное отверстие в стенке, либо получают от радиоактивных веществ, введенных внутрь камеры.

Примеры картины, получающейся в камере Вильсона приведены на табл. XXI и XXII. Характерно, что следы, появляющиеся под действием рентгеновских лучей, начинаются и кончаются внутри камеры. Их беспорядочная неправильная форма получается в результате непрерывных отклонений, которые электроны испытывают при движении в газе. Иногда они особенно резко изменяют направление движения; в этих случаях электрон проникает в атом, ударяя его почти центрально. При этом он подходит к ядру ближе, чем обычно, и тотчас отбрасывается им, как комета, прошедшая вблизи Солнца. Пунктирный характер следов получается в результате неодинакового действия электронов на атомы, подвергшиеся действию лучей. Иногда выбивается один электрон, иногда небольшая группа их из одного и того же места в камере; иногда первичный электрон выбивает только один электрон, но с такой силой, что энергии его движения хватает на отрывание от встречающихся атомов нескольких электронов. Когда электрон приближается к концу своего пути, его действие становится сильнее. Двигаясь медленнее, он дольше находится внутри атомов, пронизываемых им, и последствия столкновения оказываются более серьезными. Когда в начале своего движения электроны летят с большей скоростью, они проходят сквозь атомы очень быстро, и поэтому причиняют им меньше вреда. На следах бета-лучей, показанных на табл. XXI С, это заметно более отчетливо; их скорость в некоторых случаях так велика, что капли очень редко рассеяны вдоль пути, который оказывается при этом почти прямолинейным, и след различается с трудом. Отметим, что чем большей проникающей силой обладают рентгеновские лучи, тем длиннее следы электронов, появляющихся под их действием.

В предыдущей главе мы видели, что ультрафиолетовые лучи обладают свойством разряжать проводник, заряженный отрицательно. Это действие аналогично фоговэлектри-

ческому действию рентгеновских лучей, приводящих электроны в движение. Ультрафиолетовые лучи вырывают электроны из атомов, на которые они падают. В этом случае скорость освобожденных электронов значительно меньше, и явление наблюдается только при благоприятных условиях. Эти электроны двигаются настолько медленно, что природа вещества, на которое падают

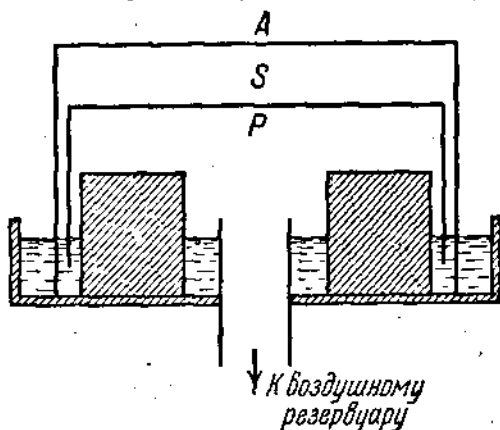


Рис. 110. Принцип устройства кюветы Вильсона. Внутри камеры, верх которой *A* сделан из стекла, движется вверх и вниз поршень *P*. Пространство под *P* соединено с воздушным резервуаром, давление в котором можно менять. Следы появляются в пространстве *S*. Оно изолировано от пространства под *P* и от внешнего воздуха слоем воды, как это делают в газометрах. Если давление под поршнем *P* немного увеличить, он поднимается в положение, изображенное на рисунке. Если после этого давление внезапно уменьшить, поршень *P* опускается и создает в *S* разрежение, сопровождающееся охлаждением. Плывущий туман выделяется вдоль траекторий электронов или альфа-частиц. При ярком освещении следы могут быть сфотографированы

лучи, имеет значение. Различные вещества обладают небольшими, но различными электрическими силами, препятствующими вырыванию электронов. Эти силы слишком малы, для того чтобы помешать действию рентгеновских лучей, но в случае видимого света они могут совершенно уничтожать фотоаффе́кт. Так, чистая поверхность цинка разряжается очень легко, но если ее продержать некоторое время на воздухе, загрязнение поверхности почти прекращает явление.

Длинные световые волны, без сомнения, обладают

теми же свойствами, что и короткие. Они также действуют на электроны, находящиеся внутри атомов, но энергии, доставляемой ими, недостаточно для вырывания электронов. Может быть, мы не видим инфракрасных лучей именно потому, что чувствительность глаза зависит от электрических явлений, заключающихся в смещении электронов. Точно так же можно предполагать, что лучи с очень малой длиной волны, ультрафиолетовые и пр., вредны, потому что электроны, приводимые ими в движение, слишком быстры и обладают слишком сильным действием. По тем же причинам фотографическая пластинка сильно реагирует на короткие волны и лишь с трудом поддается обработке, делающей ее чувствительной к инфракрасным лучам.

Таким образом наше представление о взаимодействии электронов с различными видами излучения оказывается простым и всеобъемлющим. Электрон летит в рентгеновской трубке. Он попадает в атом мишени; его энергия выделяется в виде частицы, называемой фотоном. Фотон движется прямолинейно, проникая сквозь различные вещества с различной силой, зависящей от его энергии. Рано или поздно прохождение сквозь атомы прекращается вследствие того, что одно из них оказывается роковым; фотон исчезает, а его энергия опять передается электрону. Последний теряет энергию при своем полете сквозь материю вследствие вырывания электронов из пронизываемых им атомов, — явления, погубившего фотон. В результате некоторых столкновений часть остающейся у электрона энергии может вызвать появление нового фотона. В конце концов энергия растрачивается в виде тепла или химического действия. Иногда происходящие столкновения имеют сложный характер: энергия фотона или электрона может разделиться между двумя такими частицами при одном столкновении; однако такие дополнительные явления, хотя они чрезвычайно интересны и важны для изучения этого вопроса, не могут быть рассмотрены в нашем кратком обзоре. Основное заключается в том, что имеются две частицы, одна из которых заряжена, а другая — нет, переносящие энергию в пространстве, отдающие ее время от времени, каждая своим характерным способом, и обладающие, кроме того, способностью взаимного обмена энергией.

Такое представление о свете с первого взгляда противоречит волновой теории, которая была и остается столь плодотворной. Но прежде чем пытаться рассмотреть это противоречие, мы пойдем по тому же пути несколько дальше и обнаружим при этом ряд новых фактов, требующих объяснения.

ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Свет во всех своих разнообразных видах ведет себя иногда, как волна, а иногда, как частица; не может ли быть, что то, что мы привыкли считать частицами, при некоторых условиях ведет себя так же, как волна?

Исследование показало, что двойственность имеет место и в этом случае. Оказалось, что при правильной постановке опыта это явление показать очень легко, хотя его удалось обнаружить только в последнее время после многих тщательных исследований. Когда узкий пучок электронов направляют на кристалл, появляется дифракционная картина, которая хотя и обладает характерными особенностями, однако, несомненно, имеет ту же природу, что и в случае рентгеновских лучей. Фотография, полученная Дж. П. Томсоном, приведена на табл. XXII В. Электроны проходят сквозь вещество крайне слабо, вследствие чего в опытах пользуются весьма тонкими кристаллическими пластинками; аналогичное явление получается и при отражении от поверхности кристаллов. Как только технические трудности были преодолены, существование дифракции электронов стало очевидным. В этом случае электроны ведут себя, как волны.

Наконец, оказалось, что тем же свойством обладают сами атомы, которые до сих пор нельзя было считать ничем, кроме как частицами материи. Опыты, оказавшиеся значительно более трудными, показали, что пучок атомов, падающий на кристалл, также дает дифракционную картину.

Таким образом все основные, хорошо знакомые нам „частицы“ ведут себя двойственным образом: в зависимости от обстоятельств они ведут себя либо как частицы, либо как волны. Различие, которое мы до сих пор делали между излучением и материей, постепенно

становится различием проявлений, а не природы этих явлений.

В кратком очерке этого вопроса мы вынуждены опустить большое число экспериментальных данных и теоретических выводов и аналогий, изложение которых позволило бы представить факты гораздо яснее и детальнее. Однако пространство и время, в их прозаическом смысле, ограничивают нас.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обобщении наших взглядов на природу вещей заключен самый замечательный результат новейших исследований. Никто не мог предвидеть этого единства явлений природы. Сброшенная завеса показала нам сходство и тождество отдельных деталей картины, которые мы считали когда-то совершенно различными. Свет видимый и невидимый, рентгеновские лучи, излучения радиоактивных веществ, электроны, само вещество — обладают, как мы теперь знаем, общими свойствами и должны быть объединены каким-то, еще не вполне понятным образом. Очень трудно понять те явления, которые в некоторый момент должны рассматриваться, как волны, а в следующий, как частицы. Как мы должны представлять себе это кажущееся противоречие?

Повидимому, мы приходим к такому положению, при котором следует выбирать способ описания явлений природы. Некоторые из них превосходно согласуются друг с другом, если для их описания пользоваться волновой теорией, тогда как ряд других, не менее достоверных явлений во всех деталях объясняется корпускулярной теорией. Как уже указывал Джинс, у нас нет никаких оснований считать, что мы всегда будем в состоянии описывать новые явления и новые представления с помощью уже известных понятий. Когда мы пользуемся для объяснения явлений волнами или частицами, каждое из этих понятий пригодно в соответствующем случае; если бы мы имели возможность пользоваться более наглядным описанием, нам легче было бы избежать противоречий. Развитие нового учения волновой механики показывает, что, повидимому, мы постепенно приближаемся к лучшему положению вещей. Когда местный шторм поднимает волнение в определенной части моря, волны распространяются в виде вполне самостоятельной группы. Скорость

всей группы не равна скорости волн, движущихся внутри нее от тыльной части группы к ее „фронту“ и там исчезающих. Имеются два различных объекта: группа как целое, и волны внутри нее. Движущаяся группа обладает некоторым количеством энергии; волны, перемещающиеся в пределах ее, обуславливают явления интерференции. В этом заключается аналогия с обоими характерными свойствами фотона. Попытки описать свойства излучения таким новым способом оказались чрезвычайно успешными.

Мы не можем считать окончательными современные представления, устанавливающие связь между какими-нибудь явлениями. Вьювэлл в своей „Истории индуктивных знаний“, описывая постепенное развитие волновой теории света, указывает, что каждое новое открытие превосходно согласовалось с той схемой, которую теория предусматривала для него, и утверждает, что это является признаком, отличающим истинную теорию от ложной: корпускулярная теория Ньютона была отброшена, волновая теория, казалось, навсегда заняла ее место. Но этот блестящий ум не предвидел возможности появления туч на ясном небе волновой теории. Двумя старыми теориями и кроме них, конечно, волновой механикой и другими представлениями, еще не принявшими законченной формы, мы пользуемся теперь лишь в качестве связей, объединяющих вместе ряд открытых явлений, дающих нам отчетливое представление и позволяющих наметить пути дальнейших исследований. Если встречаются смущающие нас противоречия, их следует отнести за счет несовершенства тех теорий и моделей, которыми мы сейчас пользуемся; нет необходимости стараться их разрешить. Решение придет своевременно, когда дальнейшие исследования позволят нам достигнуть новых высот знания. Мы овладели прекрасным принципом, объединяющим все виды излучения и все формы материи, у нас есть все основания считать вселенную состоящей из света, если последнему понятию придавать значение, замечательная общность которого открывается теперь перед нами.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Акварельные краски 80
 Алмаз 153 и табл. XIX
 Альфа-частицы 177
 Антикатоде 212
 Антоксантин 104
 Антодианин 102
 Астигматизм 51
 Ахроматизм 93

 Бабины 133
 Бинокулярное зрение 28
 Брильянт 70
 Бета-лучи 221

 Вальсон, проф. 224
 Вода, кажущаяся глубина 61, 62
 Волшебное зеркало 33
 Вогнутое зеркало 24 и сл.
 Волновая теория света 9
 Волны и частицы 231
 Выпуклое зеркало 23 и сл.
 Вьювелл 232

 Гамма-лучи 206
 Гало 129
 Гелий 177
 Глаз 42
 Гюйгенс 12, 140, 146

 Дальтон 85
 Движение звезд 170, 180
 Действие красок 79
 Дифракция 107
 -- рентгеновских лучей в кри-
 сталах 198 и сл.

 Дифракция электронов 229
 Дифракционная решетка 114
 Доллонд 93
 Дополнительные цвета 86
 Допплера явление 180

 Зеленый луч 63
 Зрение 27

 Изображения 22
 Индиго 105
 Иннес 218
 Интерференция 116
 Инфракрасная фотография 183
 Иллюзия движения 57, 58
 Исландский шпат 153, 154

 Кьтод 190, 192
 Катодные лучи 192
 Корпускулярная теория рентге-
 новских лучей 223
 Колебания атомов и молекул 99
 Крукс 214

 Лабораторные опыты с водя-
 ными волнами 10
 Лауэ опыт 194 и сл.
 Луна на горизонте 55, 56
 Лунное гало 136
 Луч необыкновенный 142
 -- обыкновенный 142

 Малус 149
 Максвелл 207
 Масляные краски 80

Мерцание звезд 181
Микроскоп 49
Мираж 66
Молекулярное рассеяние 125
Мыльная пленка 117

Невидимое излучение 182
Нейтрон 224
Ньютон 12

Область длин волн 78
Окраска цветов 101
Оптические обманы 54 и сл.
— недостатки глаза 43
Оптический обман Стирлинга 55
Отражение 15
— от кривых зеркал 23
— от плоской поверхности 15
— рентгеновских лучей от кри-
сталла 199
Отражающие призмы 64, 65

Поляризация света 149
— света неба 161
— кристалла 156
Полное внутреннее отражение 64
Полутень 31
Призма Николя 159
Преломление 37, 59
— в атмосфере 62, 63
Протон 224

Радуга 94
Рамаи 128
Рассеяние света 18
Расстояние Луны и Солнца от
земли 169 и сл.
— звезд 170, 171
Резонанс 95
Рентгеновский анализ 216
Рентгеновская трубка 212
Рентгеновские лучи 189 и сл.
234

Рентген 189
Ремер 171
Рэлей 126
Рэлей старший 203

Сетчатая оболочка 33
— — перевернутое изображение
на ней 44
Сенармон 155
Сохранение впечатления 59
Слой Хивисайда—Кеннели 168
Спектр звезд 173, 174
— Солнца 176

Таблица длин волн 208
Телескоп 49
— Ньютона 92
Тени на мутной воде 128, 129
Тиндаль 125, 138
Томсон Дж. Дж. 191, 214
Томсон Дж. П. проф. 229

Увеличение 47
Ультрафиолетовые лучи 184
— разряд электричества под влия-
нием их 187
Ультрафиолетовая фотография 94

Фраунгофер, рисунки дифракци-
онных спектров 195
Флуоресценция 184
Фокус 38
Фокусное расстояние 40
Форма волны в кристалле 144
Фотографии Лауэ 195, 206
Фотоны 224
Фотоэффект 211, 214
Фотоэлектрический эффект 211,
212 и сл.
Френель 150
Хлорофилл 100

Цвет моря 126

— неба 123

Цветовые оптические обманы 88

Циркон 73

Электроны 192, 214

Эриометр 136

Эфир 20

Юнг Томас 117, 120, 136, 156

ОГЛАВЛЕНИЕ.

	Стр.
Предисловие переводчика	3
Предисловие автора	4
Глава I Природа света	7
Волновая теория света	9
Опыты с волнами на поверхности воды	10
Гипотезы Ньютона и Гюйгенса	12
Отражение от плоской поверхности воды	15
Рассеяние света	18
Рассеяние световых волн	21
Изображения	22
Отражение от кривых поверхностей	23
Зрение	27
Зрение двумя глазами	28
Изображения, создаваемые отверстиями	29
Глянец	32
Волшебное зеркало	33
Глава II Глаз и зрение	36
Изображение, создаваемое линзой	41
Оптическое устройство глаза	42
Оптические недостатки глаза и способы их устранения	43
Увеличение	47
Микроскоп и телескоп	49
Астигматизм	51
Ошибочное восприятие	53
Сохранение зрительного впечатления	59
Основные примеры преломления света	—
Полное внутреннее отражение	64
Отражение радиоволн	67
Отражение и преломление света в бриллианте	70

Глава III Цвет	74
Спектр	—
Качество света	77
Длины световых волн	—
Действие красящих веществ	79
Как глаз воспринимает цвета	82
Дополнительные цвета	86
Цветовые обманы	88
Цветовые явления в линзах	89
Радуга	94
Глава IV Возникновение окраски	95
Принцип резонанса	—
Колебания атомов и молекул	99
Хлорофилл	100
Окраска цветов	101
Краски	104
Дифракция	107
Интерференция	116
Глава V Цвет неба	123
Избирательное рассеяние света	—
Молекулярное рассеяние	125
Цвет моря	126
Гало	129
Эриометр Юнга	136
Глава VI Поляризация света	138
„Трактат о свете“ Гюйгенса	141
„Удивительное явление“ Гюйгенса	146
Опыт Малуса	149
Поперечные колебания Юнга и Френеля	150
Поляризация, происходящая вследствие кристаллического строения вещества	153
Призма Николя	159
Поляризация света неба	161
Глава VII Свет солнца и звезд	166
Расстояния звезд	167
Скорость света	171
Анализ света звезд	172
Спектр Солнца	176
Движение звезд по направлению к Земле и от нее	180
Невидимое излучение	182
	237

Флуоресценция	184
Электрический разряд под влиянием ультрафиолетовых лучей	187
Глава VIII Рентгеновские лучи	189
Опыт Ауэра	194
Измерения длин волн	209
Глава IX Волны и частицы	211
Фотоэлектрический эффект	212
Процесс возникновения рентгеновских лучей	215
Опыт Инчеса	218
Связь между рентгеновскими лучами и электронами	—
Камера Вильсона	224
Дифракция электронов	229
Заключение	231
Алфавитный указатель	233