

В рассматриваемом приближении угол δ не зависит от угла падения. В высших приближениях это уже не так. В третьем приближении из формулы (2,9), разлагая $\delta_{\text{мин}}$ в ряд, находим

$$\delta_{\text{мин}} = (n-1) A \left[1 + \frac{n(n+1)}{24} A^2 \right]. \quad (2.11)$$

7. Удобный метод измерения показателя преломления твердых тел состоит в следующем. Плоскопараллельная пластинка из исследуемого вещества рассматривается в микроскоп. Сначала микроскоп устанавливается для наблюдения верхней поверхности пластинки. Затем смещают тубус микроскопа вниз, пока не будет отчетливо видна нижняя поверхность пластинки. (Для удобства наблюдения на поверхностях пластинки можно сделать метки.) Показать, что если смещение тубуса равно h , а толщина пластинки l , то показатель преломления пластинки можно найти по формуле

$$n = l/h.$$

Метод годится и для измерения показателей преломления жидкостей.

§ 3. Эволюция представлений о природе света

1. Пифагор (около 580—500 до н. э.) считал, что предметы становятся видимыми благодаря мельчайшим частицам, испускаемым ими и попадающим в глаз наблюдателя. Декарт полагал, что свет — это сжатие, распространяющееся в идеальной упругой среде (эфире), заполняющей мировое пространство и промежутки между частицами тел. Однако последовательно провести эту точку зрения Декарт не смог, при выводе законов отражения и преломления он пользовался представлением о свете как о потоке частиц. Гук (1635—1703) также считал, что свет представляет собой импульсы сжатия, распространяющиеся мгновенно или с очень большими скоростями. (Скорость света была определена только в 1676 г. Олафом Рёмером (1644—1710) из наблюдений затмений спутников Юпитера.) Несколькими годами ранее Гука чешский монах Марци (1595—1667) и итальянский монах Гримальди (1618—1663) также пришли к мысли, что свет представляет собою быстро распространяющиеся волны. Подобные отрывочные высказывания о природе света были усовершенствованы и развиты в более систематические теории Исааком Ньютоном (1643—1727), с одной стороны, и Христианом Гюйгенсом (1629—1695), с другой.

Основные оптические работы Ньютона докладывались в Лондонском Королевском обществе (1671—1675 гг.) и были напечатаны в трудах этого общества. Содержание этих сообщений, наряду с другими оптическими исследованиями Ньютона, было заимствовано из его «Лекций по оптике»¹⁾, которые он читал в Кембридже в 1669—1671 гг. Спустя много лет (в 1704 г.) вышла знаменитая

¹⁾ Исаак Ньютон. Лекции по оптике. Перевод, комментарии и редакция академика С. И. Вавилова, Издательство АН СССР, 1946.

книга Ньютона «Оптика»¹⁾. В оптике Ньютон сосредоточил основное внимание на экспериментальных исследованиях и стремился при изложении этого, как и других разделов физики, отделить достоверные факты от сомнительных гипотез. Экспериментальные исследования Ньютона по оптике вплоть до XIX века не имели себе равных. Его «Оптика» служила основным источником, из которого черпали материал все учебники того времени («Лекции по оптике» были опубликованы после смерти Ньютона и по ряду причин остались почти неизвестными). Что касается природы света, то к этому вопросу Ньютон подходил значительно более осторожно, чем все остальные ученые, включая Гюйгенса. Он предпочитал с самого начала строить чисто феноменологическую теорию, освобожденную от произвольных гипотез. Все, что относится к физической природе света, он выделил в особый раздел, содержащий 31 «вопрос», которым заканчивается его «Оптика». Здесь после тщательного рассмотрения различных исключающих друг друга возможностей Ньютон пришел к заключению, что факты говорят больше в пользу корпускулярной теории, чем волновой. Поэтому он, правда не без колебаний и сомнений, отдал предпочтение корпускулярной теории.

Гюйгенс в своих высказываниях о природе света не был столь сдержанным и осторожным, как Ньютон. Он не сомневался в волновой природе света. Свои воззрения он изложил на заседании Парижской Академии наук (1678 г.), а затем более полно в сочинении «Трактат о свете»²⁾, опубликованном в 1690 г. В этом сочинении впервые в истории оптики была сделана попытка изложить с единой — волновой — точки зрения распространение, отражение, преломление и двойное лучепреломление света.

2. Перейдем к более подробной характеристике корпускулярной и волновой теорий света.

Согласно корпускулярной теории, свет состоит из мельчайших частиц, или корпускул, испускаемых светящимися телами. С этой точки зрения прямолинейное распространение света сводится к закону инерции. Для истолкования закона независимости световых пучков надо было ввести предположение, что средние расстояния между корпускулами в световых пучках настолько велики, что корпускулы практически не взаимодействуют между собой; случаи сближения, в которых проявляется такое взаимодействие, крайне редки и при существующей точности эксперимента ускользают от наблюдения.

Отражение и преломление света корпускулярная теория объясняла силами притяжения и отталкивания, действующими на световые корпускулы в очень тонком приграничном слое вблизи границы

¹⁾ И. Ньютон. Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света. Перевод с примечаниями С. И. Вавилова. Гостехиздат, М., 1954.

²⁾ Х. Гюйгенс. Трактат о свете. Госиздат, М. — Л., 1935.

раздела сред, на которую падает свет. Внутри приграничного слоя путь световой corpusкулы искривляется, по выходе из него corpusкула движется снова прямолинейно и равномерно, но уже в другом направлении. Если corpusкула отражается, то она возвращается

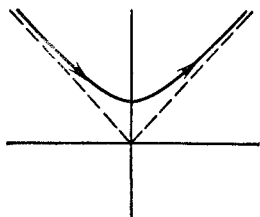


Рис. 9.

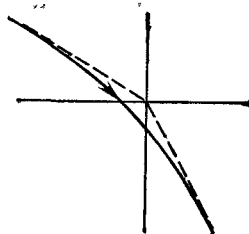


Рис. 10.

в первую среду с прежним значением скорости. Если же corpusкула проходит во вторую среду, то величина ее скорости изменяется (рис. 9 и 10). Ввиду тонкости приграничного слоя явление воспринимается так, как если бы на границе сред происходил резкий излом траектории corpusкулы (как показано на рис. 9 и 10 пунктирными линиями).

Для вывода количественных законов отражения и преломления света надо было ввести предположение, что силы, действующие на световую corpusкулу в приграничном слое, *нормальны к границе раздела сред*. Такие силы меняют только нормальные скорости световой corpusкулы, оставляя касательные без изменения. Рассмотрим, например, преломление света. Обозначим через v_1 скорость световой corpusкулы в первой среде, а через v_2 — во второй. В силу равенства касательных составляющих этих скоростей $v_1 \sin \varphi = v_2 \sin \psi$ (рис. 11), или

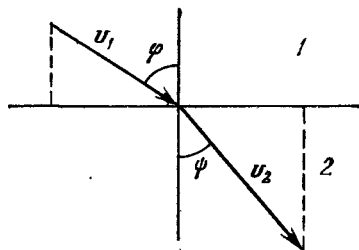


Рис. 11.

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = \frac{v_2}{v_1}. \quad (3.1)$$

Эта формула была получена Ньютоном. Из нее следует, что в сильнее преломляющих средах скорость света должна быть больше, чем в менее преломляющих. Однако, чтобы из формулы (3.1) вывести закон преломления Снеллиуса, необходимо добавочное предположение, что отношение скоростей света v_2 и v_1 для световых corpusкул одного и того же типа постоянно, т. е. определяется только свойствами сред 1 и 2, в которых corpusкулы движутся, но не зависит от того, каким путем они туда попали. Если использовать

экспериментальный факт, что в вакууме скорость света одна и та же, то для выполнения этого условия необходимо потребовать, чтобы все силы, действующие на световые корпускулы в приграничных слоях, были *потенциальны*. (Заметим, что цвета света тогда можно объяснить, например, различными размерами корпускул.) Однако то обстоятельство, что скорость световой корпускулы зависит только от среды, в которую она испускается, но не зависит от способа испускания, представляется малопонятным с точки зрения классической механики. В этом отношении корпускулярная теория уступает волновой теории, поскольку в *последней* скорость света, естественно, есть характеристика *только самой среды*, в которой он распространяется.

При справедливости введенных предположений показатель преломления среды 2 относительно среды 1 определяется выражением

$$n_{21} = v_2/v_1. \quad (3.2)$$

В частности, для абсолютного показателя преломления получаем

$$n = v/c, \quad (3.3)$$

где c — скорость света в вакууме. Следовательно, $n_1 = v_1/c$, $n_2 = v_2/c$, а потому

$$n_{21} = n_2/n_1, \quad (3.4)$$

что совпадает с формулой (2.2). Однако это обстоятельство нельзя рассматривать как аргумент в пользу корпускулярной теории, так как такое же соотношение следует и из волновой теории.

3. Согласно *волновой теории*, свет представляет собой *волны*, распространяющиеся в гипотетической всепроникающей среде, — *мировом* или *световом эфире* — заполняющей все мировое пространство и промежутки между мельчайшими частицами тел. Если колебания частиц эфира *малы*, то уравнения, описывающие распространение волн, будут *линейны и однородны*. В этом случае справедлив *принцип суперпозиции волн*, являющийся в волновой теории математическим выражением закона независимости световых пучков.

Значительно сложнее обстояло дело с объяснением прямолинейного распространения света. Гюйгенс применил к этой проблеме принцип, названный позднее его именем. Если камень бросить в воду, то от места падения, как из центра, побегут по поверхности воды круговые волны, или возмущения. Этот процесс продолжается и после того, как камень упадет на дно, т. е. исчезнет причина, породившая первоначальное возмущение. Отсюда следует, что непосредственной причиной распространяющегося волнового процесса является не камень, а то первоначальное возмущение движения воды, которое он вызвал. Подобные рассуждения навели Гюйгенса на мысль, что *каждая точка волнового возмущения является источником сферических волн*, распространяющихся от нее во все

стороны. Они получили название *вторичных* или *элементарных волн Гюйгенса*. Результирующее волновое возмущение можно рассматривать как наложение вторичных волн. В этом и состоит знаменитый *принцип Гюйгенса*. Он справедлив не только для световых, но и для *любых* волновых процессов и в приведенной формулировке полностью сохранил свое значение до настоящего времени. Его значение далеко выходит за рамки сравнительно узкой задачи о прямолинейном распространении света. Действительно, принцип Гюйгенса указывает на принципиальную возможность определения волнового возмущения во всем пространстве, если известны все вторичные волны, порожденные в более ранний момент времени.

Но Гюйгенс не рассматривал задачу в столь общей постановке. Он дополнил формулировку своего принципа, приведенную выше, замечанием, что отдельные вторичные волны слишком слабы и что заметное световое действие они производят только на их *огibaющей*. После этого дополнения принцип Гюйгенса потерял свою общность и превратился лишь в приближенный *геометрический рецепт* для построения волновых фронтов, т. е. поверхностей, до которых дошло световое возмущение. Он стал непригоден для количественного расчета светового поля, в частности распределения интенсивности последнего в пространстве.

4. Обратимся теперь к объяснению прямолинейного распространения света, данному Гюйгенсом. Пусть точечный источник света S (рис. 12), расположенный перед непрозрачным экраном с отверстием AB , излучает сферическую волну. Если в момент времени t волна дойдет до краев отверстия AB , то оно вырежет из волнового фронта сферический участок ACB . Построим из каждой точки этого участка, как из центра, вторичные волны радиусом $c dt$. Огибающая всех этих вторичных волн оборвется на краях сферического участка A_1B_1 , за пределы которого проникнут только отдельные вторичные волны. Действие таких волн, согласно предположению Гюйгенса, пренебрежимо мало, а потому волновой фронт возмущения в момент $t + dt$ ограничится только сферическим участком A_1B_1 . Взяв этот фронт за исходный, можно таким же построением найти волновой фронт A_2B_2 в более поздний момент времени, и т. д. Построение показывает, что волновое возмущение будет резко обрываться на поверхности телесного угла с вершиной S , вырезаемого диафрагмой AB . А это и означает прямолинейное распространение света.

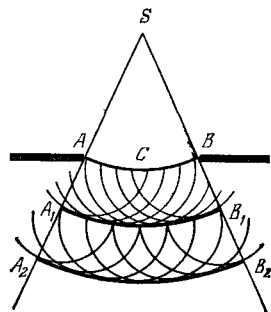


Рис. 12.

Рассуждение Гюйгенса лишено доказательной силы. В нем доказывається то, что по существу содержится в исходных предположе-

ниях. А само построение Гюйгенса есть только *один из возможных рецептов построения волнового фронта*, согласующийся с представлением о распространении света вдоль лучей. Непонятно, почему объяснение Гюйгенса применимо к световым, но не применимо к звуковым волнам, которые, как известно, огибают препятствия, стоящие на их пути.

Естественно, что такое «объяснение» не могло удовлетворить Ньютона. Кроме того, Ньютон, как и Гюйгенс, не видел, как в рамках волновой теории можно объяснить поляризацию света, открытую Гюйгенсом в двойном лучепреломлении. Это действительно невозможно для продольных волн, какими, согласно Гюйгенсу, является свет. Только такие волны и были известны в физике того времени. Представления о поперечных волнах еще не существовало. Эти трудности казались Ньютону настолько существенными, что его симпатии оказались на стороне корпускулярной теории.

Проблема прямолинейного распространения света есть *частный случай проблемы дифракции* и может быть решена до конца только в рамках последней. Дифракция света была открыта Гримальди и независимо от него несколько позднее Гуком. Ньютон много занимался экспериментальными исследованиями дифракции света. Но Гюйгенс в «Трактате о свете» почему-то полностью обошел молчанием это явление. Кроме того, ему осталась неизвестной периодичность световых процессов (в отличие от Ньютона, который первый подметил ее). Гюйгенс писал, что свет, подобно звуку, распространяется *сферическими поверхностями*, и именно такие поверхности называл *волнами*. Он специально подчеркивал, что удары, возбуждающие световые возмущения в центрах волн, совершаются совершенно беспорядочно, а потому не следует думать, что сами волны следуют друг за другом на равных расстояниях. В этом отношении высказывания Гюйгенса примыкают к более ранним представлениям Декарта и Гука. Понятие длины волны нигде не встречается в теории Гюйгенса, а без этого невозможно установить, при каких условиях (приблизительно) справедлив закон прямолинейного распространения света.

5. Перейдем к вопросу об отражении и преломлении света в волновой теории Гюйгенса. Пусть плоская волна падает на плоскую границу раздела двух сред. В некоторый момент в точке *A* волновой фронт *AB* достигнет границы раздела сред (рис. 13). В этот момент из *A* начнут распространяться вторичные волны Гюйгенса: одна в первую, другая во вторую среду. В точках *E* и *D* аналогичные волны возникнут несколько позднее. Согласно принципу Гюйгенса, от наложения таких вторичных волн в первой среде образуется *отраженная*, а во второй — *преломленная* волны. Огибающая вторичных волн во второй среде *FGD* есть плоскость, определяющая волновой фронт преломленной волны. Аналогично строится волновой фронт и отраженной волны (на рис. 13 он не указан). Таково

объяснение отражения и преломления света в волновой теории Гюйгенса. Оно не раскрывает детальный механизм возникновения отраженной и преломленной волн. Для этого надо было бы явно использовать физическую природу световых волн, о которой в эфирной теории Гюйгенса, в сущности, ничего не говорится.

Геометрические законы отражения и преломления, однако, совершенно не зависят от физической природы волн и от конкретного механизма отражения и преломления.

Они одинаковы в любой волновой теории. Действительно, падающая волна возбуждает возмущение, бегущее вдоль границы раздела со скоростью $AD = BD/\sin \varphi = v_1/\sin \varphi$

(если воспользоваться надлежащими единицами), где v_1 — скорость света в первой среде. Но отраженная и преломленная волны порождаются падающей волной и поэтому бегут вместе с ней вдоль границы раздела с той же скоростью. Следовательно, можно написать также, что $AD = v_1/\sin \varphi' = v_2/\sin \psi$, где v_2 — скорость света во второй среде, φ' — угол наклона фронта отраженной волны к границе раздела сред (не показанный на рис. 13).

В результате получается

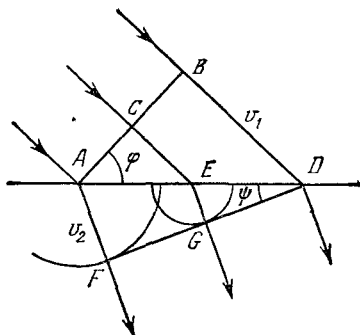


Рис. 13.

$$\frac{\sin \varphi}{v_1} = \frac{\sin \varphi'}{v_1} = \frac{\sin \psi}{v_2}. \quad (3.5)$$

Этими соотношениями определяются направления фронтов отраженной и преломленной волн. А так как в плоской волне световые лучи перпендикулярны к волновым фронтам, то те же соотношения определяют также направления отраженных и преломленных лучей. Легко видеть, что φ есть угол падения, φ' — угол отражения, ψ — угол преломления. Из (3.5) следует, что $\varphi = \varphi'$ (закон отражения) и

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = \frac{v_1}{v_2} \quad (\text{закон преломления}). \quad (3.6)$$

В противоположность корпускулярной теории (см. (3.1)), волновая теория приводит к заключению, что скорость света в более преломляющей среде меньше, чем в менее преломляющей. И это заключение справедливо независимо от того, какова физическая природа световых волн.

Для относительного показателя преломления волновая теория дает

$$n_{21} = v_1/v_2, \quad (3.7)$$

а для абсолютного

$$n = c/v, \quad (3.8)$$

т. е. выражения, обратные соответствующим выражениям в корпускулярной теории (3.2) и (3.3). Из (3.7) и (3.8) снова получается формула (3.4), которая, следовательно, справедлива как в корпускулярной, так и в волновой теориях.

6. В вопросе об отражении и преломлении света между корпускулярной и волновой теориями имеется и другое различие. Опыт показывает, что световой пучок, падающий на границу раздела сред, разделяется на два пучка: отраженный и преломленный (исключением является случай полного отражения). В волновой теории объяснение этого факта не встречает затруднений. Но как истолковать его с точки зрения корпускулярной? Корпускула всегда ведет себя как целое. Она не может разделиться на две части, из которых одна отражается, а другая проходит во вторую среду. В противном случае падающий, отраженный и прошедший свет был бы окрашен различно. Для преодоления этой трудности Ньютон ввел идею о *приступах легкого отражения и легкого прохождения*, в которых периодически может находиться световая корпускула. Если корпускула подходит к границе сред в приступе легкого отражения, то она отталкивается и отражается. Если же это случится в приступе легкого прохождения, то произойдет притяжение и прохождение корпускулы во вторую среду.

Идея «приступов», как заметил Я. И. Френкель (1894—1952), напоминает современные представления о *световых квантах — фотонах*. Согласно этим представлениям, отражение и прохождение фотонов через границу раздела сред управляется *статистическими законами*: существует определенная вероятность, что фотон отразится, и определенная вероятность, что он пройдет во вторую среду. Сам Ньютон, конечно, не раскрыл физический механизм приступов легкого отражения и легкого прохождения. Однако он ставил вопрос, не являются ли эти приступы результатом обратного воздействия каких-то быстрых волн, возбуждаемых в среде световыми корпускулами. Идея приступов навязывалась также *периодичностью световых процессов*, подмеченной Ньютоном при исследовании интерференционного явления «ньютоновых колец». Эту периодичность Ньютон также пытался объяснить, дополнив корпускулярную теорию волновыми представлениями.

7. Физики XVIII и начала XIX веков, забыв о колебаниях и сомнениях Ньютона, приняли корпускулярную теорию света. Сторонники волновой теории насчитывались единицами. Правда, среди них были Эйлер (1707—1783), Ломоносов (1711—1765) и Франклин (1706—1790), выдвигавшие возражения против корпускулярной и приводившие аргументы в пользу волновой теории света. Эйлер, например, утверждал, что если бы корпускулярная теория

была справедлива, то из-за излучения света масса Солнца заметно уменьшалась бы, а это сказалось бы на движении планет. Франклин указывал, что по корпускулярной теории свет должен был бы оказывать давление на освещаемые тела, тогда как все попытки обнаружить это давление оканчивались безрезультатно. Слабость этих возражений состояла в том, что они не содержали количественных оценок ожидаемых эффектов. Впрочем, согласно современным представлениям о взаимосвязи между массой и энергией, потеря массы из-за излучения, а также величина светового давления совершенно не зависят от того, является ли свет потоком частиц или волновым процессом. Эти и аналогичные возражения, как показало последующее развитие физики, не могли решить спор между корпускулярной и волновой теориями света. Нужны были новые экспериментальные факты.

8. Начиная с XIX века, положение стало складываться в пользу волновой теории благодаря работам Юнга (1773—1829) и в особенности Френеля (1788—1827), систематически исследовавших явления интерференции и дифракции света. На основе волновых представлений была создана стройная теория этих явлений, выводы и предсказания которой полностью согласовывались с экспериментом. Объяснение прямолинейного распространения света содержалось в этой теории как частный случай. Были открыты и исследованы новые оптические явления: поляризация света при отражении (Малюс, 1808) и преломлении (Малюс и Био, 1811), угол полной поляризации (Брюстер, 1815), интерференция поляризованных лучей (Френель и Араго, 1816), количественные законы и теория отражения и преломления света (Френель, 1821), двойное преломление сжатым стеклом (Брюстер, 1815), двуосные кристаллы (Брюстер, 1815), законы и теория распространения света в двуосных кристаллах (Френель, 1821), вращение плоскости поляризации в кварце (Араго, 1811) и жидкостях (Био, 1815; оба явления исследовались далее Био, Брюстером и др.). Юнг (1807) измерил на опыте длину световой волны. Оказалось, что волны красного света длиннее, чем синего и фиолетового. Тем самым в волновой теории было дано экспериментально обоснованное объяснение цветов света, которое связывало это явление с длиной световой волны. (Такое объяснение предлагалось еще Эйлером, но он не мог указать, длина каких волн больше — красных или синих.) Юнг (1817) высказал также мысль о *поперечности световых волн*. К такому же заключению независимо от него пришел Френель (1821) и обосновал это заключение путем исследования поляризации света и интерференции поляризованных лучей. Все эти факты и в особенности явления интерференции и дифракции света находили непринужденное объяснение в рамках волновой теории света. Корпускулярная теория не могла противопоставить ничего эквивалентного и к началу 30-х годов XIX века была оставлена.

Смертельный удар корпускулярной теории в ее ньютоновской форме был нанесен в 1850 г. К этому времени Физо (1819—1896) и Фуко (1819—1868) впервые измерили скорость света лабораторными методами. Как мы указывали (см. пункты 2 и 5), по корпускулярной теории скорость света в воде больше, а по волновой теории меньше, чем в вакууме. В 1850 г. Фуко и независимо от него Физо и Бреге сравнили обе скорости. Опыт оказался в согласии с волновой и противоречии с корпускулярной теориями света. Физики XIX века восприняли это как решающий опыт, окончательно доказавший неправильность корпускулярной теории света.

9. Волновая теория, конечно, не могла считаться полной, пока не была установлена *природа световых колебаний*, или колебаний мирового эфира, как говорили физики девятнадцатого (и отчасти первой четверти двадцатого) века. Они не сомневались, что эфир подчиняется обычным законам механики Ньютона и к нему применимы такие понятия, как плотность, упругость, пространственное перемещение, скорость, ускорение и пр. Они пытались вывести строение и свойства эфира из наблюдаемых явлений и экспериментально установленных законов оптики. Поперечность световых волн заставила приписать мировому эфиру свойства твердой среды. Это породило ряд трудностей, в частности в вопросе об отражении и преломлении света (подробнее см. § 63). Нет необходимости останавливаться на этих трудностях и попытках их преодоления в теории эфира. Все это уже давно потеряло актуальность и сохранило лишь исторический интерес.

В 60-х годах XIX века Максвеллом были установлены общие законы электромагнитного поля, которые привели его к заключению, что *свет — это электромагнитные волны* (см. т. III, гл. IV). Подтверждением такой точки зрения в то время были открытие Фарадеем в 1846 г. вращения плоскости поляризации света в магнитном поле и совпадение скорости света в вакууме с электродинамической постоянной, установленное на опыте в 1856 г. Вебером и Кольраушем (см. т. III, §§ 51 и 83). После известных опытов Герца (1887—1888 гг., см. т. III, § 142) электромагнитная природа света быстро получила признание. Уже в первом десятилетии XX века она из гипотезы превратилась в твердо установленный факт. Световые колебания были отождествлены с колебаниями электромагнитного поля. Оптика превратилась в раздел учения об электрических и магнитных явлениях.

Электромагнитная теория света устранила трудности, с которыми столкнулась теория упругого твердого эфира. Однако физики XIX века считали, что она дала не настоящее, а только *символическое* решение вопроса о природе света. Они смотрели на нее как на формальную схему, уравнения которой правильно передают количественные соотношения между различными величинами и явлениями, но символы, входящие в эти уравнения, еще не получили отчетливого

физического истолкования. Считалось, что уравнения Максвелла должны составлять математический остов будущей более полной физической теории электромагнитных и световых явлений, но сами по себе они такой физической теории еще не составляют; последняя станет возможной лишь после того, как будут найдены механические свойства эфира.

Однако эти надежды не оправдались. Световой (или, лучше, электромагнитный) эфир упрямо отказывался обнаружить свои «механические свойства». В частности, потерпели неудачу настойчивые попытки обнаружить движение Земли относительно эфира, начатые Майкельсоном (1852—1931) в 1881 г. При изучении оптических и электродинамических явлений в движущихся средах обнаружались и другие расхождения теории эфира с опытом. Это привело Эйнштейна (1879—1955) в 1905 г. к теории относительности. Гипотеза механического эфира была оставлена¹⁾, Пошатнулась вера в «механическую картину мира», к построению которой так настойчиво стремились физики XIX века. И все последующее развитие науки привело физиков к убеждению в невозможности сведения всех явлений природы к механике. Утверждать противоположное — значит предъявлять к природе необоснованные требования. Поэтому, когда в современной волновой теории говорят, что свет — это колебания электромагнитного поля, то на это уже не смотрят как на формальное утверждение, а считают, что сами эти колебания не сводятся к чему-то «более простому и наглядному».

10. Важным этапом в развитии максвелловской электродинамики было введение в нее *атомистических представлений*, что было систематически проведено в *электронной теории* Г. А. Лорентца (1853—1928). В теории Максвелла вещество характеризовалось *феноменологическими постоянными* — диэлектрической и магнитной проницаемостями и удельной электрической проводимостью. В электронной теории эти макроскопические постоянные получили истолкование с атомистической точки зрения. В результате этого не только получили принципиальное, хотя и недостаточное, объяснение многие известные электродинамические и оптические явления

¹⁾ Необходимо заметить, однако, что в вакууме нет обычного вещества, как оно понимается в химии. Но вакуум не есть пустота в буквальном смысле этого слова. Его заполняют физические поля (гравитационное, электромагнитное, ядерное и пр.). Они, наряду с обычным химическим веществом, являются различными формами материи. В вакууме могут происходить различные физические процессы. Примером может служить *поляризация вакуума*, т. е. рождение пар электрон — позитрон в сильных электрических полях. Можно было бы не возражать по существу против употребления термина «эфир» в смысле носителя этих физических свойств «пустого» пространства. Возражение относится к представлению об эфире как о жидкой, твердой, упругой или какой-либо другой среде, наделенной механическими свойствами. Однако в современной физике предпочитают не пользоваться термином «эфир» в указанном смысле, а употребляют термин «вакуум».

(например, *дисперсия и абсорбция света*), но были открыты и объяснены и другие явления (*явления Керра, Зеемана, Фарадея, Коттона—Мутона, молекулярное рассеяние света* и т. д.).

Однако классическая физика и, в частности, электронная теория оказались недостаточными для истолкования явлений *атомного масштаба*. Потребовалось введение *квантовых представлений*. Необходимость и плодотворность последних обнаружилась ранее всего при изучении проблемы распределения энергии в спектре черного излучения, т. е. температурного излучения абсолютно черного тела. Применение к этой проблеме принципов классической физики приводило к глубоким противоречиям с опытом. Планк (1858—1947) в конце 1900 г. получил согласующуюся с опытом формулу для распределения энергии в спектре черного излучения. При этом он ввел чуждое классической физике представление, что излучение и поглощение света осуществляется не непрерывно, а *конечными порциями*, или *квантами энергии*, причем величина кванта определяется выражением (1.1). Для решения проблемы черного излучения Планку достаточно было принять, что этот квантовый характер излучения и поглощения света относится к *статистическим процессам*. Через пять лет Эйнштейн показал, что его необходимо распространить и на *элементарные процессы*. Согласно Эйнштейну, не только излучение и поглощение, но и *распространение света* в пространстве происходят конечными порциями — квантами света, обладающими определенной энергией и определенным импульсом. Так возродилось представление о частицах света, названных позднее *фотонами*.

Гипотеза фотонов позволила прежде всего объяснить загадочные закономерности в явлениях *фотоэффекта*, совершенно непонятные с точки зрения классической волновой теории света. Существование импульса у фотонов было доказано открытием в 1923 г. *эффекта Комптона* — изменения длины волны при рассеянии рентгеновского излучения. Гипотеза световых квантов позволила понять *химические действия света* и их закономерности. Квантовый характер излучения и поглощения света был использован Бором (1885—1962) для объяснения *спектральных закономерностей*.

Но как согласовать корпускулярные представления о свете с результатами опытов Фуко и Физо (см. пункт 8)? Эти опыты вне всякого сомнения опровергают корпускулярную теорию света в ее ньютоновской форме. Приходится поэтому признать, что к *световым корпускулам классические представления о движении неприменимы*. Интерференция и дифракция света доказывают, что в этих явлениях свет ведет себя как *волны*. Фотоэффект, комптоновское рассеяние рентгеновских лучей и пр. с меньшей убедительностью доказывают, что здесь свет действует как *частицы*. Вообще, *явления распространения света правильно описываются в рамках волновых теорий, а для описания взаимодействия света и вещества необхо-*

димы корпускулярные представления. Этот «дуализм волн и частиц» надо рассматривать как экспериментальный факт, и поэтому полная теория света должна быть не корпускулярной и не волновой, а *корпускулярно-волновой*.

Такое парадоксальное положение еще более расширилось после того, как Дэвиссоном (1881—1958) и Джермером (1896—1971) в 1927 г. была открыта *дифракция электронов*. Оказалось, что *волновые свойства присущи и частицам обычного вещества*, — идея, развивавшаяся французским физиком де Бройлем (р. 1892) за несколько лет до открытия дифракции электронов. Развитие квантовой механики позволило частично объяснить возникшее парадоксальное положение ценой отказа от основного положения классической физики — *принципа причинности в форме детерминизма*. А исследования в области *физики высоких энергий* (иначе называемой *физикой элементарных частиц*) показали, что если энергия частиц превосходит их энергию покоя, то частицы могут рождаться, исчезать или превращаться друг в друга. В этом отношении они ведут себя подобно фотонам, которые могут излучаться или поглощаться. В квантовой электродинамике фотоны рассматриваются как *кванты электромагнитного поля*. Поэтому в физике высоких энергий целесообразно говорить об *электронно-позитронном, мезонном, нуклонном* и прочих полях, квантами которых являются электроны, позитроны, мезоны, протоны, нейтроны и т. д. Таким образом, вопрос о природе света стал частью более общей проблемы строения вещества.

§ 4. Искривление световых лучей в неоднородных средах

1. В неоднородных средах представление о распространении света вдоль лучей сохраняется, но сами лучи становятся *криволинейными*. Действительно, рассмотрим среду, состоящую из плоскопараллельных слоев с постоянными показателями преломления (рис. 14), меняющимися скачкообразно от слоя к слою. Световой луч, преломляясь на границах слоев, примет форму ломаной линии. Будем неограниченно увеличивать число слоев, устремляя к нулю их толщины и скачки показателя преломления. Тогда в пределе показатель преломления среды станет меняться в пространстве непрерывно, а луч перейдет в кривую с непрерывно изменяющейся касательной. Допустим теперь, что показатель преломления меняется в пространстве как угодно, но не слишком резко (см. следующий параграф). Проведем в среде поверхности равного показателя преломления. В пределах каждого достаточно малого объема эти поверхности можно считать плоскими, а среду плоскостной, к которой применимо рассуждение, приведенное выше.

Из изложенного следует, что геометрическую форму луча можно однозначно определить из закона Снеллиуса путем предельного