

# ЧАСТЬ I

## ОПТИКА

---

### ГЛАВА I

## РАЗВИТИЕ ВЗГЛЯДОВ НА ПРИРОДУ СВЕТА

### § 1. Корпускулярная и волновая теории света

Вопрос о природе света и законах его распространения ставился уже греческими философами. В трактатах Евклида «Оптика» и «Катоптрика» (300 г. до н. э.) на основе представления о зрительных лучах, исходящих из глаза и как бы ощупывающих рассматриваемый предмет, формулируется закон прямолинейного распространения света и закон равенства углов падения и отражения. Противоположный взгляд на свет, как на тончайшие слепки («призраки»), испускаемые самими светящимися телами, излагается в поэме Лукреция «О природе вещей».

Правильной формулировки закона преломления света греческим философам получить не удалось. Произведя сравнительно точные для своего времени измерения угла преломления  $r$  при различных углах падения  $i$ , Птолемей установил постоянство отношения этих углов  $\frac{i}{r} = \text{const}$  (вместо отношения синусов), хотя такое постоянство и не соблюдалось в его опытах при больших углах падения. Отсутствие пропорциональности между углом падения и углом преломления было окончательно установлено арабским ученым Альгазеном (XI в.), который, кроме того, показал, что падающий и преломленный лучи лежат в одной плоскости с перпендикуляром, восставленным в точке падения.

В начале XVII в. были изобретены микроскоп и зрительная труба; оптические приборы получили широкое практическое применение в астрономии и навигации. Совершенствование этих приборов потребовало развития учения не только об отражении (катоптрика), но и о преломлении света (диоптрика). В 1621 г. голландский физик Снеллиус установил количественный закон преломления света, проходящего плоскую границу раздела двух сред. Математическая запись этого закона в виде отношения синусов  $\left(\frac{\sin i}{\sin r} = \text{const}\right)$  принадлежит Декарту. Им же была сделана первая

попытка объяснить этот закон, исходя из представления о корпускулярной природе света.

Эти воззрения были развиты в конце XVII в. Ньютоном в виде стройной теории истечения. Ньютон представлял себе свет состоящим из мельчайших световых частичек — *к о р п у с к у л*, испускаемых светящимся телом и летящих с огромной скоростью. К анализу движения световых корпускул Ньютон, естественно, применил сформулированные им законы механики.

В однородной среде (воздух, вода, стекло) на корпускулы не действуют никакие силы, их потенциальная энергия остается неиз-

менной, и они движутся равномерно и прямолинейно. При отражении и преломлении такое инерциальное движение нарушается и, следовательно, на корпускулы действуют силы, сосредоточенные на границе раздела двух сред. В результате работы этих сил потенциальная энергия корпускулы, втянутой в данную среду из вакуума, понижается и принимает вполне определенное значение  $U < 0$ .

Из этих представлений легко вывести законы отражения и преломления света. При упругом ударе корпускулы о поверхность нормальная составляющая ее скорости  $v_n$  меняет свой знак на обратный, а касательная составляющая  $v_k$  и величина

вектора скорости  $v = \sqrt{v_k^2 + v_n^2}$  остаются неизменными (рис. 1.1). Отсюда для углов выполняется соотношение

$$\operatorname{tg} i' = \frac{v_k}{-v_n} = -\frac{v_k}{v_n} = -\operatorname{tg} i,$$

или

$$i' = -i, \quad (1.1)$$

т. е. угол падения равен углу отражения. Различие знаков этих углов указывает на то, что они отсчитываются от перпендикуляра в противоположные стороны.

Вывод закона преломления по корпускулярной теории рассмотрим на простейшем примере перехода луча из вакуума в некоторую среду (рис. 1.2).

Скорость света в пустоте обозначим через  $c$ , а в среде — через  $v$ . Аналогично отражению, касательная составляющая скорости при переходе через границу раздела остается неизменной, т. е.

$$c \sin i = v \sin r. \quad (1.2)$$

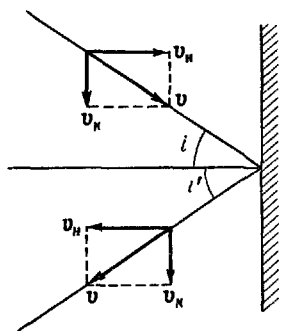


Рис. 1.1

Опыт показывает, что при переходе в плотную среду преломленный луч приближается к перпендикулярю,  $r < i$ ,  $\sin r < \sin i$  и, следовательно,  $v > c$ . Иными словами, корпускулы всегда втягиваются в среду, их потенциальная энергия понижается ( $U < 0$ ), а скорость движения в среде становится больше, чем в пустоте. Из закона сохранения энергии

$$\frac{mc^2}{2} + 0 = \frac{mv^2}{2} + U$$

находим, что

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{c^2 - \frac{2U}{m}} = \\ &= \sqrt{c^2 + \frac{2|U|}{m}} = \text{const}, \quad (1.3) \end{aligned}$$

т. е. скорость света в данной среде имеет вполне определенное постоянное значение, не зависящее от угла падения.

Из (1.2) и (1.3) получаем обычную формулировку закона преломления света:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v}{c} = \text{const} = n \quad (1.4)$$

— отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная, не зависящая от угла падения и называемая показателем преломления данной среды  $n$ .

В 1666 г. Ньютон показал, что белый свет является составным и содержит «чистые цвета», каждый из которых характеризуется своей преломляемостью. Последняя особенность была объяснена Ньютоном различием в массе корпускул. Обладая наименьшей массой, корпускулы фиолетового света, согласно (1.3) и (1.4), сильнее втягиваются в среду, летят в ней с большей скоростью и сильнее преломляются, чем корпускулы красного света, обладающие наибольшей массой. Для промежуточных цветов массы корпускул имеют промежуточные значения и при преломлении они располагаются между красным и фиолетовым лучами. Таким образом, корпускулярная теория дала простое и наглядное объяснение явления дисперсии света. Лишь несколько столетий спустя выяснилась ошибочность такой трактовки этого весьма сложного явления (см. ниже § 6).

Наряду с корпускулярной концепцией Декарта — Ньютона в XVII в. возникла и развивалась противоположная, волновая

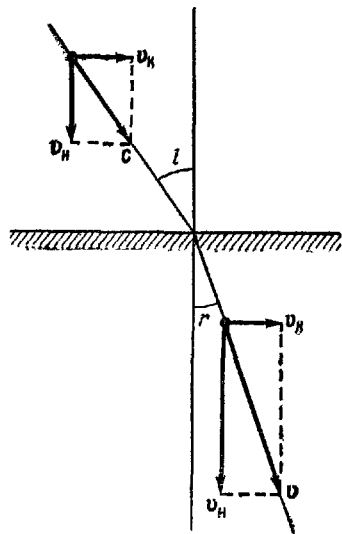


Рис. 12

теория Гука — Гюйгенса. В «Трактате о свете», представленном Парижской Академии в 1678 г. и опубликованном в 1690 г., Гюйгенс исходит из представления о том, что свет есть процесс распространения продольных деформаций в некоторой материальной среде, пронизывающей все тела, — мировом эфире. Для анализа законов распространения этих деформаций Гюйгенс предложил простой и наглядный метод, названный впоследствии принципом Гюйгенса (т. I, § 60). Этим методом Гюйгенс объяснил прямолинейность распространения света и вывел законы отражения и преломления.

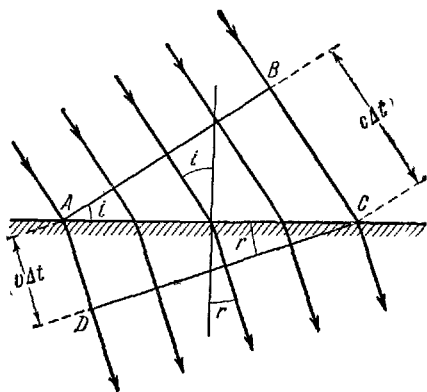


Рис. 1.3.

Гюйгенс объяснил прямолинейность распространения света и вывел законы отражения и преломления.

Поскольку принцип Гюйгенса и основные следствия из него были подробно рассмотрены в I томе нашего курса, то для сопоставления с (1.4) мы лишь напомним вывод закона преломления. Пусть фронт плоской волны  $AB$ , распространяющейся в вакууме со скоростью  $c$ , падает под углом  $i$  на границу со средой, в которой скорость распространения равна  $v$  (рис. 1.3). Спустя некоторый

промежуток времени  $\Delta t$ , волна, распространяющаяся из точки  $B$ , пройдет путь  $BC = c \Delta t$  и достигнет границы раздела. За то же время волна, распространяющаяся от точки  $A$  в среде со скоростью  $v$ , пройдет путь  $AD = v \Delta t$ . Направление распространения фронта волны  $DC$  в среде характеризуется углом преломления  $r$ . Из рисунка видно, что сторона  $AC$  является одновременно гипотенузой двух прямоугольных треугольников и

$$AC = \frac{c \Delta t}{\sin i} = \frac{v \Delta t}{\sin r}.$$

Отсюда, после сокращения на  $\Delta t$ , получаем:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{c}{v} = \text{const} = n. \quad (1.5)$$

Несколько иная общая формулировка закона распространения волн была дана Ферма (1601—1655). Согласно принципу Ферма, лучи света распространяются по пути, приводящему к цели в кратчайшее время. Покажем применение этого принципа Ферма к решению той же задачи о преломлении света.

На рис. 1.4 показан ход луча от источника  $S$ , расположенного в вакууме, до точки  $M$ , расположенной в среде под границей раздела. В каждой среде кратчайшим путем будет прямая линия, т. е. лучи  $SN$  и  $NM$ . Для нахождения положения точки  $N$  охарактеризуем ее расстоянием  $x$  от перпендикуляра, опущенного из источника на плоскость раздела, и подсчитаем время, затраченное светом на прохождение ломаного пути  $SNM$ :

$$\tau = \frac{SN}{c} + \frac{NM}{v} = \frac{\sqrt{h_0^2 + x^2}}{c} + \frac{\sqrt{h^2 + (l-x)^2}}{v}. \quad (1.6)$$

Для нахождения минимума продифференцируем выражение (1.6) по  $x$  и приравняем полученную производную нулю:

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{x}{c\sqrt{h_0^2 + x^2}} - \frac{l-x}{v\sqrt{h^2 + (l-x)^2}} = \frac{\sin i}{c} - \frac{\sin r}{v} = 0. \quad (1.7)$$

Нетрудно видеть, что условие (1.7) приводит к тому же самому закону преломления (1.5), который был выведен из принципа Гюйгенса.

Следует отметить, что принцип Ферма сохранил значение до наших дней и послужил основой для аналогичной, весьма общей формулировки законов механики (в том числе механики теории относительности и микрочастиц — квантовой механики).

Таким образом, из волновой теории также следует постоянство отношения синусов угла падения и угла преломления, но связь (1.5) показателя преломления  $n$  со скоростями распространения получается обратной соотношению (1.4), вытекающему из корпускулярной теории. Поскольку величина  $n$  в среде всегда больше единицы, то по корпускулярной теории  $v > c$ , т. е. скорость света в среде должна быть всегда больше скорости света в пустоте, а из волновой теории вытекает обратное соотношение  $v < c$ .

По предложению Гюйгенса датский астроном Ремер произвел определение скорости света из наблюдений над запаздыванием периодически повторяющихся затмений спутников Юпитера при перемещении Земли из ближайшей к Юпитеру в наиболее удаленную от него точку своей орбиты. По данным Ремера, для прохождения расстояния, равного радиусу земной орбиты, свет затрачивает около 11 мин. (по современному, более точным измерениям — около 8 мин.), что дало значение  $c > 225\,000$  км/сек. Определение столь огромных значений  $c$  и  $v$  в земных условиях, для проверки

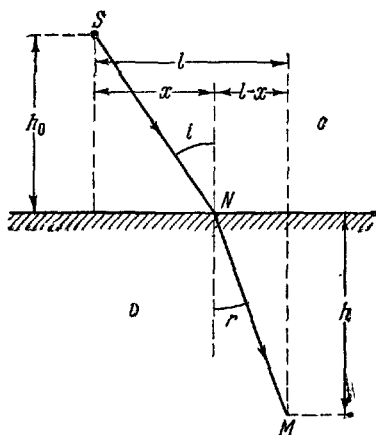


Рис. 1.4.

соотношений (1.4) и (1.5), требовало умения точно измерять очень малые промежутки времени и смогло быть технически осуществлено лишь спустя полтора века (см. ниже, § 2).

Итак, к концу XVII в. в оптике сложилось весьма своеобразное положение. И корпускулярная и волновая теории, представлявшие собой противоположные взгляды на природу света, объясняли основные оптические закономерности — прямолинейность распространения света в однородной среде, законы отражения и преломления света. Дальнейшие попытки более полного объяснения наблюдаемых фактов приводили к большим затруднениям в обеих теориях. Так, Гюйгенс не смог объяснить физической причины наличия разных цветов и механизм изменения скорости распространения света в эфире, пронизывающем различные тела. С другой стороны, Ньютону, для объяснения того, что при падении света на границу раздела двух прозрачных тел происходит одновременно и частичное отражение и частичное преломление, пришлось предположить наличие у корпускул периодических «приступов» отражения и преломления.

Оставалось обратиться к опыту, но опыт в XVII в. был еще весьма скуден. И все же уже тогда был обнаружен целый ряд явлений, подробное изучение и объяснение которых привело впоследствии к триумфу волновую теорию.

Так, Гримальди в 1663 г. впервые наблюдает явления дифракции и интерференции света. Бойль и Гук обнаружили окрашивание тонких слоев вещества, обусловленное интерференцией света, отраженного от верхней и нижней поверхностей тонкой пленки.

Ньютон количественно исследует возникающие при этом интерференционные кольца (см. ниже в § 11 «кольца Ньютона»). В 1662 г. Бартолинус обнаруживает двойное лучепреломление. Изучая это явление, Гюйгенс открывает поляризацию света, но не может дать правильного ее объяснения с волновой точки зрения. Более того, в 1717 г. Ньютон показывает, что поляризация света может быть объяснена при предположении поперечности световых волн, и это служит аргументом *п р о т и* в волновой теории: как в воздухе могут распространяться только продольные звуковые волны (т. I, § 59, 61), так и в очень тонком и разреженном мировом эфире представлялась невозможной упругая деформация поперечного сдвига.

Огромный авторитет Ньютона, использовавшийся его многочисленными последователями, и незавершенность волновой теории привели к тому, что весь XVIII век прошел под знаком корпускулярной теории. Лишь немногие, наиболее прозорливые ученые разделяли и развивали далее воззрения Гюйгенса. В числе этих ученых были Эйлер и Ломоносов.

В качестве основного возражения против корпускулярной теории Ломоносов выдвигает экспериментальный факт отсутствия взаимодействия пересекающихся пучков света. В «Слове о происхождении света» (1756 г.) он вводит представление о «зыблющемся», т. е. колебательном, движении частиц эфира. Если Гюйгенс рассматривал свет как импульсы, распространяющиеся в упругом эфире, то Ломоносов придает волновым представлениям законченную форму, рассматривая свет как распространение и передачу колебательного процесса от одних частиц эфира к соседним.

Колебательный процесс характеризуется периодом колебаний  $T$ , частотой  $\nu$ , длиной волны  $\lambda$  и скоростью распространения  $v$ . Эти величины связаны между собой соотношением (т. I, § 55)

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu. \quad (1.8)$$

Различием в частоте колебаний эфира Эйлер и объясняет различие цвета тел.

Начало XIX в. характеризуется интенсивным развитием математической теории колебаний и волн и успешным ее применением к объяснению ряда оптических явлений. В 1801 г. Юнг устанавливает принцип интерференции и на основании этого принципа объясняет окраску тонких пленок вещества. Эта работа была началом триумфа волновой теории света. В 1818 г. сторонники корпускулярной теории выдвигают в качестве темы на конкурсе Парижской Академии вопрос о дифракции света. Однако премию получает Френель, давший объяснение дифракции, исходя из волновой теории. Пользуясь принципом Гюйгенса и принципом интерференции Юнга, Френель объясняет прямолинейности распространения света и малые отклонения от прямолинейности — дифракцию (см. ниже, § 13). В частности, Френель показывает, что в центре геометрической тени от малого круглого экрана должен быть свет, что и было подтверждено экспериментально.

Борьба разгорелась между сторонниками теории истечения (Био) и волновой теории света при объяснении явлений поляризации света. Френель и Араго, исследуя интерференцию поляризованного света, обнаружили отсутствие интерференции для лучей, поляризованных взаимно перпендикулярно. Юнг объяснил этот факт поперечностью световых волн. Френель показал механическую возможность поперечных колебаний (сдвига) в упругих твердых телах. Введение таких свойств для светоносного эфира сразу объяснило с простой и единой точки зрения все многочисленные явления поляризации света, для объяснения каждого из которых Био приходилось приписывать все новые и более искусственные свойства световым корпускулам. В волновой теории после Френеля остался лишь один теоретический пробел в объяснении

различной преломляемости цветных лучей. Кроме того, не был подтвержден прямым опытом основной вывод (1.5) волновой теории — об уменьшении скорости распространения света в оптически плотной среде. Такие прямые опыты были осуществлены лишь в середине XIX в.

## § 2. Скорость света

Первая экспериментальная работа по определению скорости света в земных условиях была осуществлена Физо в 1849 г.

На рис. 1.5 изображена схема опыта Физо. Свет, испускаемый источником  $S$ , отражается полупрозрачной пластинкой  $P$  и направляется к зеркалу  $M$ .

На пути луча располагается быстро вращающееся зубчатое колесо  $K$ , ось которого  $OO'$  параллельна лучу. Лучи света, пройдя через промежутки между зубьями, отражаются зеркалом  $M$  и направляются обратно через зубчатое колесо и пластинку  $P$  к глазу наблюдателя.

При медленном вращении колеса  $K$  свет, пройдя через промежуток между зубьями, например  $a$  на рис. 1.5 (нижний рисунок), успевает возвратиться через этот же промежуток и попадает в глаз наблюдателя. В те моменты, когда путь лучей пересекается зубцом, зачерненная поверхность зубца поглощает свет и последний не попадает к наблюдателю.

Таким образом, при малой угловой скорости  $\omega$  наблюдатель воспринимает мелькающий свет.

Если увеличивать скорость вращения колеса, то при некотором ее значении  $\omega = \omega_1$  свет, прошедший через промежуток  $a$  между зубьями, дойдя до зеркала  $M$  и обратно, спустя время  $t = \frac{2l}{c}$  ( $c$  — скорость света,  $l$  — расстояние от колеса  $K$  до зеркала  $M$ ), не попадет в тот же самый промежуток, а будет перекрыт зубцом  $l$ , занявшим к этому моменту положение промежутка  $a$ . Следовательно

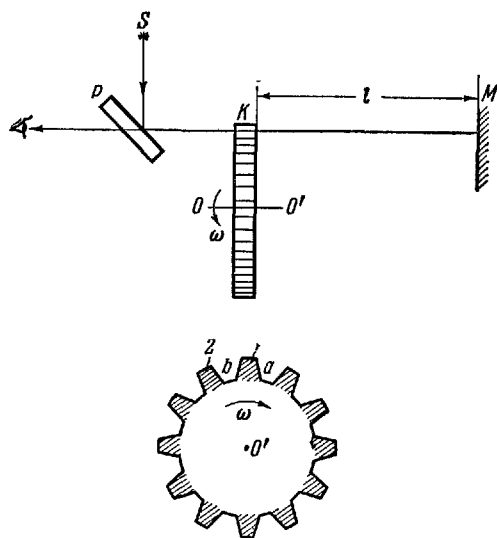


Рис. 1.5.