

разные явления, разные методы исследования и разные практические применения. Поэтому на оптику нельзя смотреть как на замкнутую дисциплину, изучающую только оптическую область спектра, отделенную от других областей резкими границами. Закономерности и результаты, найденные в этих других областях, могут оказаться применимыми в оптической области спектра и обратно.

Практическое значение оптики и ее влияние на другие отрасли знания исключительно велики. Изобретение телескопа и спектроскопа открыло перед человеком удивительнейший и богатейший мир явлений, происходящих в необъятной Вселенной. Изобретение микроскопа произвело революцию в биологии. Фотография помогла и продолжает помогать чуть ли не всем отраслям науки. Одним из важнейших элементов научной аппаратуры является линза. Без нее не было бы микроскопа, телескопа, спектроскопа, фотоаппарата, кино, телевидения и т. п. Не было бы очков, и многие люди, которым перевалило за пятьдесят лет, были бы лишены возможности читать и выполнять многие работы, связанные со зрением.

Область явлений, изучаемая физической оптикой, весьма обширна. Оптические явления теснейшим образом связаны с явлениями, изучаемыми в других разделах физики, а оптические методы исследования относятся к наиболее тонким и точным. Поэтому неудивительно, что оптике на протяжении длительного времени принадлежала ведущая роль в очень многих фундаментальных исследованиях и развитии основных физических воззрений. Достаточно сказать, что обе основные физические теории текущего столетия — теория относительности и теория квантов — зародились и в значительной степени развились на почве оптических исследований. Изобретение лазеров открыло новые широчайшие возможности не только в оптике, но и ее приложениях в различных отраслях науки и техники.

§ 2. Геометрическая оптика

1. Простейшие оптические явления, например возникновение теней и получение изображений в оптических приборах, могут быть поняты в рамках так называемой *геометрической оптики*. В основу формального построения последней можно положить четыре закона, установленных опытным путем: 1) *закон прямолинейного распространения света*; 2) *закон независимости световых пучков*; 3) *закон отражения* и 4) *закон преломления света*. Для понимания более сложных явлений нужна уже *физическая оптика*, рассматривающая эти явления в связи с *физической природой света*. Физическая оптика позволяет, в частности, не только вывести все законы геометрической оптики, но и установить *границы их применимости*. Без знания этих границ формальное применение законов геометрической оптики может в конкретных случаях привести к результатам,

противоречащим наблюдаемым явлениям. Поэтому нельзя ограничиться чисто формальным построением геометрической оптики, а необходимо смотреть на нее как на *раздел физической оптики*. Обоснование геометрической оптики будет дано постепенно на протяжении нашего курса. Сейчас же ограничимся формулировкой перечисленных четырех опытных законов.

2. Согласно закону прямолинейного распространения, свет в прозрачной однородной среде распространяется по прямым линиям. Опытным доказательством этого закона могут служить резкие тени, отбрасываемые непрозрачными телами, освещаемыми точечными источниками света, т. е. источниками, размеры которых весьма малы по сравнению с размерами освещаемого тела и расстоянием до него. Непрозрачный предмет AB (рис. 1), поставленный

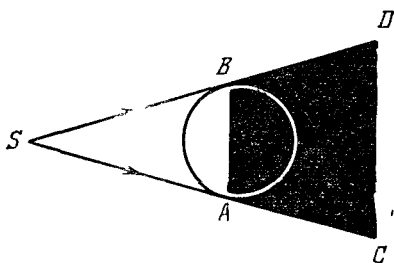


Рис. 1.

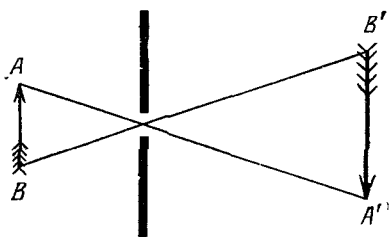


Рис. 2.

на пути светового пучка от точечного источника S , не пропускает свет в пространство за этим предметом, ограниченное боковой поверхностью конуса SCD , касающейся краев предмета AB . Однако на распределение света вне этого пространства присутствие предмета AB не оказывает никакого влияния. Это и значит, что распространение света происходит вдоль прямых линий ¹⁾. Другое доказательство дает общеизвестный способ получения изображений светящихся предметов в камере с малым отверстием (камере-обскуре, рис. 2).

Наблюдаются отступления от закона прямолинейного распространения света. Рассмотрим, например, тень от резкого края непрозрачного предмета. Если источник света точечный, то, согласно этому закону, следовало бы ожидать, что на экране получится совершенно резкий переход от света к тени. На самом деле возникает переходная область, в которой освещенность меняется непре-

¹⁾ Протяженный источник ведет себя как совокупность точечных источников, каждому из которых соответствует свое распределение светового поля на экране. В результате наложения таких картин наряду с тенями возникают полутени, т. е. области более или менее плавного перехода от освещенных частей экрана к менее освещенным и совсем темным,

рывно и не монотонно: в ней наблюдаются «дифракционные полосы». Аналогичное положение имеет место в камере с малым отверстием. Если отверстие недостаточно мало, то изображение предмета размыто, так как светящаяся точка изображается в виде светлого кружка. Можно было бы ожидать, что при уменьшении отверстия размеры кружка будут уменьшаться, а отчетливость изображения увеличиваться, хотя само изображение и получится менее ярким. На самом деле это оправдывается лишь до известного предела, а при дальнейшем уменьшении отверстия резкость изображения снова начинает ухудшаться. Когда диаметр отверстия $\sim 10^{-3}$ мм, а источник света точечный, получается практически равномерная освещенность экрана.

Приведенные примеры показывают, что свет, подобно звуку, огибает препятствия, стоящие на пути его распространения. Это явление называется *дифракцией*.

Если среда мутная, например туман, то из-за дифракции прямолинейное распространение света сопровождается его *рассеянием в стороны*.

3. Закон независимости световых пучков состоит в том, что *распространение всякого светового пучка в среде совершенно не зависит от того, есть в ней другие пучки света или нет*. Световой пучок, прошедший через какую-либо область пространства, выходит из нее одним и тем же, независимо от того, заполнена она другим светом или не заполнена. Так, изображение на сетчатке глаза не изменится, если свет, образующий это изображение, будет на своем пути проходить через боковые пучки света, не попадающие в глаз. Границы применимости закона независимости световых пучков лучше рассматривать в связи с теорией света (см. §§ 3, 5 и гл. XI).

Закон независимости световых пучков необходимо дополнить утверждением, определяющим совместное действие световых пучков при их наложении друг на друга. Оно состоит в том, что *освещенность экрана, создаваемая несколькими световыми пучками, равна сумме освещенностей, создаваемых каждым пучком в отдельности*. Нарушения справедливости этого утверждения имеют место в явлениях *интерференции света*.

4. На основе законов прямолинейного распространения и независимости световых пучков сложилось представление о *световых лучах*. В математическом смысле луч есть линия, вдоль которой распространяется свет. Это — математическая абстракция. О существовании луча в таком смысле можно говорить лишь постольку, поскольку он входит в состав светового пучка, содержащего бесконечное множество лучей. Реальное существование имеют не математические лучи и бесконечно тонкие пучки света, а *пучки конечного поперечного сечения*, вырезаемые, например, диафрагмами. Поэтому под *лучом в физическом смысле этого слова мы будем понимать конечный, но достаточно узкий световой пучок, который еще может*

существовать изолированно от других пучков. Луч, выделенный какой-либо диафрагмой, не может быть бесконечно длинным, так как из-за дифракции распространение света сопровождается увеличением поперечных размеров луча, т. е. его боковым уширением и размытием. Чем длиннее луч, тем больше это дифракционное уширение. О луче можно говорить только тогда, когда уширение мало по сравнению с поперечными размерами самого луча. Для этого длина луча не должна превышать определенного предела, величина которого тем больше, чем шире луч (см. § 6, формулу (6.17)).

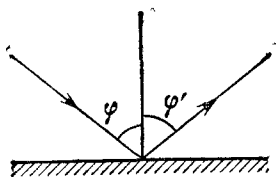


Рис. 3.

5. Когда луч достигает плоской границы раздела двух прозрачных сред, он частично проходит во вторую среду (преломляется), частично возвращается обратно (отражается). Закон отражения света был известен еще грекам. Он утверждает, что падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к границе раздела в точке падения (эта плоскость называется плоскостью падения), причем угол падения φ равен углу отражения φ' (рис. 3).

6. Закон преломления был установлен экспериментально в 1621 г. голландским ученым Снеллиусом (1580—1626) и опубликован только после его смерти. Позднее Декарт (1596—1650) в 1637 г. опубликовал тот же закон, не ссылаясь на Снеллиуса. Знал ли Декарт работы Снеллиуса — этот вопрос остался открытым, хотя он и был предметом многочисленных дискуссий. Декарт получил закон преломления Снеллиуса, пользуясь аналогией между преломлением света и прохождением упругого шара (мяча) через границу раздела воздуха с водой. Его рассуждения были неубедительны и крайне туманны, но окончательный результат, к которому он пришел, оказался верным.

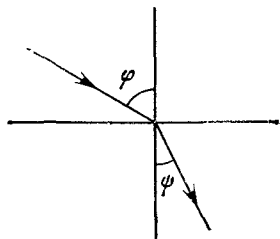


Рис. 4.

Согласно закону преломления Снеллиуса, преломленный луч лежит в плоскости падения, причем отношение синуса угла падения φ (рис. 4) к синусу угла преломления ψ для рассматриваемых сред зависит только от длины световой волны, но не зависит от угла падения, т. е.

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = n_{21}. \quad (2.1)$$

Постоянная величина n_{21} называется относительным показателем или коэффициентом преломления второй среды относительно первой. Показатель преломления среды относительно вакуума назы-

вают абсолютным показателем (коэффициентом) преломления этой среды. Его будем обозначать через n , снабжая эту букву, если требуется, соответствующими индексами. Например, n_1 — показатель преломления первой, а n_2 — второй сред. Ради краткости величину n обычно называют просто показателем (коэффициентом) преломления среды, т. е. опускают прилагательное «абсолютный».

Относительный показатель преломления n_{21} выражается через абсолютные показатели n_1 и n_2 соотношением

$$n_{21} = n_2/n_1. \quad (2.2)$$

Это соотношение можно получить путем предельного перехода. Пусть световой луч падает из вакуума на плоскопараллельную пластинку с показателем преломления n_1 , а затем попадает в среду с показателем преломления n_2 (рис. 5). Для преломления на границах пластинки можно написать

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_1} = n_1, \quad \frac{\sin \varphi_1}{\sin \psi} = n_{21}.$$

Перемножая написанные равенства, получим

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = n_{21}n_1. \quad (2.3)$$

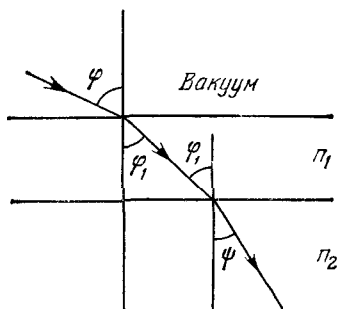


Рис. 5.

Это соотношение справедливо, какова бы ни была толщина пластинки. Оно остается верным и в предельном случае, когда толщина пластинки стремится к нулю. Но тогда свет будет преломляться так, как если бы никакой пластинки вообще не было. Поэтому должно быть $\sin \varphi/\sin \psi = n_2$. Сравнение этого результата с предыдущим и приводит к соотношению (2.2).

Слабая сторона приведенного рассуждения состоит в следующем. Показатель преломления есть *макроскопическая характеристика среды*. Когда толщина пластинки, разделяющей среды 1 и 2, становится порядка атомных размеров, ее уже нельзя рассматривать как непрерывную среду, так что понятие показателя преломления теряет смысл. Однако окончательный результат (2.2) остается верным. Он подтверждается опытом и в дальнейшем при рассмотрении теории отражения и преломления света будет выведен с различных точек зрения (см. §§ 3, 64).

С учетом соотношения (2.2) закон преломления можно записать в симметричной форме:

$$n_1 \sin \varphi = n_2 \sin \psi. \quad (2.4)$$

Из формулы (2.2) следует также:

$$n_{21} = 1/n_{12}. \quad (2.5)$$

7. Если $n_{21} < 1$, то может оказаться, что величина $\sin \varphi$, формально вычисленная по формуле (2.1), начнет превосходить единицу, т. е. $\sin \varphi / n_{21} > 1$. Соответствующего угла преломления не существует. Поэтому преломленный луч не возникает, а свет отражается полностью. Это явление называется *полным отражением*. Угол падения, при котором оно возникает, определяется условием $\varphi \geq \varphi_0$, причем

$$\sin \varphi_0 = n_{21}. \quad (2.6)$$

Величина φ_0 называется *предельным углом полного отражения*. Полное отражение будет исследовано в § 66.

8. Если поверхность тела, на которую падают световые лучи, не плоская, а кривая, то ее можно мысленно разбить на малые площадки, считая каждую из них плоской. Тогда ход лучей можно найти по законам отражения и преломления, изложенным выше, а затем выполнить предельный переход к гладкой поверхности, устремляя к нулю размеры каждой площадки. Однако этот прием применим только тогда, когда кривизна поверхности не превышает некоторого предела, так как в противном случае начинают проявляться отступления от законов правильного отражения и преломления и наступает дифракция.

Шероховатые поверхности дают не правильное, а *рассеянное*, или *диффузное*, отражение и преломление света. Только благодаря этому поверхность тела становится видимой. Абсолютно зеркальная поверхность невидима, видны только отраженные от нее лучи, попадающие от источников света, расположенных вне зеркала, т. е. видны только сами эти источники света.

ЗАДАЧИ

1. Два плоских зеркала 1 и 2 наклонены друг к другу, образуя двугранный угол α (рис. 6). Падающий луч, лежащий в плоскости, перпендикулярной к ребру двугранного угла, отражается сначала от одного, а затем от другого зеркала. Показать, что в результате этих двух отражений луч отклоняется на угол δ , величина которого не зависит от направления падающего света. Вычислить угол δ .

Решение. Как видно из треугольника ABD , $\delta = 2(\varphi_1 + \varphi_2)$, а из треугольника ABC $\varphi_1 + \varphi_2 = \alpha$. Поэтому $\delta = 2\alpha$. Результат справедлив при любом α и любом направлении падающего света, если только угол α отсчитывать от зеркала 1, вращая его по кратчайшему пути к зеркалу 2, а угол δ — от направления падающего луча s_1 к направлению выходящего луча s_2 , производя вращение в том же направлении.

2. Показать, что луч света, последовательно отражающийся от трех взаимно перпендикулярных зеркал, меняет свое направление на противоположное.

Решение. Пусть s_0, s_1, s_2, s_3 — единичные векторы падающего и отраженных лучей, а N_1, N_2, N_3 — единичные нормали к отражающим плоскостям зеркал. Тогда

$$s_1 - s_0 = -2(N_1 s_0) N_1,$$

$$s_2 - s_1 = -2(N_2 s_1) N_2,$$

$$s_3 - s_2 = -2(N_3 s_2) N_3.$$

Из первого уравнения скалярным умножением на N_2 и N_3 получаем

$$(N_2 s_1) = (N_2 s_0), \quad (N_3 s_1) = (N_3 s_0).$$

Аналогично, скалярное умножение второго уравнения на N_3 дает

$$(N_3 s_2) = (N_3 s_1) = (N_3 s_0).$$

Почленно складывая все три уравнения и учитывая найденные соотношения, получим

$$s_3 - s_0 = -2(N_1 s_0)N_1 - 2(N_2 s_0)N_2 - 2(N_3 s_0)N_3 = -2s_0,$$

откуда $s_3 = -s_0$.

Полученный результат лежит в основе устройства уголкового отражателя, применяющегося для изменения направления распространения света на противоположное. Уголкового отражателя можно получить, отсекая от стеклянного куба с посеребренными гранями трехгранный угол плоскостью, перпендикулярной к пространственной диагонали куба. Всякий луч, вступивший внутрь так полученной пирамиды через ее основание, испытав отражения от трех ее боковых граней, выйдет через то же основание, изменив свое направление на противоположное. Действительно, преломление на основании пирамиды, испытываемое падающим лучом, не играет роли, поскольку оно полностью компенсируется преломлением на том же основании при выходе луча из пирамиды.

3. Луч света проходит через ряд однородных сред, разграниченных плоскостями, параллельными между собой. Показать, что направление луча в последней среде (если луч проникает в нее) зависит только от угла падения и от показателей преломления первой и последней сред. В частности, если показатели преломления первой и последней сред

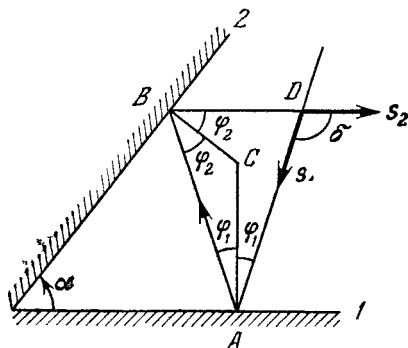


Рис. 6.

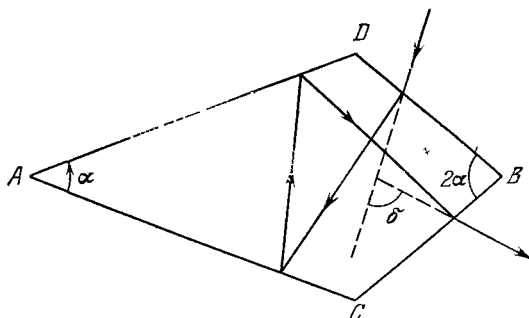


Рис. 7.

одинаковы, то луч войдет в последнюю среду параллельно тому направлению, которое он имел в первой среде.

4. В преломляющей призме (рис. 7) $\angle C = \angle D$, $\angle A = \alpha$, $\angle B = 2\alpha$. Световой луч вступает в призму через грань BD , находясь в ее главном сечении, т. е. в плоскости, перпендикулярной к преломляющим ребрам призмы, а затем после-

довательно отражается от граней AC и AD , выходя наружу через грань BC . Показать, что угол δ отклонения вышедшего луча от исходного направления не зависит от угла падения, Вычислить угол δ .

О т в е т. $\delta = 2\alpha$.

5. Исследовать преломление светового луча в главном сечении трехгранной призмы. Определить угол отклонения светового луча δ от исходного направления и его наименьшее значение δ_{\min} .
Решение. Как видно из треугольника CDE (рис. 8),

$$\delta = (\varphi_1 - \psi_1) + (\varphi_2 - \psi_2).$$

Далее, из четырехугольника $ACFD$, у которого углы C и D — прямые, имеем: $A + F = \pi$, а из треугольника CDF $(\psi_1 + \psi_2) + F = \pi$, так что $\psi_1 + \psi_2 = A = \text{const}$, где A — преломляющий угол призмы. Следовательно,

$$\delta = \varphi_1 + \varphi_2 - A. \quad (2.7)$$

Для нахождения минимума угла отклонения δ удобно за независимую переменную принять угол преломления ψ_1 , так как при этом будет достигнута симметрия и упрощение выкладок. Для первой производной получаем

$$\frac{d\delta}{d\psi_1} = \frac{d\varphi_1}{d\psi_1} + \frac{d\varphi_2}{d\psi_1} = \frac{d\varphi_1}{d\psi_1} - \frac{d\varphi_2}{d\psi_2},$$

или, на основании закона преломления,

$$\frac{d\delta}{d\psi_1} = n \left(\frac{\cos \psi_1}{\cos \varphi_1} - \frac{\cos \psi_2}{\cos \varphi_2} \right). \quad (2.8)$$

Аналогично, для второй производной

$$\begin{aligned} \frac{d^2\delta}{d\psi_1^2} &= n \left(\frac{d}{d\psi_1} \frac{\cos \psi_1}{\cos \varphi_1} - \frac{d}{d\psi_1} \frac{\cos \psi_2}{\cos \varphi_2} \right) = n \left(\frac{d}{d\psi_1} \frac{\cos \psi_1}{\cos \varphi_1} + \frac{d}{d\psi_2} \frac{\cos \psi_2}{\cos \varphi_2} \right) = \\ &= n \sum_{i=1}^2 \frac{\sin \psi_i}{\cos^3 \psi_i} (n^2 \cos^2 \psi_i - \cos^2 \varphi_i). \end{aligned}$$

Если $n > 1$, то $d^2\delta/d\psi_1^2 > 0$, а потому кривая $\delta = \delta(\psi_1)$ во всех точках обращена выпуклостью вниз. Отсюда следует, что угол δ достигает минимума при $\varphi_1 = \varphi_2$, т. е. при симметричном ходе луча через призму. Других минимумов (и вообще экстремумов) быть не может.

При симметричном ходе луча $\varphi = 1/2 (A + \delta_{\min})$, $\psi = 1/2 A$, и следовательно,

$$n = \frac{\sin 1/2 (A + \delta_{\min})}{\sin 1/2 A}. \quad (2.9)$$

На этой формуле основан удобный метод измерения показателя преломления.

6. Световой луч падает на боковую грань призмы под малым углом. Преломляющий угол призмы A мал (рис. 8). Вычислить угол отклонения луча δ , ограничиваясь членами первой степени по A . Вычислить также угол наименьшего отклонения δ_{\min} с точностью до членов порядка A^3 включительно.

Решение. $\delta = (\varphi_1 - \psi_1) + (\varphi_2 - \psi_2) \approx (n\psi_1 - \psi_1) + (n\psi_2 - \psi_2) = (n-1)(\psi_1 + \psi_2)$, или, на основании соотношения $\psi_1 + \psi_2 = A$,

$$\delta = (n-1)A. \quad (2.10)$$

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.