

# 34

## Отражение и преломление света

Способность видеть чрезвычайно важна, ибо зрение позволяет нам получать значительную часть информации о внешнем мире. Как мы видим? Что представляет собой нечто называемое нами *светом*, которое, попадая в наш глаз, вызывает зрительные ощущения? Что же такое свет? Каким образом с его помощью нам удастся видеть тот необычайно широкий диапазон явлений, которые мы наблюдаем? На протяжении нескольких следующих глав именно свет будет предметом нашего рассмотрения.

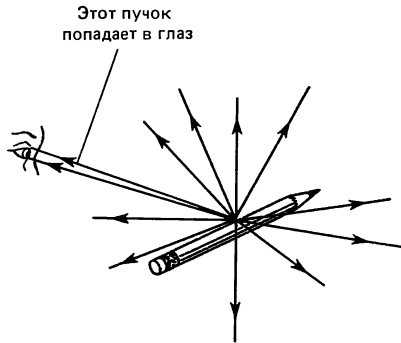
Любой объект становится видимым одним из двух способов: 1) он сам может быть источником света, как, например, электрическая лампа, свеча или звезда, и мы видим свет, непосредственно испускаемый этим источником; 2) чаще же видимый предмет отражает падающий на него свет (источником света в этом случае может быть солнце, лампа или что-нибудь еще). Понять, каким образом тела *испускают* свет, удалось лишь в 20-е годы нашего века; об этом речь пойдет в гл. 40. Но представление о том, каким образом свет *отражается* от предметов, возникло гораздо раньше, и мы обсудим его в разд. 34.3.

### 34.1. Световые лучи

Огромное количество данных свидетельствует о том, что свет при самых различных обстоятельствах распространяется прямолинейно. Предметы, освещаемые точечными источниками света, например солнцем, отбрасывают четко очерченные тени. Карманный фонарик дает узкий пучок света. Фактически о положении окружающих нас предметов в пространстве мы судим, подразумевая, что свет от объекта попадает в наш глаз по прямолинейным траекториям. Наша ориентация во внешнем мире целиком основана на предположении о прямолинейном распространении света.

Это разумное допущение привело к представлению о **световых лучах**. Прямолинейные траектории распространения света и получили название **световых лучей**. В действительности луч — это идеализация: имеется в виду бесконечно узкий пучок света. Если мы видим предмет, то

**Рис. 34.1.** Каждая точка объекта испускает световые лучи. Здесь изображен узкий пучок лучей, выходящих из одной точки и попадающих в глаз наблюдателя.



это означает, что нам в глаз попадает свет от каждой точки предмета. Хотя световые лучи выходят из каждой точки по всем направлениям, лишь узкий пучок этих лучей попадает в глаз наблюдателя (рис. 34.1). Если наблюдатель сдвинет голову чуть в сторону, то в его глаз от каждой точки предмета будет попадать уже другой пучок лучей.

Из гл. 33 мы узнали, что свет можно рассматривать как электромагнитную волну. Хотя представления о световых лучах не затрагивают его электромагнитной природы (волновой природой света мы займемся, начиная с гл. 36), на его основе удалось весьма успешно объяснить многие свойства света, такие как отражение, преломление и формирование изображений зеркалами и линзами. Поскольку при этом рассматриваются прямолинейные лучи, падающие под различными углами, соответствующий раздел физики получил название *геометрической оптики*<sup>1)</sup>.

## 34.2. Скорость света и показатель преломления

Галилей пытался измерить скорость света по времени прохождения светом известного расстояния между вершинами двух холмов. На вершине одного из холмов Галилей поставил своего ассистента, на вершине другого встал сам. Ассистенту было наказано снять крышку со своего фонаря в тот момент, когда он увидит вспышку света фонаря Галилея. Галилей измерил промежуток времени между вспышкой своего фонаря и моментом, когда он увидел вспышку света фонаря ассистента. Этот промежу-

<sup>1)</sup> В геометрической оптике мы в основном пренебрегаем волновыми свойствами света. Это означает, что если свет падает на предмет или отверстие, то их размеры должны быть большими по сравнению с длиной волны света (так что такими волновыми явлениями, как интерференция и дифракция, о которых говорилось в гл. 15, можно пренебречь), и мы не рассматриваем, что происходит со светом на краях предметов (см., однако, гл. 36 и 37).

ток оказался столь коротким, что Галилей счел его характеризующим только быстроту реакции человека и заключил, что скорость света должна быть беспрельно велика.

Скорость света имеет конечную величину. Первым это успешно продемонстрировал датский астроном Оле Рёмер (1644–1710). Рёмер заметил, что тщательно измеренный период обращения одного из спутников («луны») Юпитера (Ио, средний период обращения 42,5 ч) несколько меняется в зависимости от относительного движения Земли и Юпитера. Когда Земля удалялась от Юпитера, период Ио слегка увеличивался, когда Земля приближалась к Юпитеру, период слегка уменьшался. Рёмер приписал эту вариацию периода дополнительному времени, которое требовалось свету, чтобы преодолеть возросшее расстояние, когда Земля удалялась от Юпитера, или выигрышу во времени, когда Земля приближалась к Юпитеру и свет преодолевал меньшее расстояние. Рёмер заключил, что скорость света хотя и очень велика, но конечна.

После Рёмера скорость света неоднократно измеряли различными способами. Наиболее важные результаты были получены в США Альбертом Майкельсоном (1852–1931). В серии прецизионных экспериментов, выполненных с 1880-х по 1920-е годы, Майкельсон использовал установку с вращающимся восьмигранным зеркалом, схема которой представлена на рис. 34.2. Свет от источника направляется на одну из граней зеркала. Отраженный свет проходит путь до расположенного на большом расстоянии неподвижного зеркала и обратно, как показано на рис. 34.2. При правильно подобранной скорости вращения восьмигранного зеркала пучок света, возвращающийся от неподвижного зеркала, после отражения от грани попадает в зрительную трубу, в которую смотрит наблюдатель. При любой другой скорости вращения пучок отклоняется в сторону и наблюдатель его не видит. Зная скорость вращения зеркала и расстояние до неподвижного

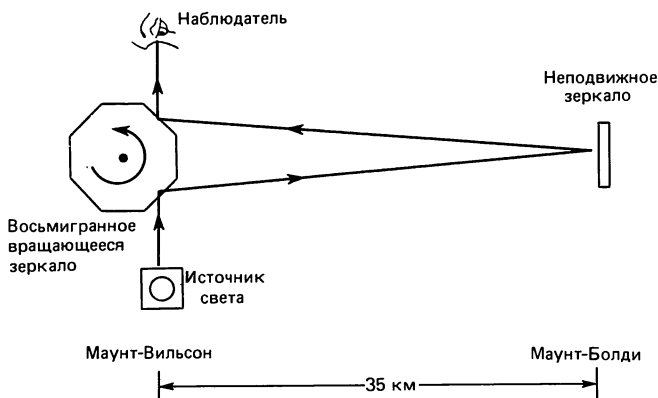


Рис. 34.2. Установка Майкельсона для измерения скорости света (масштаб не выдержан).

зеркала, можно вычислить скорость света. В 20-е годы нашего века Майкельсон установил вращающееся зеркало на вершине Маунт-Вильсон в Южной Калифорнии, а стационарное зеркало – на Маунт-Болди (Маунт-Сан-Антонио) на расстоянии 35 км. Позднее Майкельсон измерял скорость света в вакууме, используя длинные, хорошо откачанные трубки.

Принятое в настоящее время значение скорости света  $c$  в вакууме составляет

$$c = (2,99792458 \pm 0,00000001) \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Обычно мы округляем это значение до

$$3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с,}$$

если не требуется особая точность. В воздухе скорость света лишь немного меньше. В других прозрачных средах, таких как стекло и вода, скорость света всегда меньше, чем в вакууме. Например, в воде свет распространяется со скоростью около  $3/4c$ . Отношение скорости света в вакууме к скорости  $v$  в данной среде называется *показателем преломления  $n$*  этой среды:

$$n = \frac{c}{v}. \quad (34.1)$$

Показатели преломления для различных сред представлены в табл. 34.1<sup>1)</sup>.

Таблица 34.1. Показатели преломления

Среда	$n = c/v$
Воздух (при нормальных условиях)	1,0003
Вода	1,33
Этиловый спирт	1,36
Стекло	
Плавленый кварц	1,46
Крон	1,52
Легкий флинт	1,58
Люцит или плексиглас	1,51
Хлорид натрия	1,53
Алмаз	2,42

(Как мы увидим в дальнейшем, показатель преломления  $n$  несколько меняется в зависимости от длины волны света – постоянное значение он сохраняет только в вакууме. Поэтому приведенные в табл. 34.1 данные соответствуют желтому свету с длиной волны  $\lambda = 589$  нм.)

<sup>1)</sup> Из соотношения (33.18) видно, что  $n = \sqrt{K K_m}$ , где  $K$  – диэлектрическая проницаемость среды, а  $K_m$  – ее магнитная проницаемость.

Например, так как для алмаза  $n = 2,42$ , свет распространяется в алмазе со скоростью

$$v = c/n = (3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с})/2,42 = 1,24 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

### 34.3. Отражение света. Изображение в плоском зеркале

Падая на поверхность какого-нибудь предмета, свет частично отражается. Остальная часть либо поглощается предметом (и превращается в тепло), либо (если предмет прозрачен, как стекло или вода) проходит сквозь предмет. От блестящего предмета (например, от посеребренного зеркала) может отражаться более 95% падающего света.

Если узкий пучок света падает на плоскую поверхность, то *углом падения*  $\theta_i$  называется угол, который падающий луч образует с нормалью к поверхности, а *углом отражения*  $\theta_r$  — угол, который образует с этой нормалью отраженный луч. Для плоских поверхностей падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к поверхности, и

**угол падения равен углу отражения.**

Это **закон отражения** (рис. 34.3). Он был известен еще древним грекам, и вы можете проверить его сами, посветив в затемненной комнате лучом света от фонарика на зеркало.

Падая на шероховатую поверхность (даже если шероховатости микроскопически малы, как на поверхности этой страницы), свет отражается и в различных направлениях (рис. 34.4). Это — так называемое *диффузное отражение*. Закон отражения выполняется и в этом случае, но на каждом маленьком участке поверхности. Из-за диффузного отражения во всех направлениях обычный предмет можно наблюдать под разными углами. Стоит сдвинуть голову в сторону, как из каждой точки предмета в глаз будет попадать другой пучок отраженных лучей (рис. 34.5, а). Но если узкий пучок света падает на зеркало, то вы увидите его только в том случае, если глаз занимает положение, для которого выполняется закон отражения

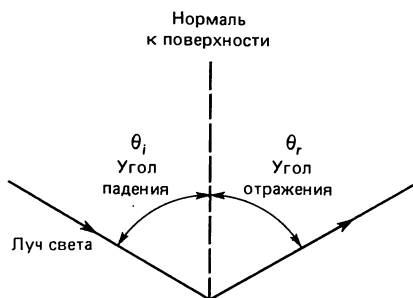
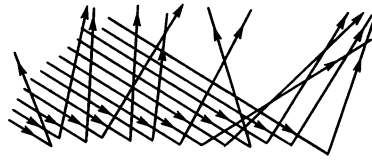


Рис. 34.3. Закон отражения.

Рис. 34.4. Диффузное отражение от шероховатой поверхности.

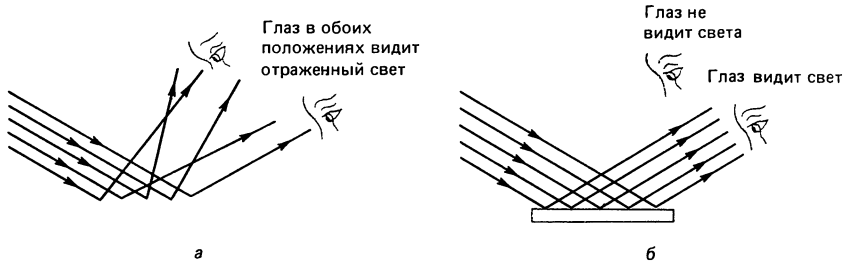


(рис. 34.5, б). Этим и объясняются необычные свойства зеркал. (Используя аналогичные аргументы, Галилей показал, что поверхность Луны должна быть шероховатой, а не зеркально гладкой, как полагали некоторые<sup>1)</sup>.)

Глядя в зеркало прямо перед собой, вы видите как бы своего двойника и различные предметы, которые находятся вокруг и позади вас. При этом вам кажется, что и ваш двойник, и эти предметы находятся перед вами, за зеркалом, хотя их там, разумеется, нет. То, что вы видите в зеркале, — это **изображения** предметов.

Из рис. 34.6 видно, как формируется изображение плоским зеркалом. Показаны лучи, исходящие из двух различных точек объекта. Из каждой точки объекта лучи расходятся по многим направлениям, но на рис. 34.6 изображены только узкие пучки лучей, попадающих в глаз из двух различных точек объекта. Кажется, что попадающие в глаз расходящиеся лучи исходят из точек, расположенных за зеркалом<sup>2)</sup>. Точка, из которой, как нам кажется, исходит каждый пучок, и есть точка изображения. Каждой точке объекта соответствует точка изображения. Сосредоточим наше внимание на двух лучах, выходящих из точки  $A$  объекта и попадающих в точки  $B$  и  $B'$  зеркала. Углы  $ADB$  и  $CDB$  прямые. Эти углы равны по закону отражения. Следовательно, треугольники  $ABD$  и  $CDB$  конгруэнтны, и  $AD = CD$ . Таким образом, *расстояние до изображения*  $d_i$  (расстояние от зеркала до изображения; рис. 46.6) равно *расстоянию до объекта*  $d_o$ . Из геометрии мы заключаем также, что высота изображения равна высоте объекта.

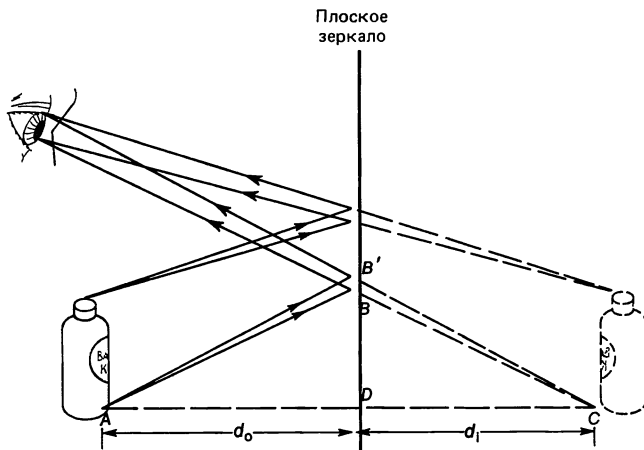
Рис. 34.5. Пучок света от электрического фонарика падает на белую бумагу (а) и на зеркальце (б). В первом случае белый отраженный свет вследствие диффузного отражения виден из различных точек. Во втором случае отраженный свет виден только при определенном положении глаза ( $\theta_r = \theta_i$ ).



<sup>1)</sup> Галилей Г. Диалог о двух главных системах мира — птолемеевой и коперниковой. День первый. — В кн.: Галилей Г. Избранные труды в двух томах. Т. 1. — М.: Наука, 1964.

<sup>2)</sup> Наш глаз и мозг воспринимают все лучи, попадающие в глаз, как прямолинейные.

Рис. 34.6. Образование мнимого изображения при отражении в плоском зеркале.



В действительности световые лучи не проходят сквозь зеркало. Нам только *кажется*, будто свет исходит от изображения, поскольку наш мозг воспринимает попадающий нам в глаза свет как свет от источника, находящегося перед нами. Так как лучи в действительности не сходятся в изображении, поместив лист белой бумаги или фотопленку в то место, где находится изображение, мы не получим никакого изображения. Поэтому такое изображение называется *мнимым*. Его следует отличать от *действительного изображения*, через которое свет проходит и которое можно получить, поместив там, где оно находится, лист бумаги или фотопленку. Как мы увидим в дальнейшем, действительные изображения можно формировать с помощью линз и кривых зеркал.

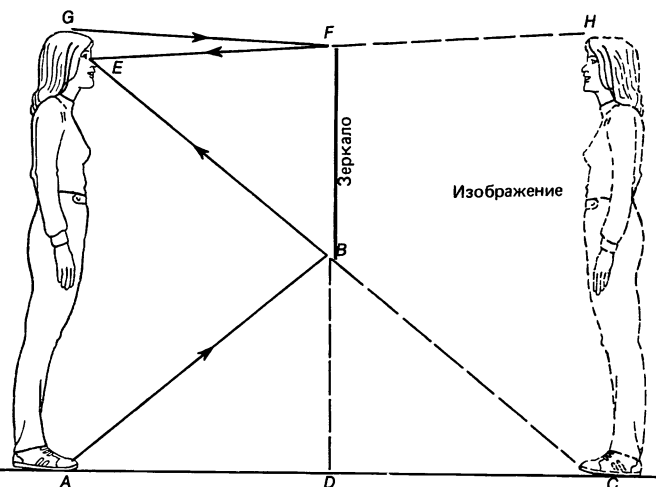


Рис. 34.7. Разглядывая себя в зеркало (пример 34.1).

**Пример 34.1.** Женщина ростом 1,60 м стоит перед плоским вертикальным зеркалом. Какой должна быть минимальная высота зеркала и на какой высоте над

полом должен находиться его нижний край для того, чтобы женщина могла видеть себя с головы до ног? (Условимся, что глаза женщины находятся на 10 см ниже ее макушки.)

**Решение.** Ситуация схематически изображена на рис. 34.7. Рассмотрим сначала луч, идущий из точки  $A$ . После участка  $AB$  он, отразившись от зеркала, переходит в луч  $BE$  и попадает в глаз  $E$ . Так как свет, идущий от пальцев ног (точка  $A$ ), попадает в глаз  $E$  после отражения в точке  $B$ , нет необходимости в зеркале ниже этой точки. Так как угол отражения равен углу падения, высота  $BD$  составляет полови-

ну высоты  $AE$ . Но  $AE = 1,60 \text{ м} - 0,10 \text{ м} = 1,50 \text{ м}$ , поэтому  $BD = 0,75 \text{ м}$ . Аналогично, если женщина должна видеть свою макушку, то верхний край зеркала должен доходить только до точки  $F$ , которая на 5 см ниже макушки (половина расстояния  $GE = 10 \text{ см}$ ). Следовательно,  $DF = 1,55 \text{ м}$ , и зеркало должно иметь высоту всего лишь  $1,55 \text{ м} - 0,75 \text{ м} = 80 \text{ см}$ . Нижний край зеркала должен находиться на  $0,75 \text{ м}$  над полом. В общем случае высота зеркала должна быть вдвое меньше роста человека, желающего разглядеть себя с головы до ног. Как этот результат зависит от расстояния до зеркала?

## 34.4. Изображения в сферических зеркалах

Отражающие поверхности необязательно должны быть плоскими. *Изогнутые* зеркала чаще всего бывают *сферическими*, т. е. имеют форму сферического сегмента. Сферическое зеркало называется *выпуклым*, если отражение происходит от внешней поверхности сферического сегмента, т. е. если центр зеркала находится к наблюдателю ближе, чем края зеркала. Сферическое зеркало называется *вогнутое*, если отражающей поверхностью служит внутренняя сторона сферического сегмента, т. е. если центр зеркала находится от наблюдателя дальше краев.

Чтобы понять, как в сферических зеркалах возникает изображение, рассмотрим сначала объект, расположенный на большом расстоянии от вогнутого зеркала. В этом случае лучи из каждой точки объекта падают на зеркало почти параллельно (рис. 34.8). В случае бесконечно удаленного объекта (хорошим приближением к которому могут служить Солнце и звезды) лучи были бы строго параллельны. Рассмотрим параллельные лучи, падающие на вогнутое зеркало (рис. 34.9). Для каждого из этих лучей в точке падения на зеркало выполняется закон отражения. Нетрудно видеть, что не все отраженные лучи сойдутся в одной точке. А для того, чтобы изображение было четким, лучи должны сходиться в одной точке. Следовательно, сферическое зеркало не создает такого четкого изображения, как плоское зеркало. Но если размеры

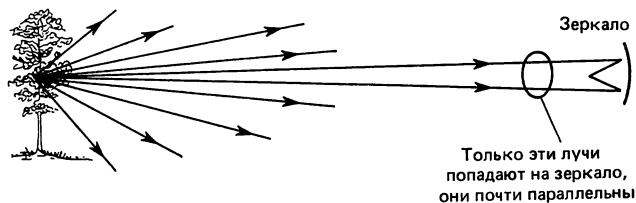
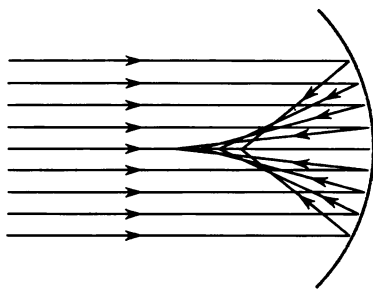


Рис. 34.8. Если расстояние до объекта велико по сравнению с размерами зеркала, то лучи почти параллельны.

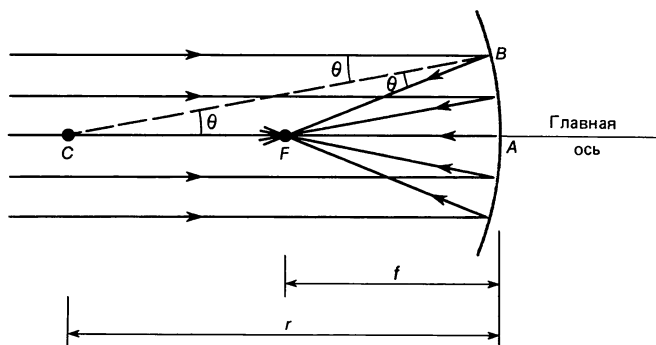


**Рис. 34.9.** Параллельные лучи, падающие на вогнутое сферическое зеркало, не собираются в одной точке.



сферического зеркала малы по сравнению с его радиусом кривизны, так что лучи отражаются от него под малым углом, то они пересекутся почти в одной точке, или *фокусе* (рис. 34.10). В случае, изображенном на этом рисунке, лучи параллельны *главной оси*, которая определяется как прямая, перпендикулярная центру сферического зеркала ( $CA$  на рис. 34.10). Точка  $F$ , в которой сходятся лучи, параллельные главной оси, называется **фокальной точкой**, или фокусом зеркала. Расстояние между точкой  $F$  и центром зеркала  $A$  (длина отрезка  $FA$ ) называется **фокусным расстоянием**  $f$  зеркала. Фокальную точку можно определить и как *точечное изображение объекта, расположенного бесконечно далеко на главной оси*. Например, изображение Солнца будет находиться в точке  $F$ .

Покажем теперь, что если размеры отражающей поверхности зеркала малы по сравнению с его радиусом кривизны, то лучи действительно будут сходиться в общей точке  $F$ , и вычислим фокусное расстояние  $f$ . Рассмотрим луч, падающий на зеркало в точке  $B$  (рис. 34.10). Точка  $C$  — центр кривизны зеркала (центр сферы, сегментом которой является зеркало). Длина отрезка  $CB$  (показанного штриховой линией) равна радиусу кривизны  $r$ , и  $CB$  — нормаль к поверхности зеркала в точке  $B$ . По законам отражения и геометрии три угла, обозначенные  $\theta$ , равны. Треугольник  $CBF$  равнобедренный, так как два его внутренних угла равны. Следовательно,  $CF = BF$ . По предположению размеры зеркала малы по сравнению с его радиусом кривизны, поэтому углы малы и длина



**Рис. 34.10.** Лучи, параллельные главной оси сферического зеркала, собираются в точке  $F$ , называемой фокусом, или фокальной точкой, если размеры зеркала малы по сравнению с его радиусом кривизны  $r$ .

отрезка  $FB$  мало отличается от длины отрезка  $FA$ . В этом приближении  $FA = FC$ . Но  $FA = f$ , где  $f$  – фокусное расстояние, и  $CA = 2FA = r$ . Следовательно, фокусное расстояние равно половине радиуса кривизны:

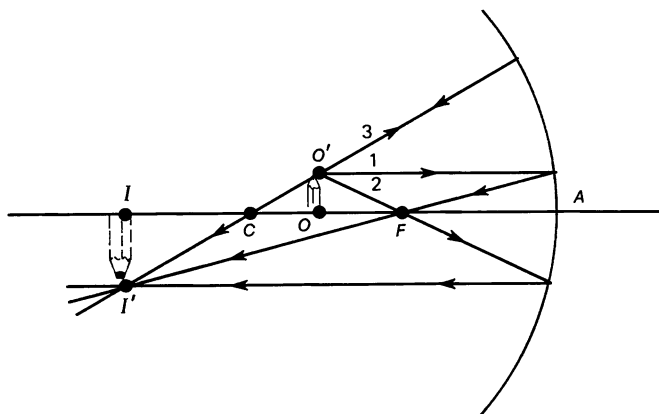
$$f = \frac{r}{2}. \quad (34.2)$$

Наше рассуждение основано только на предположении о малой величине угла  $\theta$  и поэтому применимо к остальным лучам. Следовательно, в приближении, когда размеры зеркала малы по сравнению с его радиусом кривизны, все отраженные лучи проходят через одну и ту же точку  $F$ .

Поскольку утверждение о том, что все лучи проходят через точку  $F$ , выполняется лишь приближенно, то чем больше размеры зеркала, тем хуже приближение (рис. 34.9) и тем более расплывчатым оказывается изображение. Этот «дефект» сферических зеркал называется *сферической абберацией*. Подробнее мы остановимся на нем в гл. 35 применительно к линзам. С другой стороны, *параболическое* зеркало собирает отраженные лучи строго в фокусе. Однако параболические зеркала сложны в изготовлении, а потому стоят дороже, и для большинства целей обычно используются сферические зеркала. Мы будем рассматривать только сферические зеркала и предполагать, что их размеры малы по сравнению с радиусом кривизны, так что изображение оказывается четким и выполняется соотношение (34.2).

Как мы видели, изображение бесконечно удаленного объекта находится в фокальной точке вогнутого сферического зеркала, для которого  $f = r/2$ . А где будет изображение объекта, находящегося не на бесконечно большом расстоянии от зеркала? Рассмотрим сначала случай, когда объект расположен в точке  $O$  между точками  $F$  и  $C$  (рис. 34.11). Определим, где находится изображение заданной точки  $O'$  объекта. Для этого проведем несколько лучей так, чтобы угол падения на зеркало был равен углу отражения. Такое построение довольно трудоемко, но задача упрощается, если мы рассмотрим три очень простых луча. На рис. 34.11 они обозначены цифрами 1, 2, и 3. Луч 1 проведен параллельно оси. Следовательно, после отражения он должен проходить через точку  $F$  (как на рис. 34.10). Луч 2 проведен через точку  $F$ . Следовательно, после отражения он должен идти параллельно оси. Луч 3 проведен через центр кривизны  $C$ , т.е. вдоль радиуса сферической поверхности. Поэтому луч 3 перпендикулярен зеркалу и после отражения возвращается к первоначальному направлению. Точка, в которой эти три луча пересекаются, есть точка  $I'$  изображения. Все остальные лучи из той же точки объекта также пройдут через ту же точку изображения. В этом мы можем убедиться с помощью рис. 34.12 и одновременно получить формулу, позволяющую определить положение изображения задан-

Рис. 34.11. Лучи от объекта, находящегося в точке  $Q$ , образуют изображение в точке  $I$ .



ного объекта. На рис. 34.12 произвольный луч  $OP$  выходит из точки  $O$  объекта (мы выбрали эту точку на главной оси только из соображений удобства) и проходит через точку  $I$  — изображение точки  $O$ . Так как  $\gamma + \phi = 180^\circ$  и сумма внутренних углов треугольника также равна  $180^\circ$ , справедливо соотношение

$$\gamma = \alpha + 2\theta.$$

Соотношение

$$\beta = \alpha + \theta$$

выводится аналогично. Исключая из этих соотношений угол  $\theta$ , получаем

$$\alpha + \gamma = 2\beta.$$

Пусть  $s$  — длина дуги  $PA$ . Тогда если углы  $\alpha$ ,  $\gamma$  и  $\beta$  малы, то последнее соотношение (в радианной мере) с хорошей точностью можно аппроксимировать соотношением

$$\frac{s}{d_0} + \frac{s}{d_i} = \frac{2s}{r},$$

где  $d_0$  — расстояние до объекта (расстояние от объекта до зеркала),  $d_i$  — расстояние до изображения,  $r$  — радиус кри-

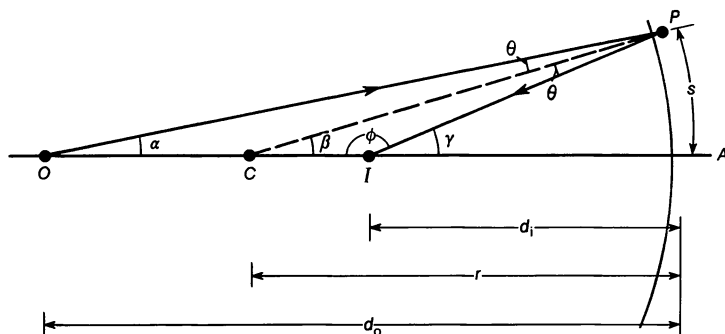


Рис. 34.12. Построение точки изображения  $I$ . К выводу уравнения зеркала.

визны зеркала. Разделив обе части равенства на  $s$  и воспользовавшись соотношением (34.2) для фокусного расстояния, получим

$$\frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}. \quad (34.3)$$

Это так называемое *уравнение зеркала*. Из формулы (34.3) следует, что  $d_i$  зависит только от  $d_0$  и  $f$ , а не от угла  $\alpha$ , образуемого данным лучом  $OP$  с осью. Это означает, что все лучи, выходящие из точки  $O$ , собираются в одной и той же точке  $I$ , так как размеры зеркала малы по сравнению с его радиусом кривизны, в силу чего все углы, образуемые лучами с осью, малы. Для зеркал больших размеров приближение малых углов утрачивает силу и изображение размывается, как показано на рис. 34.9. Мы вывели уравнение (34.3) для точки  $O$  на главной оси, но оно выполняется и для точек, расположенных на достаточно малом расстоянии выше или ниже оси, в силу симметрии сферического зеркала. Следовательно, изображения всех точек также расположатся поблизости и образуют полное изображение объекта (на рис. 34.11 оно показано штриховыми линиями). Поскольку свет проходит через это изображение, оно является *действительным*. Сравните его с мнимым изображением в плоском зеркале.

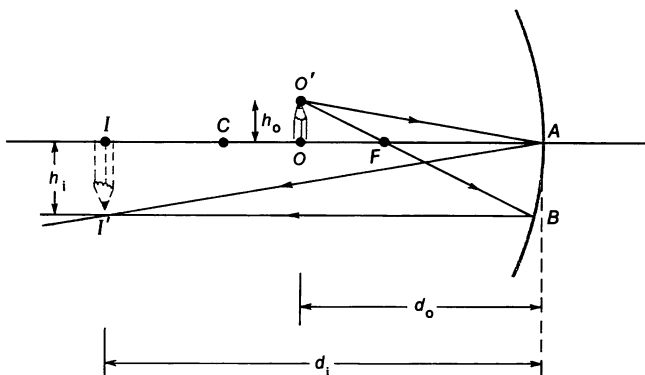
Из уравнения (34.3) видно, что расстояние до изображения  $d_i$  одинаково у всех лучей, исходящих из одной точки объекта. Это уравнение важно еще и потому, что позволяет определить положение изображения, если известны положение объекта и фокусное расстояние (или радиус кривизны). Таким образом, положение изображения мы можем определить двумя способами: провести лучи 1, 2, 3 (в действительности требуется провести только два луча, а третий служит для проверки), как на рис. 34.11, или воспользоваться уравнением (34.3). Разумеется, второй, аналитический способ избавляет нас от необходимости строить точный чертеж, но почти всегда бывает полезно набросать хотя бы грубый эскиз, чтобы убедиться в правильности ответа, полученного аналитическим путем.

*Увеличением* зеркала  $m$  называется отношение высоты изображения  $h_i$  к высоте объекта  $h_o$ . На рис. 34.13 луч  $O'A'I'$  отражается по закону «угол падения равен углу отражения», поэтому из подобных треугольников мы находим, что увеличение равно

$$m = \frac{h_i'}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o}. \quad (34.4)$$

Знак минус введен в соответствии с принятыми соглашениями [чтобы не войти в противоречие, необходимо тщательно следить за знаками всех величин в уравнении (34.4)]. Эти соглашения сводятся к следующему: если

Рис. 34.13. Схема, поясняющая вывод поперечного увеличения сферического зеркала.



высоту объекта  $h_o$  считать положительной, то высота изображения  $h_i$  положительна в том случае, когда изображение прямое, и отрицательна, когда оно перевернутое;  $d_i$  и  $d_o$  положительны, если изображение и объект находятся по одну сторону от зеркала (как на рис. 34.13); когда либо изображение, либо объект находится за зеркалом, то соответствующее расстояние отрицательно (как на рис. 34.14, пример 34.3). Таким образом, увеличение (34.4) положительно для прямого изображения и отрицательно для перевернутого.

**Пример 34.2.** Объект высотой 1,50 см помещен на расстоянии 20,0 см от вогнутого зеркала с радиусом кривизны 30,0 см. Определите: а) где находится изображение и б) его величину.

**Решение.** а) Фокусное расстояние зеркала равно  $f = r/2 = 15,0$  см. Так как  $d_o = 20,0$  см, из уравнения (34.3) получаем

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{15,0 \text{ см}} - \frac{1}{20,0 \text{ см}} = 0,0167 \text{ см}^{-1}.$$

Таким образом,  $d_i = 1/0,0167 \text{ см}^{-1} = 60,0$  см, т.е. изображение находится на расстоянии 60,0 см от зеркала по ту же сторону от него, что и объект. б) Из

уравнения (34.4) находим увеличение:  $m = -60,0 \text{ см}/20,0 \text{ см} = -3,00$ . Следовательно, изображение имеет высоту  $(-3,00)(1,5 \text{ см}) = -4,5 \text{ см}$  и является перевернутым.

**Пример 34.3.** Объект высотой 1,00 см помещен на расстоянии 10,0 см перед вогнутым зеркалом с радиусом кривизны 30,0 см. а) Начертив ход лучей, определите, где находится изображение. б) Определите положение изображения и увеличение зеркала (аналитически).

**Решение.** а) Так как  $f = 15,0$  см, объект находится между зеркалом и фокальной точкой. Проведем три луча, о которых говорилось выше (рис. 34.11). Наше по-

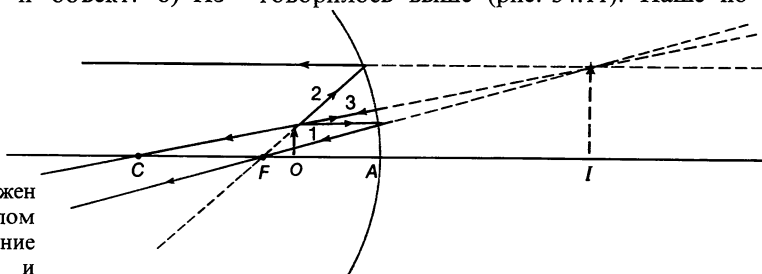


Рис. 34.14. Объект расположен между фокусом  $F$  и зеркалом (пример 34.3). Изображение находится за зеркалом и является *мнимым*.

строение показано на рис. 34.14. Отражаясь от зеркала, лучи расходятся и поэтому нигде не пересекаются. Наблюдателю кажется, что они исходят из точки позади зеркала. Таким образом, изображение находится позади зеркала и оказывается *мнимым* (почему?). б) Величину  $d_i$  найдем из уравнения (34.3), подставив в него  $d_o = 10,0$  см:

$$\frac{1}{d_i} \sim \frac{1}{15,0 \text{ см}} - \frac{1}{10,0 \text{ см}} = \frac{2 - 3}{30,0 \text{ см}} = -\frac{1}{30,0 \text{ см}}$$

Следовательно,  $d_i = -30,0$  см. Знак минус означает, что изображение находится за зеркалом. Увеличение равно  $m = -(-30,0 \text{ см})/(10,0 \text{ см}) = +3,00$ . Таким образом, изображение в три раза больше объекта, а знак плюс означает, что изображение прямое.

Приведенные примеры показывают, что сферическое зеркало может увеличивать изображение, т.е. создавать изображение, превосходящее по размерам объект. (Существует древняя легенда о том, будто Юлий Цезарь следил за британским войском, установив на побережье близ Гуля кривое зеркало. Есть ли основания верить такой легенде?)

Полезно сравнить рис. 34.11 и 34.14. Нетрудно видеть, что если объект расположен к зеркалу ближе фокальной точки, как на рис. 34.14, то изображение будет мнимым, прямым и увеличенным. Именно так мы и пользуемся зеркалом для бритья или косметики: приближаем лицо к зеркалу до тех пор, пока оно не окажется ближе фокальной точки, и видим свое прямое изображение. Если же объект оказывается за фокальной точкой, как на рис. 34.11, то изображение будет действительным и перевернутым. Будет ли увеличение больше или меньше единицы, в данном случае зависит от положения объекта относительно точки  $S$  — центра кривизны зеркала.

Анализ, проведенный нами для случая *вогнутых* зеркал, применим и к *выпуклым* зеркалам. Даже уравнение зеркала (34.3) остается в силе для выпуклых зеркал, хотя входящие в него величины необходимо тщательно определить. На рис. 34.15, а, изображены параллельные лучи, падающие на выпуклое зеркало. Сферическая абберация возникает и в этом случае, но мы предполагаем, что размеры зеркала малы по сравнению с его радиусом кривизны. Отраженные лучи расходятся, но наблюдателю кажется, что они исходят из точки  $F$  позади зеркала. Это — *фокальная точка*, или *фокус*, выпуклого сферического зеркала, и расстояние от этой точки до центра зеркала называется *фокусным расстоянием*  $f$  зеркала. Нетрудно показать, что и для выпуклого сферического зеркала  $f = r/2$ . Мы видим, что в выпуклом зеркале возникает мнимое изображение бесконечно удаленного объекта. Независимо от того, где находится объект с отражающей

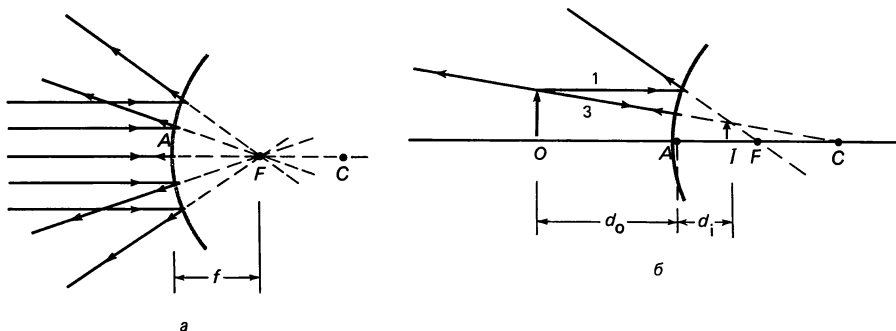


Рис. 34.15. Выпуклое зеркало: *а* – фокус находится в точке *F* за зеркалом; *б* – изображение *I* объекта, находящегося в точке *O*, мнимое, прямое и уменьшенное.

стороны зеркала, его изображение будет мнимым и прямым, как показано на рис. 34.15, *б*. Чтобы построить изображение, проведем лучи *1* и *3* по тем же правилам, что и в случае вогнутого зеркала.

Уравнение зеркала (34.3) справедливо и для выпуклых зеркал, но фокусное расстояние *f*, как и радиус кривизны, следует считать отрицательным. Доказательство этого утверждения мы предоставляем читателю (см. задачу 19), равно как и доказательство справедливости формулы (34.4) для выпуклых зеркал (задача 17).

**Пример 34.4.** Выпуклое зеркало заднего обзора в автомашине имеет радиус кривизны 40,0 см. Определите положение изображения и увеличение, если объект расположен на расстоянии 10,0 м от зеркала.

**Решение.** При  $r = -40,0$  см и  $f = -20,0$  см из уравнения зеркала по-

лучаем

$$\begin{aligned} \frac{1}{d_i} &= \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = -\frac{1}{0,200 \text{ м}} - \frac{1}{10,0 \text{ м}} = \\ &= -\frac{51,0}{10,0 \text{ м}}. \end{aligned}$$

Таким образом,  $d_i = -0,196$  м, или  $d_i = 19,6$  см (за зеркалом). Увеличение равно  $m = -d_i/d_o = -(-0,196 \text{ м})/(10,0 \text{ м}) = 0,0196 = 1/51$ . Таким образом, изображение прямое и уменьшенное в 51 раз.

Правила (соглашения о знаках) применения уравнения (34.3) и формулы (34.4) в случае вогнутых и выпуклых зеркал сводятся к следующему. Если объект, изображение или фокальная точка находятся с отражающей стороны зеркала (на всех наших рисунках слева), то расстояние до объекта, расстояние до изображения и фокусное расстояние следует считать положительными. Если же объект, изображение или фокальная точка окажутся за зеркалом (справа на наших рисунках), то соответствующие рас-

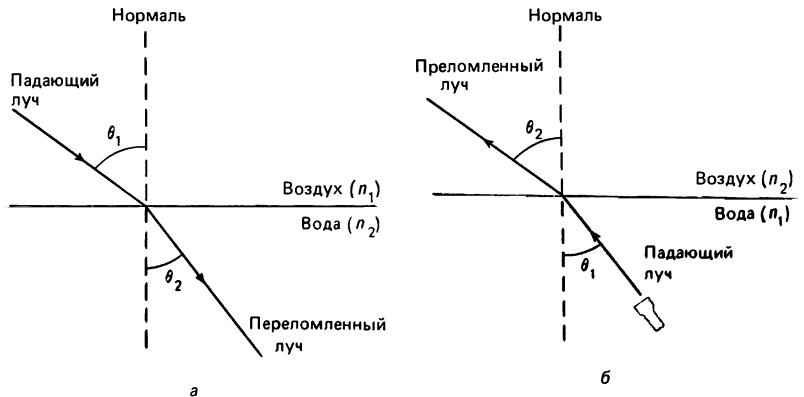
стояния следует считать отрицательными<sup>1)</sup>. Высота объекта  $h_o$  и изображения  $h_i$  считаются положительными или отрицательными в зависимости от того, находятся объект и изображение соответственно выше или ниже главной оси. Производя вычисления, необходимо следить за соблюдением этих соглашений о знаках.

## 34.5. Преломление. Закон Снелля

Когда свет переходит из одной среды в другую, на границе раздела происходит отражение части падающего на нее света. Остальная часть света проникает в новую среду. Если свет падает под углом к поверхности раздела, отличным от прямого, то на границе световой луч изменяет свое направление. Это называется **преломлением** света. На рис. 34.16, а показан луч, переходящий из воздуха в воду. Угол  $\theta_1$  называется *углом падения*, а  $\theta_2$  — *углом преломления*. Обратите внимание на то, что в воде луч приближается к нормали. Так происходит всякий раз, когда луч попадает в среду, где скорость света меньше. Если же свет распространяется из одной среды в другую, где скорость света больше, то он отклоняется от нормали. На рис. 34.16, б это показано на примере луча, переходящего из воды в воздух.

Преломлением обусловлен целый ряд широко известных оптических иллюзий. Например, наблюдателю на

Рис. 34.16. Преломление света.



<sup>1)</sup> В приведенных выше примерах мы рассмотрели случаи, когда  $d_i$  и  $f$  отрицательны. Расстояние  $d_o$  до любого материального объекта, разумеется, всегда положительно. Но если зеркало используется в сочетании с линзой или другим зеркалом, то изображение, формируемое первым зеркалом или линзой, становится объектом для второго зеркала. Такой «объект» может оказаться позади второго зеркала, и в этом случае величина  $d_o$  отрицательна. Эти правила соответствуют тому, что фокусное расстояние вогнутого зеркала следует считать положительным, а фокусное расстояние выпуклого зеркала — отрицательным.

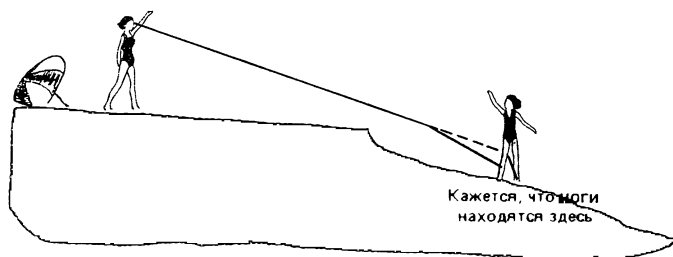




a

Рис. 34.17. Из-за преломления света ноги человека, стоящего в воде, кажутся короче.

**Пример 34.5.** Свет падает на плоскую стеклянную пластинку под углом  $60^\circ$  (рис. 34.18). Показатель преломления стекла 1,50. а) Чему равен угол преломления



б

берегу, кажется, что у человека, зашедшего в воду по пояс, ноги стали короче (рис. 34.17, а). Как показано на рис. 34.17, б, лучи от ног стоящего в воде преломляются на поверхности. Глаз же (и мозг) наблюдателя воспринимают лучи как прямолинейные, и поэтому ступни ног кажутся расположенными выше, чем в действительности. По той же причине на частично погруженной в воду палке появляется кажущийся излом в том месте, где она входит в воду.

Угол преломления зависит от скорости света в обеих средах и от угла падения света. Аналитическое соотношение между углами  $\theta_1$  и  $\theta_2$  было установлено экспериментально около 1621 г. Виллебрордом Снеллем (1580–1626). Ныне это соотношение известно как **закон Снелля** и записывается в виде

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (34.5)$$

где  $\theta_1$  – угол падения,  $\theta_2$  – угол преломления,  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления сред (рис. 34.16). Закон Снелля<sup>1)</sup> является основным **законом преломления**.

Из закона Снелля ясно, что если  $n_2 > n_1$ , то  $\theta_2 < \theta_1$ . Иначе говоря, если свет попадает в среду с большим показателем преломления  $n$  (где скорость света меньше), то луч приближается к нормали. Если же  $n_2 < n_1$ , то  $\theta_2 > \theta_1$  и луч отклоняется от нормали на больший угол. Оба этих случая изображены на рис. 34.16.

$\theta_a$  для стекла? б) Под каким углом  $\theta_b$  луч выходит из пластинки?

**Решение.** а) Предположим, что свет

<sup>1)</sup> Снелль в действительности не знал, что показатель преломления зависит от скорости света в среде. Только позднее было обнаружено, что показатель преломления можно записать в виде отношения скорости света в вакууме к скорости света в данной среде [формула (34.1)]. Закон Снелля можно получить на основании волновой теории света (гл. 35). Фактически именно так он и был получен в разд. 15.7: соотношение (15.17) представляет собой не что иное, как комбинацию соотношений (34.5) и (34.1).

падает на стеклянную пластинку из воздуха; тогда  $n_1 = 1,00$  и  $n_2 = 1,50$ . Из закона

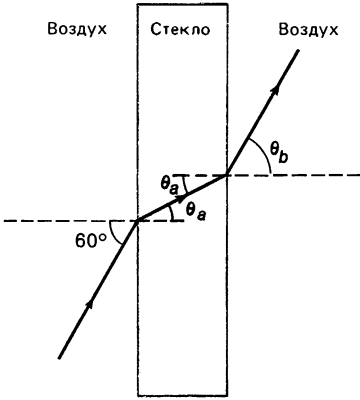


Рис. 34.18. Прохождение света через стеклянную пластинку (пример 34.5).

Снелля (34.5) находим

$$\sin \theta_a = \frac{1,00}{1,50} \sin 60^\circ = 0,577,$$

откуда  $\theta_a = 35,2^\circ$ . б) Так как поверхности пластинки параллельны, а угол падения в данном случае совпадает с  $\theta_a$ , то  $\sin \theta_a = 0,577$ . На этот раз  $n_1 = 1,50$  и  $n_2 = 1,00$ . Следовательно, угол  $\theta_b (= \theta_2)$  может быть найден из закона Снелля:

$$\sin \theta_b = \frac{1,50}{1,00} \sin \theta_a = 0,866,$$

откуда  $\theta_b = 60,0^\circ$ . Таким образом, при прохождении через плоскопараллельную стеклянную пластинку направление луча не меняется. Это справедливо для любого угла падения. Луч лишь смещается в сторону. В этом можно убедиться, посмотрев на предмет сквозь кусок стекла (вблизи его края), а затем, чуть сдвинув голову, посмотреть на тот же предмет прямо.

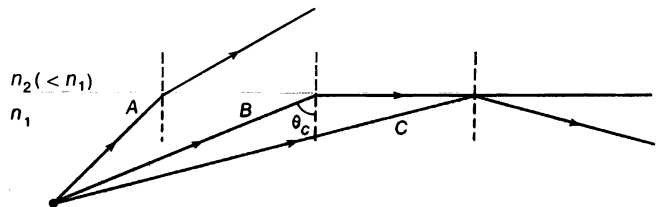
## 34.6. Полное внутреннее отражение. Волоконная оптика

Когда свет переходит из одной среды в другую, с меньшим показателем преломления (например, из воды в воздух), он отклоняется от нормали, подобно лучу *A* на рис. 34.19. При определенном угле падения угол преломления достигает  $90^\circ$ , и преломленный луч скользит по поверхности, как луч *B* на рис. 34.19. Угол падения, при котором это происходит, называется *критическим углом*  $\theta_c$ . Из закона Снелля критический угол определяется по формуле

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \sin 90^\circ = \frac{n_2}{n_1}. \quad (34.6)$$

При угле падения меньше  $\theta_c$  преломленный луч существу-

Рис. 34.19. Так как  $n_2 < n_1$ , световые лучи претерпевают полное внутреннее отражение при  $\theta > \theta_c$  (луч *C*). При  $\theta < \theta_c$  (луч *A*) отражается только часть световых лучей (не показанная на рисунке), а остальная часть преломляется.



ет, хотя, как уже упоминалось, часть света отражается на границе. Если же угол падения превышает критический угол  $\theta_c$ , то, согласно закону Снелля,  $\sin \theta_2$  должен превышать единицу. Но синус любого угла не может быть больше единицы; поэтому если угол падения оказывается больше критического, то преломленный луч отсутствует и *весь свет отражается* (луч  $C$  на рис. 34.19). Это явление получило название **полного внутреннего отражения**. Обратите внимание на то, что полное внутреннее отражение происходит только в случае, когда свет падает на границу между оптически более плотной средой и оптически менее плотной средой, т.е. при переходе в среду с меньшим показателем преломления.

**Пример 34.6.** Опишите, что видит ныряльщик из-под воды сквозь идеально гладкую поверхность озера или плавательного бассейна.

**Решение.** Для границы воздух – вода критический угол составляет

$$\sin \theta_c = \frac{1,00}{1,33} = 0,750,$$

т.е.  $\theta_c = 49^\circ$ . Следовательно, ныряльщик увидит внешний мир в пределах круга, граница которого образует с вертикалью угол  $49^\circ$ . При бóльших углах (т.е. за пределами этого круга) ныряльщик увидит отражение берега, стен и дна бассейна или озера.

Во многих оптических приборах, например в биноклях, полное внутреннее отражение используется при отражении света в призмах. Преимущество состоит в том, что при этом отражается почти 100% света, тогда как даже лучшие зеркала отражают менее 100%, т.е. изображение получается более ярким. Для стекла с  $n = 1,50$  критический угол равен  $\theta_c = 41,8^\circ$ . Следовательно, в 45-градусных призмах свет будет испытывать полное внутреннее отражение, как это происходит в призматическом бинокле на рис. 34.20.

На полном внутреннем отражении основана вся *волоконная оптика*. Диаметр тонких стеклянных или пластиковых волокон может быть доведен до нескольких микрометров. Пучок таких тонких волокон называется *световодом*, так как свет может передаваться по нему почти без

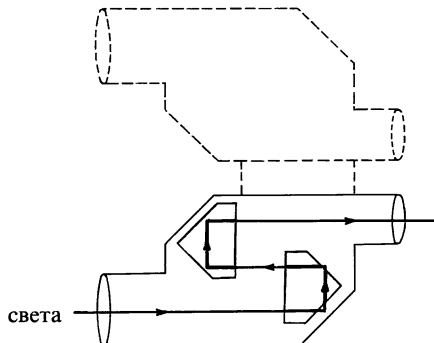


Рис. 34.20. Отражение света призмами в бинокле.

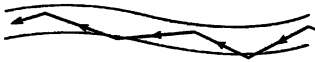


Рис. 34.21. Полное отражение света от внутренней поверхности стеклянного или прозрачного пластикового волокна.

потерь. Рис. 34.21 демонстрирует, как распространяется свет по тонкому волокну, испытывая только скользкие отражения от стенок, т. е. претерпевая полное внутреннее отражение. Даже если световоду придать сложную форму, критический угол обычно не превышает, и свет будет передан от одного торца световода до другого практически без ослабления. Этот эффект используется в декоративных светильниках и при подсветке струй в фонтанах. Световоды можно использовать для освещения труднодоступных мест, например внутренних органов человека. Они находят применение для передачи сигналов в телефонной и других видах связи. Сигнал представляет собой модулированный световой пучок (т. е. пучок переменной интенсивности) и передается с меньшими потерями, чем при передаче электрического сигнала по медным проводам. Одно из остроумных применений волоконной оптики, в частности в медицине, — это передача четких изображений (рис. 34.22). Вводя через пищевод больного световод, врач получает возможность визуально обследовать стенки желудка. По одним волокнам посылается свет для освещения желудка, по другим идет отраженный свет. На противоположном торце световода наблюдатель видит серию светлых и темных пятен (как на телевизионном экране), т. е. картину у противоположного торца световода<sup>1)</sup>. Волокна должны быть оптически изолированы друг от друга. Обычно на них наносится вещество с меньшим показателем преломления. Волокна должны быть строго параллельны, иначе изображение не получится четким. Чем больше волокон в световоде и чем они тоньше, тем лучше разрешаются детали изображения. Такой «эндоскоп» полезен при обследовании желудка или других труднодоступных мест при подготовке больного к операции или поиске травм и повреждений без хирургического вмешательства.

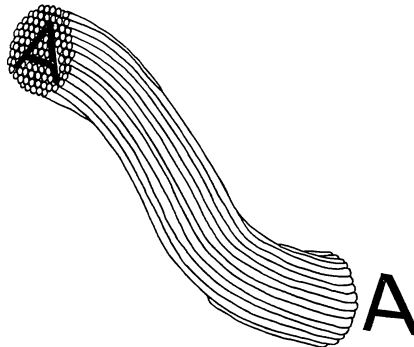


Рис. 34.22. Оптоволоконное изображение.

<sup>1)</sup> На каждом из торцов световода имеются линзы. На торце, обращенном к объекту, линза превращает исходящие из него лучи в параллельный пучок. На торце, обращенном к наблюдателю, имеется зрительная труба, позволяющая рассмотреть изображение.

## Заключение

Свет распространяется по прямолинейным траекториям, называемым *лучами*, со скоростью  $v$ , которая зависит от показателя преломления  $n$  среды:  $v = c/n$ , где  $c$  – скорость света в вакууме.

При отражении света от плоской поверхности угол отражения равен углу падения. Этот закон *отражения* объясняет, почему в зеркалах возникают *изображения*. При отражении в плоском зеркале возникает мнимое прямое изображение, которое имеет такие же размеры, как и объект, и расположено позади зеркала на расстоянии, совпадающем с расстоянием объекта от зеркала.

Сферические зеркала, как вогнутые, так и выпуклые, могут создавать и действительные, и мнимые изображения. *Фокальная точка*, или фокус, сферического зеркала представляет собой точечное изображение бесконечно удаленного объекта (падающие лучи параллельны) на главной оси. Расстояние от фокальной точки до центра зеркала называется *фокусным расстоянием*  $f$  и равно половине радиуса кривизны  $r$  зеркала ( $f = r/2$ ). Расстояние до объекта  $d_o$  связано с расстоянием до изображения  $d_i$  и фокусным расстоянием  $f$  *уравнением зеркала*:  $1/d_o + 1/d_i = 1/f$ . Отношение высоты изображения к высоте объекта называется *линейным (поперечным) увеличением* и равно  $m = h_i/h_o = -d_i/d_o$ .

При переходе света из одной прозрачной среды в другую происходит преломление световых лучей. *Закон преломления (закон Снелля)* утверждает, что  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ , где  $n_1$  и  $\theta_1$  – соответственно показатель преломления и угол, образуемый с нормалью к поверхности падающим лучом,  $n_2$  и  $\theta_2$  – аналогичные величины для преломленного луча.

При падении на границу со средой с большим показателем преломления луч претерпевает *полное внутреннее отражение*, если угол падения  $\theta_1$  таков, что, согласно закону Снелля,  $\sin \theta_2 > 1$  ( $\theta_2$  – угол преломления). Это происходит, если  $\theta_1$  превышает критический угол  $\theta_c$ , задаваемый соотношением  $\sin \theta_c = n_2/n_1$ .

## Вопросы

1. Поясните, почему Луна должна иметь шероховатую, а не зеркально гладкую поверхность.
2. Глядя на себя в высокое плоское зеркало, вы видите одну и ту же часть своей фигуры независимо от того, как близко вы стоите от зеркала (попробуйте убедиться в этом). Начертив ход лучей, объясните, почему так происходит.
3. Объясните, почему отражение Луны на поверхности моря, покрытого рябью, кажется удлиненным.
4. Если бы идеально плоское зеркало отражало 100% падающего на него света, можно ли было

бы увидеть поверхность такого зеркала?

5. Объясните, почему плоское зеркало меняет местами правое и левое, но не переставляет верх и низ.
6. По преданию Архимед сжег весь римский флот в гавани Сиракуз, сфокусировав солнечные лучи огромным сферическим зеркалом. Насколько обоснованна такая легенда?
7. Построив чертеж, докажите, что увеличение вогнутого зеркала меньше единицы, если объект расположен от зеркала дальше центра кривизны  $C$ , и больше единицы, если объект находится ближе  $C$ .
8. Обязательно ли действительное изображение в вогнутом зеркале будет перевернутым?

9. Глядя в вогнутое зеркало, вы не сможете увидеть свое перевернутое изображение до тех пор, пока не окажетесь за центром кривизны  $C$  зеркала. Однако перевернутое изображение других объектов, расположенных между точками  $C$  и  $F$ , можно видеть (рис. 34.11). Объясните. (Подсказка: действительное изображение можно наблюдать только в том случае, когда глаз находится за изображением, с тем чтобы оно могло образоваться.)
10. Используя те же правила, по которым на рис. 34.11 были проведены три луча, проведите луч 2 на рис. 34.15, б.
11. Чему равно фокусное расстояние плоского зеркала?
12. Выполняется ли для плоского зеркала уравнение зеркала (34.3)? Объясните.
13. Чему равно увеличение плоского зеркала?
14. Как можно было бы определить скорость света в твердом прямоугольном прозрачном объекте?
15. Широкий пучок параллельных лучей света, входя под углом в воду, расширяется. Объясните.
16. Объясните, почему в жаркую погоду на шоссе на некотором расстоянии иногда возникает мираж перевернутых машин. (Подсказка: рассмотрите, как изменяется с температурой показатель преломления воздуха.)
17. Чему равен угол преломления при нормальном падении луча на границу двух сред?
18. Какой кажется глубина с бортика плавательного бассейна или с берега озера – больше или меньше истинной? Объясните. Как кажущаяся глубина зависит от угла зрения? (Начертите ход лучей.)
19. Начертите ход лучей и объясните, почему палка, частично погруженная в воду, кажется изломанной в том месте, где она входит в воду.
20. Что позволяет «увидеть» круглую каплю воды на столе, если вода прозрачна и бесцветна?
21. Может ли луч света в воздухе испытать полное внутреннее отражение, падая на гладкую поверхность воды под прямым углом?
22. Если вы смотрите из-под воды в бассейне на предмет, находящийся в воздухе, то будут ли размеры предмета казаться такими же, как и в случае, когда вы смотрите не на него, находясь в воздухе? Объясните.

### Задачи

#### Раздел 34.2

1. (I) Чему равна скорость света: а) в этиловом спирте; б) в льдисте?
2. (I) Скорость света во льду равна  $2,29 \cdot 10^8$  м/с. Чему равен показатель преломления льда?
3. (I) Нить обычной электрической лампы на-

каливания испускает цуги световых волн продолжительностью около  $10^{-8}$  с. Чему равна протяженность такого цуга в пространстве?

4. (I) Сколько времени затрачивает испускаемый Солнцем свет на пути к Земле, если расстояние равно  $1,49 \cdot 10^8$  км?
5. (I) Ближайшая к нам звезда (отличная от Солнца) находится на расстоянии 4,2 светового года, т. е. свет от этой звезды доходит до нас через 4,2 года. Чему равно это расстояние в метрах?
6. (II) а) Если требуется измерить скорость света в вакууме с такой же точностью, как и лучшее из значений, приведенное в разд. 34.2, то такую погрешность может иметь показатель преломления, если измерение скорости света в действительности производится в воздухе? б) Если для воздуха  $n = 1,00030 \pm 0,00010$ , то к какой погрешности в величине  $c$  это приведет?
7. (II) С какой минимальной угловой скоростью должно вращаться восьмигранное зеркало в установке Майкельсона (см. рис. 34.2), с тем чтобы в глаз наблюдателя попадал свет от соседних граней зеркала?

#### Раздел 34.3

8. (I) Предположим, что вы хотите сфотографировать себя в зеркале с расстояния 2,2 м. Какое расстояние следует установить на объективе фотоаппарата?
9. (II) Пусть два плоских зеркала образуют прямой угол, как на рис. 34.23. Взглянув в это двойное зеркало, вы увидите себя таким, каким вас видят другие, вместо обращенного изображения в обычном зеркале. Начертите ход лучей и объясните принцип действия двойного зеркала.
10. (II) Человек, глаза которого находятся на

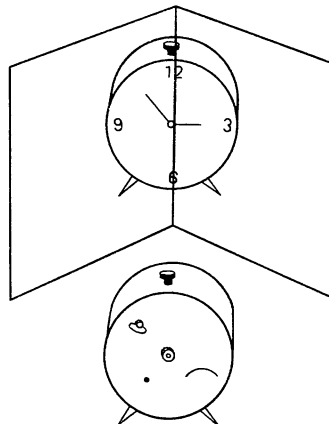


Рис. 34.23. К задаче 34.9.

высоте 1,48 м над полом, стоит на расстоянии 2,40 м перед плоским вертикальным зеркалом, нижний край которого проходит на высоте 40 см над полом. На каком расстоянии от основания стены, на которой висит зеркало, находится ближайшая точка, которую видно в зеркало?

11. (II) Предположим, что вы находитесь на расстоянии 60 см от плоского зеркала. Какова площадь участка зеркала, в котором отражаются лучи, идущие от кончика вашего носа и попадающие в глаз, если диаметр зрачка равен 5,5 мм?

12. (II) Докажите, что если два плоских зеркала составляют угол  $\phi$ , то в результате последовательного отражения от этих зеркал луч отклонится на угол  $2\phi$  независимо от угла падения. Предполагается, что  $\phi < 90^\circ$  и происходят только два отражения – по одному от каждого зеркала.

13. (III) Предположим, что к двум зеркалам на рис. 34.23 снизу приставлено третье зеркало; плоскость каждого из зеркал перпендикулярна плоскости двух остальных зеркал. а) Докажите, что любой луч, падающий на подсобный отражатель, троекратно отразившись, будет распространяться в первоначальном направлении. б) Что происходит, когда луч отражается только дважды?

#### Раздел 34.4

14. (I) Чему равен радиус вогнутой отражающей поверхности, которая фокусирует пучок параллельных лучей в точку на расстоянии 18,9 см перед собой?

15. (I) На каком расстоянии от выпуклого зеркала (радиусом 24,0 см) должен находиться объект, чтобы его изображение оказалось бесконечно удаленным?

16. (I) Вы пытаетесь разглядеть себя в посеребренном шаре диаметром 56,0 см, находясь от него на расстоянии 2,30 м. Где будет ваше изображение? Каким будет оно – действительным или мнимым? Сможете ли вы отчетливо увидеть себя?

17. (II) Начертив ход лучей, докажите, что увеличение  $m$  выпуклого зеркала, как и вогнутого зеркала, равно  $m = -d_i/d_o$ . (Подсказка: рассмотрите луч, идущий от верхней точки объекта и отражающийся в центре зеркала.)

18. (II) Зубному врачу требуется маленькое зеркало, которое на расстоянии 2,10 см от зуба давало бы прямое 5,5-кратное увеличение. Какое зеркало следует для этого взять, с каким радиусом кривизны?

19. (II) Покажите, что уравнение зеркала (34.3) остается в силе и для выпуклого зеркала, если фокусное расстояние  $f$  считать отрицательным.

20. (II) Пользуясь уравнением зеркала, докажите, что увеличение вогнутого зеркала меньше единицы, если объект расположен от зеркала дальше центра кривизны  $C$  ( $d_o > r$ ), и больше единицы, если объект расположен ближе центра кривизны  $C$  ( $d_o < r$ ).

21. (II) Объект высотой 2,40 см находится на расстоянии 22,0 см от сферического зеркала, в котором возникает мнимое изображение высотой 3,20 см. а) Что это за зеркало? б) Где находится изображение? в) Чему равен радиус кривизны зеркала?

22. (II) Увеличение объекта, находящегося на расстоянии 4,0 м от выпуклого зеркала, составляет 0,35. Чему равно фокусное расстояние этого зеркала?

23. (II) а) Плоское зеркало можно рассматривать как предельный случай сферического. В каком смысле следует понимать этот предел? б) Выведите уравнение, связывающее в этом предельном случае расстояние до изображения с расстоянием до объекта. в) Определите в том же пределе увеличение плоского зеркала. Согласуются ли ответы, полученные вами в пп. «б» и «в», с тем, что говорилось о плоских зеркалах в разд. 34.3?

24. (II) Чему равен радиус вогнутого зеркала, обеспечивающего 1,6-кратное увеличение лица на расстоянии 30 см от него?

25. (II) Человек ростом 1,58 м, находясь на расстоянии 4,50 м от выпуклого зеркала, замечает, что его изображение вдвое меньше, чем при отражении в плоском зеркале на том же расстоянии. Чему равен радиус кривизны выпуклого зеркала? (Предположите, что  $\sin \theta \approx \theta$ .)

26. (III) Короткий тонкий объект (типа короткого куска провода) длиной  $l$  расположен вдоль главной оси сферического зеркала. Докажите, что длина его изображения равна  $l' = m^2 l$ , т. е. «продольное» увеличение равно  $-m^2$ , где  $m$  – увеличение согласно формуле (34.4). Почему перед  $m^2$  стоит знак минус?

#### Раздел 34.5

27. (I) Нырлящик светит фонарем под водой вверх под углом  $23,0^\circ$  к нормали. Под каким углом свет выходит из воды?

28. (I) Под водой солнечные лучи образуют с нормалью угол  $50^\circ$ . Под каким углом к горизонту стоит солнце?

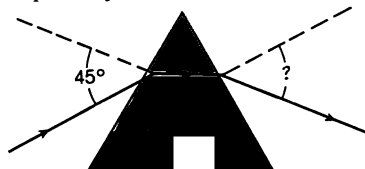


Рис. 34.24. К задаче 34.29.

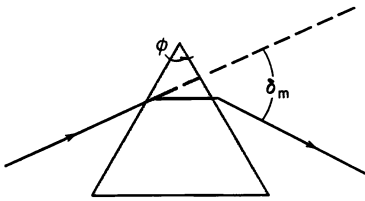


Рис. 34.25. К задаче 34.41.

29. (II) Свет падает на равностороннюю треугольную призму из крона под углом  $45,0^\circ$  к одной из граней (рис. 34.24). Вычислите угол, под которым свет выходит из противоположной грани. Показатель преломления крона  $n = 1,56$ .

30. (II) Яркий источник света находится под поверхностью воды в плавательном бассейне на глубине 2,50 м на расстоянии 1,45 м от бортика бассейна. Под каким углом свет выходит из воды у этого бортика? Предполагается, что бассейн залит водой до краев.

31. (II) Докажите в общем случае, что при падении пучка света на однородную пластину прозрачного вещества, как это изображено на рис. 34.18, направление пучка за пластиной параллельно направлению падающего пучка независимо от угла падения  $\theta$  и толщины пластины.

32. (II) Аквариум с плоскими стенками из стекла с показателем преломления 1,58 заполнен водой. Пучок света падает снаружи на стенку аквариума под углом  $43,7^\circ$  к нормали. Под каким углом свет падает в стекло, а затем в воду? Что было бы, если бы свет попадал непосредственно в воду?

33. (II) При прохождении света через призму угол между преломленным и падающим лучами называется углом отклонения  $\delta$  (рис. 34.25). Этот угол минимален, когда луч проходит через призму симметрично, т.е. в случае призмы, имеющей в сечении форму равнобедренного треугольника, луч проходит параллельно ее основанию. Докажите, что минимальный угол отклонения  $\delta_m$  связан с показателем преломления призмы  $n$  соотношением

$$n = \frac{\sin [(\phi + \delta_m)/2]}{\sin (\phi/2)},$$

где  $\phi$  – угол при вершине призмы.

34. (II) Луч света падает на плоскопараллельную стеклянную пластинку (рис. 34.18). Докажите, что если угол падения  $\theta$  мал, то смещение луча составляет  $d = t\theta(n - 1)/n$ , где  $t$  – толщина

стеклянной пластинки (угол  $\theta$  измеряется в радианах).

35. (III) Принцип Ферма утверждает, что «свет распространяется из одной точки в другую по пути, на прохождение которого затрачивается наименьшее время по сравнению с другими близкими путями». Выведите из принципа Ферма: а) закон отражения ( $\theta_i = \theta_r$ ); б) закон преломления (закон Снелля). (Подсказка: выберите две подходящие точки, такие, чтобы свет по пути из одной из них в другую претерпевал отражение или преломление; изобразите ход лучей между выбранными точками; напишите выражение для времени, которое будет затрачено светом при прохождении произвольного пути; продифференцируйте полученное выражение по времени.)

### Раздел 34.6

36. (I) Критический угол для поверхности раздела жидкость – воздух равен  $57^\circ$ . Чему равен показатель преломления жидкости?

37. (II) Свет от источника, находящегося на глубине 6,0 см ниже поверхности жидкости, падает на эту поверхность на расстоянии 4,0 см от точки, находящейся непосредственно над источником. Что можно сказать о показателе преломления жидкости, если в данном случае имеет место полное внутреннее отражение?

38. (II) Торцы цилиндрического стеклянного стержня ( $n = 1,54$ ) перпендикулярны его боковой поверхности. Докажите, что луч света, входящий в торец под любым углом, претерпевает на боковой поверхности стержня полное внутреннее отражение. Предполагается, что стержень находится в воздухе. Что было бы, если бы стержень находился в воде?

39. (II) Предположим, что луч падает на левую грань призмы на рис. 34.24 под углом  $45^\circ$ . Что можно сказать о показателе преломления призмы, если угол при ее вершине равен  $\phi = 75^\circ$ ?

40. (II) а) Каким должен быть минимальный показатель преломления стеклянной или пластмассовой призмы бинокля (рис. 34.20), чтобы полное внутреннее отражение происходило при  $45^\circ$ ? б) Будет ли бинокль работать, если его призмы погрузить в воду? Предполагается, что  $n = 1,50$ . в) Каким должен быть минимальный показатель преломления  $n$ , если призмы погружены в воду?

41. (II) Угол при вершине призмы  $\phi = 70^\circ$  (рис. 34.25). При каком минимальном угле падения луч будет выходить из противоположной грани ( $n = 1,58$ )?