

## ГЛАВА II

# ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

### § 8. Законы отражения и преломления света

Основным отличием геометрической оптики является то, что в ней рассматривают распространение световых лучей без каких-либо предположений об их природе. Каждый световой луч представляет собой линию (бесконечно тонкую), вдоль которой распространяется лучистая энергия. Ниже, в волновой оптике, мы увидим, что такое представление о свете не всегда может дать объяснение наблюдаемым явлениям. Однако для объяснения обширного класса явлений и конструирования многих весьма важных приборов это упрощенное представление вполне достаточно.

К числу самых простых явлений, разбираемых в геометрической оптике, принадлежит отражение света от зеркал.

Отражение света от зеркал подчиняется двум законам, открытым опытным путем:

*Луч, падающий на поверхность, нормаль к поверхности в точке падения и луч, отраженный от поверхности, лежат в одной плоскости, называемой плоскостью падения.*

*Угол между падающим лучом и нормалью к поверхности в точке падения (угол падения) равен углу между отраженным лучом и той же нормалью (угол отражения) (рис. 11).*

Пользуясь этими двумя законами отражения света, можно объяснить все явления, наблюдаемые при отражении пучка световых лучей от зеркала самой сложной формы.

Разберем случай отражения параллельного светового пучка от вогнутого сферического зеркала. На рис. 12 дуга окружности представляет собой сечение сферического зеркала, точка  $O$  — центр

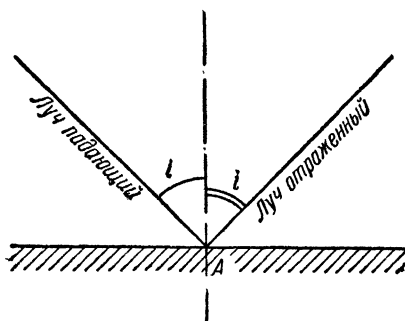


Рис. 11. Отражение света,

зеркала. Световой луч, идущий параллельно прямой  $OS$ , называемой *оптической осью*, попадает на зеркало в точке  $A$  и после отражения идет вниз, пересекая ось  $OS$  в точке  $B$ .

Задача заключается в том, чтобы найти связь между отрезком  $BS$ , радиусом сферы  $R$  и углом падения луча на поверхность в точке  $A$ .

Нормалью в точке  $A$  является радиус  $OA$ , проведенный из  $O$ . Как видно из чертежа, угол при  $O$  равен углу при  $A$ . Таким образом, треугольник  $AOB$  равнобедренный.

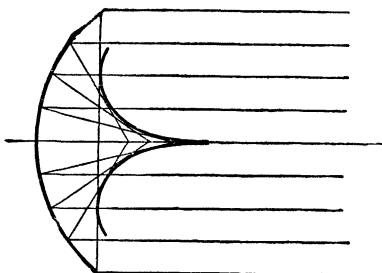
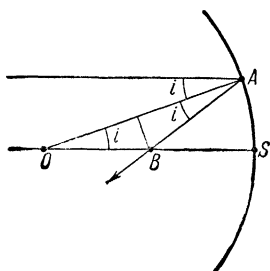


Рис. 12. Сферическое зеркало. Рис. 13. Образование каустики.

Сторона  $OB$  связана с  $R=QA$  следующей формулой:

$$OB = \frac{R}{2 \cos i},$$

откуда  $BS$  как функция  $R$  и  $i$  будет иметь следующий вид:

$$BS = OS - OB = R - \frac{R}{2 \cos i}. \quad (1)$$

Мы видим, что лучи, падающие на зеркало на разных расстояниях от вершины  $S$ , соответствующих различным углам  $i$ , будут после отражения пересекать ось  $OS$  в различных точках  $B$ .

Чем дальше луч от оси, тем больше угол  $i$  и тем, следовательно, меньше отрезок  $BS$ , вычисленный по формуле (1), т. е. тем ближе к  $S$  отраженный луч пересекает ось. Когда на зеркало падает параллельный пучок лучей, то пучок отраженных лучей огибает кривую, называемую *каустикой*. Возникновение кривой вытекает из формулы (1). Вид каустики изображен на рис. 13.

Таким образом, сферическое зеркало не собирает отраженных лучей в одну точку. Это явление носит название *сферической аберрации*. Только если зеркало имеет малые размеры по сравнению с радиусом кривизны, можно приближенно считать, что все отраженные лучи сходятся в одной точке. В этом случае угол  $i$  близок

к нулю, косинус практически равен единице, и формула (1) приобретает следующий вид:

$$BS \approx \frac{R}{2}.$$

В этом случае  $BS$  обозначают буквой  $f$  и называют *главным фокусным расстоянием зеркала*. Сферическая aberrация считается *отрицательной*, если крайние лучи пересекают ось ближе главного фокусного расстояния (сферическое зеркало), и *положительной* — если дальше фокуса (выпукло-вогнутая линза).

Применение сферических зеркал крайне ограничено ввиду только что описанных свойств. Вогнутые зеркала обычно применяют или для получения изображения звезд, — в этом случае на зеркало падает параллельный пучок лучей, и он должен быть сведен в точку, — или для получения параллельного пучка лучей, — в этом случае в главном фокусе зеркала помещают точечный источник света, и от зеркала отражается параллельный пучок (рис. 14).

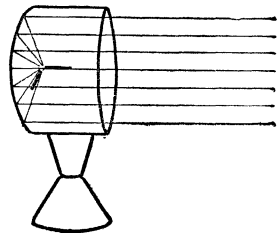


Рис. 14. Прожектор.

Из формулы (1) ясно, что для этих целей пригодны лишь малые сферические зеркала, улавливающие весьма малые количества света. Ввиду этого от сферических зеркал отказались и пользуются *параболическими* зеркалами. Из геометрических свойств параболы легко доказать, что параболоид вращения собирает все лучи, падающие параллельно оси, в одну точку (фокус параболоида). Следовательно, лучи, исходящие из источника, помещенного в фокусе, после отражения от параболоида становятся параллельными оси. Этими свойствами обладает параболоид любых размеров. Во всех телескопах и прожекторах стоят параболоческие зеркала, причем их величина часто достигает нескольких метров в поперечнике.

При переходе света из одной среды в другую происходит преломление световых лучей (рис. 15). Преломление световых лучей подчиняется двум следующим законам:

*Луч, падающий на преломляющую поверхность, нормаль к поверхности в точке падения и преломленный луч лежат в одной плоскости.*

*Синус угла падения  $i$  (рис. 15) между падающим лучом и нормалью относится к синусу угла преломления  $r$  между преломленным лучом и нормалью, как скорость света в первой среде  $v_1$  к скорости света во второй среде  $v_2$ :*

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2},$$

или, вводя показатель преломления  $n$ , равный  $\frac{v_1}{v_2}$ :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n. \quad (2)$$

Для обычных стекол  $n \approx 1,5$ . Пользуясь формулой (2) и первым законом преломления, можно объяснить все явления, происходящие при преломлении света на самых сложных поверхностях.

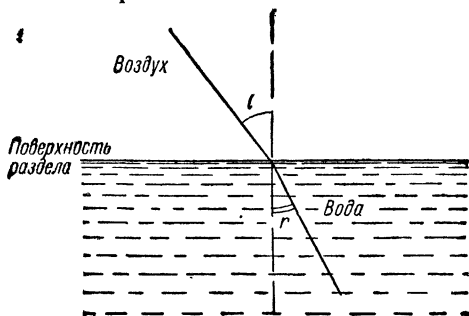


Рис. 15. Преломление света.

Из формулы (2) видно, что при  $n > 1$  угол  $i$  всегда больше угла  $r$ , т. е. преломленный луч при переходе из менее плотной в более плотную среду приближается к нормали.

При обратном направлении луча — из более плотной среды в менее плотную — картина будет обрат-

ратная. Если на рис. 15 считать направление светового луча обратным, то угол  $r$  будет углом падения, а угол  $i$  — углом преломления.

Увеличивая угол  $r$ , мы можем дойти до такого угла  $r_0$ , при котором

$$n \sin r_0 = \sin i$$

станет равным единице. Тогда

$$\sin i = 1$$

и

$$i = \frac{\pi}{2}.$$

Преломленный луч будет скользить вдоль границы раздела. Для углов падения, больших  $r_0$ , мы получим следующее противоречивое соотношение:

$$\sin i > 1.$$

Это соотношение, конечно, не удовлетворится ни при одном  $i$ . Преломленного луча вообще не будет. Опыт показывает, что действительно при падении лучей на границу раздела под углами с нормалью, большими, чем угол  $r_0$ , свет не проходит сквозь поверхность, а полностью отражается. Это явление, наблюдаемое при переходе света из более плотной среды в менее плотную, называют полным внутренним отражением.

Предельный угол  $r_0$  определяется простой формулой:

$$\sin r_0 = \frac{1}{n}.$$

Для обычных стекол ( $n \approx 1,5$ ) угол  $r_0$  равен примерно  $42^\circ$ .

Геометрическая оптика не совсем точно описывает явление полного внутреннего отражения. На самом деле наблюдается проникновение света во вторую среду. Однако это явление может быть объяснено только при учете волновых свойств света.

## § 9. Линза

Разберем сначала случай преломления света на двух плоских поверхностях, образующих малый угол  $\alpha$  между собой, т. е. действие тонкой призмы. На рис. 16 изображено сечение тонкой призмы, сделанной из стекла с показателем преломления  $n$ . В случае малых углов падения и преломления синусы углов  $i$  и  $r$  можно заменить самими углами, и формула (2) приобретает вид:

$$\frac{i}{r} = n. \quad (3)$$

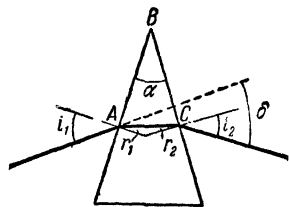


Рис. 16. Действие призмы.

Применяя формулу (3) последовательно к двум границам призмы и пользуясь геометрическими соображениями, можно получить связь между углом отклонения луча  $\delta$ , преломляющим углом призмы  $\alpha$  и показателем преломления  $n$ .

Согласно формуле (2)

$$\frac{i_1}{r_1} = n;$$

$$\frac{i_2}{r_2} = n.$$

С другой стороны, полное отклонение луча  $\delta$  складывается из двух отклонений, испытываемых лучом на двух поверхностях призмы. При преломлении на первой поверхности луч отклоняется на угол  $i_1 - r_1$ , при преломлении на второй — на угол  $i_2 - r_2$ . В результате получим:

$$\delta = i_1 - r_1 + i_2 - r_2.$$

Пользуясь написанными выше соотношениями, получим

$$\delta = (n - 1)(r_1 + r_2).$$

Теперь остается связать  $r_1 + r_2$  с преломляющим углом призмы  $\alpha$ . Из треугольника  $ABC$  следует:

$$\alpha + \angle BAC + \angle BCA = \pi.$$