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

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 α 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:

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

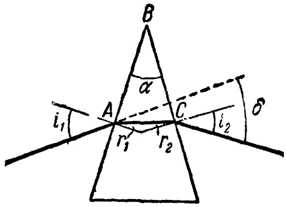

Рис. 16. Действие призмы.

Применяя формулу (3) последовательно к двум границам призмы и пользуясь геометрическими соображениями, можно получить связь между углом отклонения луча δ, преломляющим углом призмы α 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 δ 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 α. Из треугольника ABC следует:

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

Так как

$$\angle BAC=\frac{\pi}{2}-r_1,\quad \angle BCA=\frac{\pi}{2}-r_2,$$

то соотношение для суммы углов треугольника ABC приобретает следующий простой вид:

$$\alpha=r_1+r_2.$$

Заменив r_1+r_2 в формуле для δ, получаем окончательно:

$$\delta=\alpha(n-1). \tag{4}$$

Смысл формулы (4) ясен. Чем больше угол призмы α и показатель преломления вещества, тем сильнее отклоняется луч от первоначального направления.

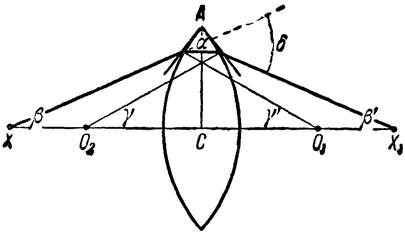

Рис. 17. Тонкая линза.

Самым простым преломляющим телом с криволинейными поверхностями является тонкая линза, представляющая собой кусок стекла, ограниченного двумя сферическими поверхностями. На рис. 17 изображено меридиональное сечение линзы. Ось симметрии линзы называется *оптической осью*. Мы ограничимся рассмотрением бесконечно малой линзы, у которой AC бесконечно мало по сравнению с радиусами кривизны R_1 и R_2 обеих ее поверхностей. Задача заключается в том, чтобы найти место X_1 пересечения с оптической осью преломленного линзой луча, вышедшего из точки X. При этом предполагаются известными XC, радиусы кривизны R_1 и R_2 и показатель преломления n. Вопрос о тонкой линзе легко свести к вопросу о тонкой призме, вернее, к вопросу о целой совокупности тонких призм, на которые можно разделить линзу (рис. 18). Чем дальше от центра линзы, тем угол призмы больше.

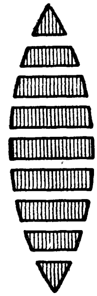

Рис. 18. Линза как сумма призм.

Переходим к решению поставленной выше задачи. Поверхность линзы заменяем касательными, которые перпендикулярны к радиусам, проведенным из центров O_1 и O_2 (рис. 17). Радиус отверстия линзы AC мал, следовательно, можно пренебречь тем, что радиусы и световые лучи пересекаются не в одной точке. Будем считать, что обе эти точки пересечения совпадают с A, причем углы при точках X, X_1, O_2 и O_1, которые обозначим соответственно β, β', γ и γ', весьма малы. Тогда углы можно выразить через отрезки следующим образом:

$$\beta=\frac{AC}{CX};\quad \beta'=\frac{AC}{CX_1};\quad \gamma=\frac{AC}{R_2};\quad \gamma'=\frac{AC}{R_1}.$$

Из геометрических соображений ясно, что

$$\alpha=\gamma+\gamma' \text{ и } \delta=\beta+\beta'.$$

Пользуясь формулой (4), получим:

$$\beta+\beta'=(n-1)(\gamma+\gamma').$$

Подставляя выражения углов через отрезки и сокращая на AC, получим:

$$\frac{1}{CX}+\frac{1}{CX_1}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right). \tag{5}$$

Эта формула носит название *формулы линзы* и решает поставленную задачу.

Мы видим, что при сделанных нами предположениях CX_1 не зависит от AC, т. е. вышедшие из точки X лучи, преломленные затем различными частями линзы (соответствующими различным AC), соберутся все в одной точке X_1, называемой изображением X. Если точка X находится бесконечно далеко, то $CX=\infty$, и первый член в формуле (5) исчезает; тогда

$$\frac{1}{CX_1}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right).$$

В этом случае CX_1 обозначают f и называют *главным фокусным расстоянием* линзы:

$$f=\frac{R_1R_2}{(n-1)(R_1+R_2)}, \tag{6}$$

формула (5) переходит в

$$\frac{1}{CX}+\frac{1}{CX_1}=\frac{1}{f}. \tag{7}$$

Из формулы (6) видно, что чем больше n отличается от единицы, тем меньше f и тем ближе к линзе собираются лучи. Также чем меньше R_1 и R_2, т. е. чем выпуклее линза, тем меньше f и тем сильнее преломляет линза.

Величина, обратная главному фокусному расстоянию, называется *оптической силой* линзы. Единицей оптической силы служит диоптрия. *Диоптрия равна оптической силе линзы с фокусным расстоянием в один метр.* Кроме изображенной на рис. 17 двояковыпуклой линзы, собирающей лучи, есть еще двояковогнутые рассеивающие линзы (рис. 19). Их оптическая сила обозначается отрицательным знаком. Лучи по выходе из двояковогнутой линзы кажутся выходящими из точки X, носящей название мнимого изображения в противоположность действительному изображению в случае двояковыпуклой линзы.

Следует указать, что и двояковыпуклая линза может давать мнимое изображение. Последнее получается, когда расстояние CX

меньше фокусного расстояния f, тогда [формула (7)] CX_1 отрицательно, т. е. точка X_1 лежит с той же стороны линзы, что и X.

Как мы увидим в следующем параграфе, отдельные линзы применяются довольно редко для получения изображений предметов.

Отдельные линзы применяют главным образом на маяках и в сигнальных аппаратах для получения параллельных световых пучков. При этом источник света помещают в главном фокусе линзы.

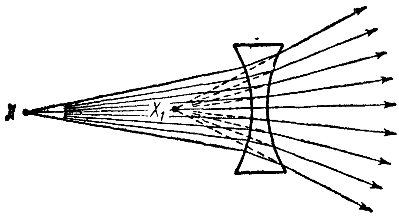

Рис. 19. Рассеивающая линза.

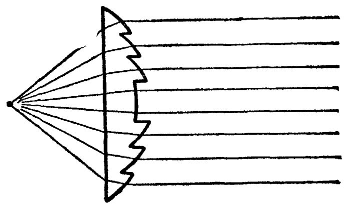

Рис. 20. Сечение линзы Френеля.

Так как линзы для таких устройств требуются больших размеров, то это сопряжено с большим увеличением их веса, если пользоваться обычными линзами со сферическими поверхностями. Френель изобрел линзы со ступенчатыми поверхностями, в которых оказалось возможным резко уменьшить количество стекла. Из рис. 20 видно действие такой линзы.

§ 10. Оптические системы

Все сказанное в предыдущем параграфе о линзах относилось к малым линзам, поперечник которых значительно меньше их фокусного расстояния. Кроме того, все сделанные выводы справедливы лишь для лучей, образующих весьма малый угол с оптической осью. Для обычного применения линз—получения изображения каких-либо предметов—линзы малого размера так же мало годятся, как и малые зеркала в соответствующих случаях. Так же как и в случае зеркал, малая линза сконцентрирует в изображении слишком малое количество света.

При увеличении размера линзы преломленные ею лучи уже не собираются в одну точку, так как угол с осью становится большим. Возникает, так же как и в зеркалах, *сферическая аберрация*. Если мы имеем предмет, состоящий из ряда светящихся точек, то изображение этого предмета получится расплывчатым, ибо пучки лучей, исходящие из каждой точки предмета, уже не соберутся линзой в соответствующие точки изображения.

С другой стороны, если наш предмет имеет большие размеры в направлении, перпендикулярном к оси, то даже при малой линзе лучи предмета, проходящие сквозь линзу, будут образовывать боль-