

(рефракторы), заменить зеркалами (рефлекторы), у которых хроматическая аберрация отсутствует.

Основываясь на отсутствии значительной хроматической аберрации для глаза, представляющего собой совокупность различных сред, Эйлер предположил, что зависимость  $n$  от  $\lambda$  для каждой среды различна, и рассчитал, каким путем можно скорректировать хроматическую аберрацию линзы. В результате этого в XVIII и XIX вв. был сконструирован ряд объективов, у которых комбинацией собирательных и рассеивающих линз, изготовленных из стекол с разной дисперсией, удастся совместить фокусы лучей двух (ахроматы) и даже трех (апохроматы) различных цветов и тем самым практически ликвидировать хроматическую аберрацию.

Целый ряд дополнительных искажений обусловлен волновой природой света, интерференцией и дифракцией. Возникающие при этом ограничения разрешающей способности линз будут рассмотрены в § 15.

## § 9. Оптические системы

Для исправления многочисленных дефектов изображения, создаваемых одиночной линзой, в оптических приборах применяют системы различных линз, изготовленных из разных сортов стекла. Обычно используются центрированные оптические системы, в которых центры кривизны всех последовательных сферических поверхностей раздела расположены на одной прямой, являющейся оптической осью системы.

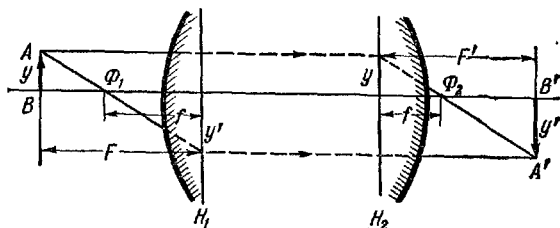


Рис. 1.44.

Такие хорошо скорректированные оптические системы близки к идеальным, т. е. можно практически считать, что пучок лучей, исходящих из светящейся точки  $A$ , после многочисленных преломлений внутри системы соберется в одной точке  $A'$ , являющейся изображением точки  $A$ . Лучи, падающие параллельно оптической оси (от бесконечно удаленного источника), после прохождения оптической системы соберутся в одной точке  $\Phi_2$ , которая, как и в случае одной линзы, называется задним главным

фокусом системы. На рис. 1.44 показано пунктиром, что продолжения падающих и выходящих лучей в этом случае пересекаются в точках некоторой плоскости  $H_2$ , перпендикулярной к оптической оси и носящей название задней главной плоскости системы. Аналогичным образом могут быть построены передний главный фокус  $\Phi_1$  и передняя главная плоскость  $H_1$ . Все лучи, исходящие из  $\Phi_1$ , как бы изламываются на главной плоскости  $H_1$  и выходят параллельно оптической оси. Если среда до и после оптической системы одинакова (например, воздух), то оба главных фокусных расстояния  $\Phi_1 H_1$  и  $\Phi_2 H_2$  одинаковы.

Для тонкой линзы обе главные плоскости сливаются в одну. Для сложной оптической системы эти плоскости различны и могут располагаться как внутри, так и вне системы, несимметрично относительно поверхностей, ограничивающих систему.

Если известны положения главных фокусов и главных плоскостей системы, то построение изображений производится аналогично тонкой линзе. Как видно из рис. 1.44, вся разница состоит в том, что расстояния  $F$  и  $F'$  до предмета и его изображения должны отсчитываться не от центра, как в случае тонкой линзы, а от соответственных главных плоскостей. При этом остаются в силе все формулы для увеличений, например:

$$Y = \frac{y'}{y} = \frac{-F-f}{l} = \frac{f}{F'-l} = \frac{F'}{-F}. \quad (9.1)$$

Отсюда

$$(F+f)(F'-f) = -f^2, \quad \text{или} \quad FF' - Ff + F'f = 0,$$

и, разделив на  $fFF'$ , после преобразований получаем:

$$\frac{1}{F'} - \frac{1}{F} = \frac{1}{l} \quad (9.2)$$

— соотношение, вполне аналогичное формуле тонкой линзы (8.4).

Оптические приборы широко применяются для расширения возможностей визуального наблюдения. Поскольку при этом изображения, получаемые в оптическом приборе, рассматриваются глазом, то требования, предъявляемые к этим изображениям, зависят от свойств человеческого глаза как оптической системы. Не касаясь общеизвестных деталей физиологического строения глаза, отметим здесь лишь две его особенности, существенные с рассматриваемой точки зрения:

1. Основной линзой глаза является хрусталик  $x$ , дающий изображение предмета  $P$  на сетчатой оболочке  $C$ , как показано на рис. 1.45. Показатель преломления  $n$  стекловидной жидкости, заполняющей глаз за хрусталиком, отличен от показателя

преломления воздуха ( $\approx 1$ ) перед хрусталиком. Применяя выведенную для такого случая формулу (8.6), имеем:

$$\frac{n}{F'} - \frac{1}{F} = \frac{1}{f}, \quad (9.3)$$

где  $f$  — переднее фокусное расстояние хрусталика.

Для глаза величины  $F'$  и  $n$  постоянны. Для того чтобы изображение предмета, находящегося на различных расстояниях  $F$  от глаза, попадало на сетчатую оболочку, необходимо с изменением  $F$  менять в соответствии с (9.3) фокусное расстояние хрусталика  $f$ . Для этого служат специальные мышцы, деформирующие хрусталик и позволяющие аккомодировать глаз в

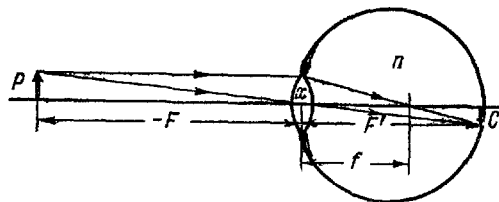


Рис. 1.45.

очень широких пределах от  $|F| = \infty$  до некоторого  $|F|_{\text{мин}}$ . Абсолютная величина расстояния ясного зрения для нормального глаза составляет  $|F|_{\text{мин}} = 25 \text{ см.}$  У близорукого глаза  $|F|_{\text{мин}} < 25 \text{ см.}$ , а у дальнозоркого  $|F|_{\text{мин}} > 25 \text{ см.}$

2. Свет, попадая на сетчатую оболочку, вызывает химическую реакцию разложения зрительного пурпура, заключенного в так называемых палочках и колбочках, и таким путем раздражает окончания зрительного нерва. Эти раздражения передаются в головной мозг и создают там зрительные ощущения.

Сетчатая оболочка глаза не сплошная. Окончания зрительного нерва находятся на некотором, хотя и небольшом, расстоянии друг от друга. Если изображение предмета будет столь малым, что покроеет лишь один светочувствительный элемент сетчатки, то глаз будет воспринимать этот предмет как одну светящуюся точку. Для

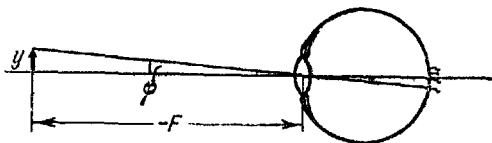


Рис. 1.46.

того чтобы изображения крайних точек предмета попадали на соседние светочувствительные элементы, этот предмет должен быть виден под некоторым минимальным углом зрения  $\varphi_{\text{мин}} \approx 1' \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ рад.}$

Поскольку для малых углов (рис. 1.46)

$$\varphi \approx \frac{y}{F}, \quad (9.4)$$

то глаз не будет различать деталей слишком малых ( $y < 3 \cdot 10^{-4} F$ ) или слишком удаленных ( $F > 3500 y$ ) предметов и воспримет их как точечные.

Для различения близких, но малых, или больших, но далеких, предметов служат различные в и з у а л ь н ы е оптические приборы. Как показывает приведенное рассмотрение оптических свойств глаза, основной задачей визуальных приборов является увеличение угла зрения, под которым рассматривается предмет глазом. Рассмотрим схематически ход лучей и принципы действия визуальных приборов.

1. Л у п а представляет собой короткофокусную собирательную линзу (или систему линз). Малый предмет  $AB$  высотой  $y$  помещают, как показано на рис. 1.47, несколько ближе главного

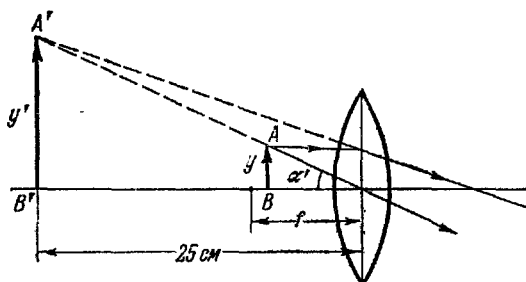


Рис. 1.47.

фокуса, так, чтобы его мнимое изображение  $A'B'$  получилось на расстоянии ясного зрения 25 см. Угол  $\alpha'$ , под которым видно это изображение, определится из условия

$$\operatorname{tg} \alpha' \approx \frac{y}{f}.$$

Если бы предмет наблюдался невооруженным глазом, то его пришлось бы поместить на расстояние ясного зрения и он был бы виден под углом  $\alpha$ , определяемым из условия

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{25}.$$

Следовательно, угловое увеличение, даваемое лупой, равно:

$$A = \frac{\operatorname{tg} \alpha'}{\operatorname{tg} \alpha} \approx \frac{y/f}{y/25} = \frac{25}{f}. \quad (9.5)$$

Уменьшение фокусного расстояния  $f$  связано с увеличением кривизны и уменьшением радиуса кривизны (а следовательно, и диаметра) лупы по формуле (8.5). При  $n_{\text{стекла}} = 1,5$  и  $R_2 = -R_1 = R$

для двояковыпуклой линзы имеем  $f=R$ . Поэтому лупа практически не может увеличивать более чем в 25—40 раз.

2. М и к р о с к о п, как и лупа, служит для рассматривания близких, но очень мелких предметов, требующих значительного увеличения. Как показано на рис. 1.48, микроскоп состоит из двух систем линз — объектива  $Ob$  и окуляра  $Ok$ , расстояние между которыми можно варьировать, изменяя длину тубуса.

Рассматриваемый предмет  $y$  помещают на расстояние, несколько превышающее главное фокусное расстояние объектива  $f_{об}$ .

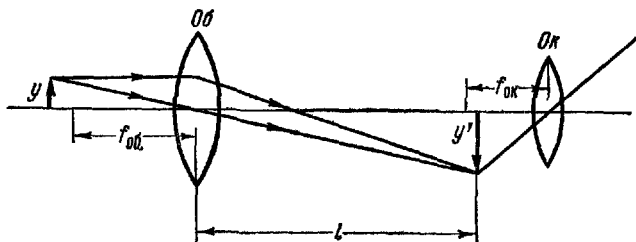


Рис. 1.48.

Изменяя длину тубуса, получают изображение предмета  $y'$ , увеличенное в  $l/f_{об}$  раз. Это линейно увеличенное изображение рассматривают в окуляре, как в лупу. Таким образом, полное угловое увеличение микроскопа равно:

$$A = \frac{l}{f_{об}} \frac{25}{f_{ок}}, \quad (9.6)$$

и при достаточно большом отношении  $l/f_{об}$  можно получить общее увеличение порядка 1500—2000 раз. Фактически предел увеличения микроскопа ставится волновыми свойствами света (см. § 15).

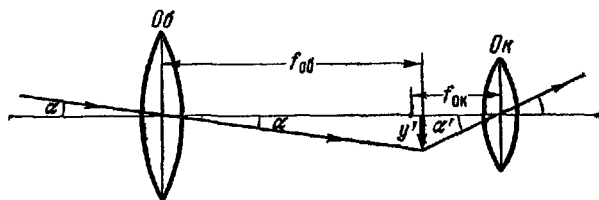


Рис. 1.49.

3. З р и т е л ь н а я т р у б а ( т е л е с к о п ) предназначена для рассмотрения больших, но удаленных предметов. На рис. 1.49 показано, что зрительная труба состоит из длиннофокусного

объектива и короткофокусного окуляра, расположенных на расстоянии порядка  $f_{об} + f_{ок}$ .

Лучи от крайней точки удаленного предмета пересекают оптическую ось окуляра под некоторым углом  $\alpha$  и дают изображение предмета  $y'$  в фокальной плоскости. Как видно из рисунка, окуляр превращает большой, но далекий предмет в маленькое, но близкое изображение, не меняя угла зрения  $\alpha$ . Полученное изображение рассматривают в окуляр, как в лупу. Общее угловое увеличение зрительной трубы равно:

$$A = \frac{\operatorname{tg} \alpha'}{\operatorname{tg} \alpha} \approx \frac{y'/f_{ок}}{y'/f_{об}} = \frac{f_{об}}{f_{ок}}. \quad (9.7)$$

Для получения значительных увеличений необходимо выполнение условия

$$f_{об} \gg f_{ок}.$$

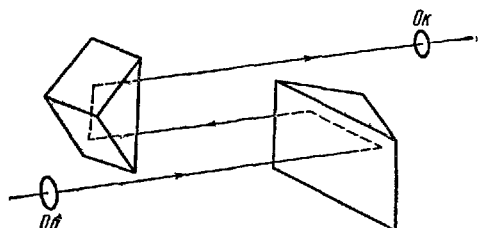


Рис. 1 50.

Для уменьшения общих габаритов прибора в бинокле с помощью двух призм полного внутреннего отражения заставляют лучи между объективом и окуляром проходить одно и то же расстояние туда и обратно три раза (рис. 1.50). Для большей компактности обе призмы располагают во взаимно перпендикулярных плоскостях. Бинокль обычно употребляется при наблюдении двумя глазами. Увеличивая расстояние между объективами, мы как бы увеличиваем базу между глазами и добиваемся большей стереоскопичности видения (с т е р е о т р у б а).

Трудности в изготовлении однородных и точно отшлифованных больших линз приводят к тому, что в астрономических телескопах в качестве объектива широко применяют зеркала. Такие зеркальные

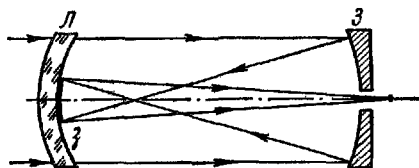


Рис. 1.51.

телескопы называются рефлекторами. В то время как крупнейшие рефракторы имеют диаметр объективов (по две линзы в каждом, т. е. по четыре поверхности) 75 см (Пулковский) и 104 см (Йеркский), крупнейший зеркальный телескоп-рефлектор имеет диаметр зеркала 5 м.

Преимуществами рефлектора являются отсутствие хроматической аберрации и сферической аберрации. Последнее достигается тем, что зеркалу придается поверхность параболоида вращения. Изготовление такой поверхности представляет значительные трудности. Поэтому большое значение имеет открытие советского

ученого Д. Д. Максудова (1941 г.), показавшего, что аналогичные результаты можно получить и с помощью сферического зеркала.

Схема телескопа Максудова изображена на рис. 1.51. Объектив состоит из менисковой (выпукло-вогнутой) линзы  $L$ , обладающей высокой степенью ахроматичности, и сферического зеркала  $Z$ . Положительная сферическая aberrация мениска полностью компенсирует отрицательную по знаку aberrацию зеркала. Сходящиеся лучи отражаются от вторичного зеркальца  $z$ , нанесенного на внутренней поверхности мениска, и выходят в центральное отверстие зеркала  $Z$ . Двукратное изменение направления хода лучей, так же как и в бинокле, укорачивает всю систему, резко уменьшает ее габариты и вес, а следовательно, и нежелательные для телескопов деформации под действием собственной тяжести.

---