

Лекция 24

## § 14.6. Тонкие линзы

**1. Формула тонкой линзы.** *Линзой (сферической) называется прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. Линия центров этих поверхностей называется главной оптической осью линзы.*

Рассмотрим точечный источник  $S$ , находящийся вне линзы на её главной оптической оси (рис. 1) и построим ход произвольного (приосевого) луча, испущенного источником в сторону линзы. Испытав два последовательных преломления в точках  $M$  и  $N$ , этот луч пересечёт главную

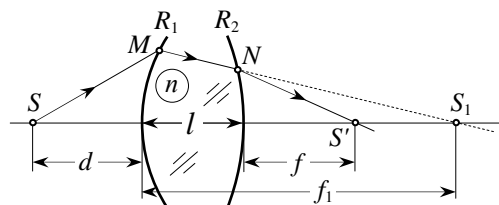


Рис. 1

ную оптическую ось в некоторой точке  $S'$ . Поскольку преломление на каждой из сферических поверхностей, как мы видели в предыдущем параграфе, не нарушает гомоцентричности падающего на неё пучка, можно утверждать, что точка эта является *изображением* линзой источника  $S$ .

Для определения её положения найдём сначала «промежуточное» изображение  $S_1$ , даваемое границей  $R_1$  (которое получается, если убрать границу  $R_2$ ):

$$\frac{1}{d} + \frac{n}{f_1} = \frac{(n-1)}{R_1}. \quad (1)$$

Это изображение является (мнимым) источником по отношению к поверхности  $R_2$ , которая преобразует его в (действительное) изображение  $S'$ . Применяя второй раз эту формулу (уже к поверхности  $R_2$ ), можно найти положение  $S'$ . Однако целесообразно предварительно воспользоваться принципом обратимости и изменить направление луча, изображённого на рис. 1, на противоположное. Тогда точка  $S'$  превратится в действительный источник, а  $S_1$  — в мнимое изображение и формула (7л23) для поверхности  $R_2$  примет вид

$$\frac{1}{f} - \frac{n}{f_1 - l} = \frac{(n-1)}{R_2}. \quad (2)$$

Ограничиваясь рассмотрением тонких линз, т. е. полагая  $l \rightarrow 0$ , и

складывая (1) и (2), получим так называемую *формулу тонкой линзы*

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (3)$$

или

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} \equiv D, \quad (4)$$

где *фокусное расстояние*  $F$  и *оптическая сила*  $D$  линзы, очевидно, определяются выражением

$$\frac{1}{F} = D = (n-1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (5)$$

Таким образом, величины  $d$  и  $f$  оказываются связанными здесь таким же соотношением, как и в случае сферического зеркала. Стало быть, и свойства преобразований световых пучков линзой и сферическим зеркалом должны быть идентичными. В частности, падающий на линзу параллельный пучок, идущий вдоль главной оптической оси, после прохождения через линзу соберётся в её *главном фокусе*  $F$  (или будет казаться исходящим из него), т. е. в точке, находящейся от линзы на фокусном расстоянии, определяемом формулой (5). Как явствует из нашего рассмотрения, у каждой линзы два главных фокуса — *передний* и *задний*, причём они могут меняться ролями в зависимости от того, с какой стороны на линзу падает свет. Оба фокуса даже для несимметричной линзы находятся от неё на одинаковых расстояниях, ибо ни (3), ни (5) не меняются при замене  $R_1$  на  $R_2$  и наоборот.

Поскольку толщина линзы в нашем приближении равна нулю, линзу принято изображать плоскостью, перпендикулярной главной оптической оси системы. *Точка пересечения главной оптической оси с плоскостью линзы называется её оптическим центром*. Луч проходит через оптический центр линзы без изменения, поскольку в окрестности центра линза представляет собой плоскопараллельную пластинку бесконечно малой толщины.

Любая прямая, проходящая через оптический центр линзы и не перпендикулярная её плоскости, называется *побочной оптической осью*.

**Замечание.** Мы получили формулу линзы, рассматривая точки, находящиеся на её главной оптической оси. Обобщение этой формулы на точки, лежащие поодаль, нуждается в более подробном рассмотрении, нежели в случае со сферическим зеркалом. Действительно, любая побочная ось зеркала оптически совершенно идентична главной, ибо так же, как и последняя, проходит через центр сферы. Побочная же ось линзы, в отличие

от главной, не проходит ни через один из центров двух её сфер-граней. Покажем, что в пределах точности нашего рассмотрения полученная формула оказывается справедливой и для точек, лежащих на побочных оптических осях (если последние составляют малые углы с главной). Для этого со-

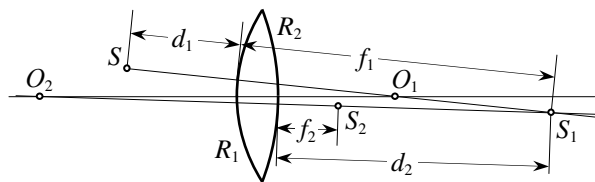


Рис. 2

единим источник  $S$  с центром  $O_1$  сферы  $R_1$ , ближайшей к источнику (рис. 2). Получим главную оптическую ось *первой преломляющей поверхности* (см. § 14.5). На этой оси и будет лежать «промежуточное» изображение  $S_1$ . При этом расстояния  $d_1$  и  $f_1$ , фигурирующие в формуле (7л23), должны отсчитываться, очевидно, вдоль прямой  $SO_1$ . Для построения окончательного изображения  $S_2$ , по отношению к которому точка  $S_1$  является источником, проведём главную оптическую ось *второй преломляющей поверхности*  $R_2$ , соединив точки  $S_1$  и центр второй сферы  $O_2$ . Очевидно, на этой оси и будет лежать окончательное изображение  $S_2$  и длины  $d_2$  и  $f_2$  для формулы (7л23) следует откладывать именно вдоль этой оси.

Таким образом, для построения изображения точки  $S$ , не лежащей на главной оптической оси  $O_2O_1$  линзы, необходимо дважды применить формулу (7л23), но откладывать соответствующие расстояния не вдоль этой оси, а вдоль ломаной  $SS_1O_2$ , каждое звено которой, как это видно из рисунка, образует весьма малые углы с осью  $O_2O_1$ . Стало быть, проекции данных расстояний на направление  $O_2O_1$  будут практически совпадать с самими этими расстояниями, так что последние можно сразу отсчитывать вдоль главной оптической оси линзы. Отсюда следует, что перпендикулярный этой оси отрезок (все точки которого находятся на одном и том же расстоянии от линзы) преобразуется также в перпендикулярный отрезок.

Назовём *побочным фокусом* центр преломлённого линзой параллельного пучка, падающего вдоль побочной оптической оси линзы. Совокупность побочных фокусов образует *фокальную поверхность*, которая, как нетрудно видеть, представляет собой *плоскость*, перпендикулярную главной оси. Действительно, поскольку параллельный пучок является предельным случаем гомоцентрического с бесконечно удалённым центром, побочный фокус можно рассматривать как изображение линзой удалённой периферийной (не лежащей на главной оптической оси) точки. Все

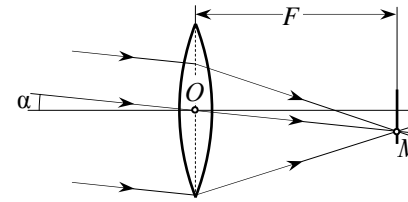
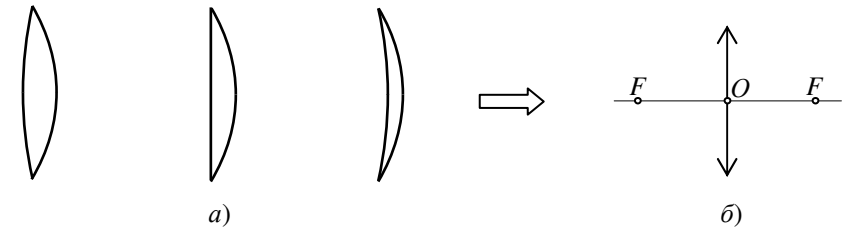


Рис. 3

эти изображения, согласно формуле линзы, будут находиться от неё на одном и том же расстоянии  $F$ , так что фокальная поверхность действительно является плоскостью, причём каждая точка  $M$  этой плоскости соответствует, очевидно, определённому углу  $\alpha$  падения на линзу параллельного пучка лучей (рис. 3).

**2. Правило знаков. Типы линз.** Поскольку полученная формула линзы (3) является следствием формулы преломления на сферической поверхности (7л23), сформулированное там правило знаков оказывается верным и для линзы. Это правило требует величины  $d$  и  $f$  считать алгебраическими, большими нуля для действительных источника и изображения и меньшими нуля для мнимых. Положительный радиус приписывается выпуклой наружу поверхности, отрицательный — вогнутой. Соответствующий знак получается и у величин  $F$  и  $D$ . Если  $F > 0$  ( $D > 0$ ), то линза называется *собирающей* или *положительной*, если  $F < 0$  ( $D < 0$ ), — *рассеивающей* или *отрицательной*.

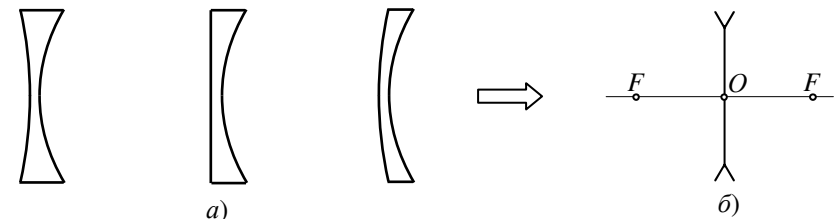


а)

б)

Рис. 4

На рис. 4 а изображены собирающие линзы различных профилей — *двояковыпуклая*, *плоско-выпуклая* и *вогнуто-выпуклая*, а на рис. 4 б — схематичное изображение собирающей линзы. Точки  $O$  и  $F$  — соответственно её оптический центр и главные фокусы. На рис. 5 а и б последовательно представлены варианты рассеивающей линзы — *двояковогнутая*,



а)

б)

Рис. 5

плоско-вогнутая и выпукло-вогнутая — и её схематичное изображение. Для собирающей линзы характерно увеличение её толщины при приближении к центру, для рассеивающей — уменьшение этой толщины<sup>1</sup>.

**3. Базовые лучи. Линейное увеличение.** Для тонкой линзы, так же, как и для сферического зеркала, можно провести ряд базовых лучей, т. е. таких, ход которых после преломления известен. Их, однако, здесь не четыре, как у зеркала, а только три, ибо оптический центр и полюс зеркала как бы сливаются в линзе в одну точку — оптический центр. Лучи эти представлены на рис. 6.

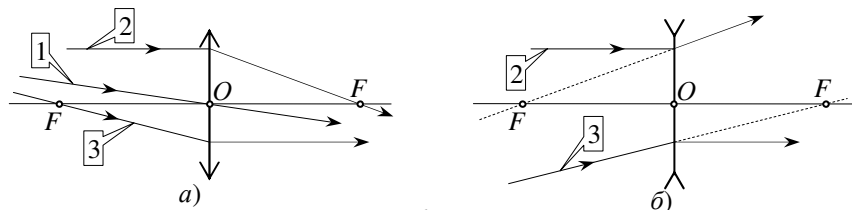


Рис. 6

1. Луч, идущий через оптический центр  $O$ , проходит без изменения (рис. 6 а).

2. Луч, параллельный главной оптической оси, после преломления в положительной линзе проходит через её задний фокус  $F$  (рис. 6 а), после преломления в отрицательной — кажется исходящим из её переднего фокуса  $F$  (рис. 6 б).

3. Луч, проходящий через передний фокус собирающей линзы (рис. 6 а) или направленный на задний фокус рассеивающей (рис. 6 б) после преломления идёт вдоль главной оптической оси.

Базовые лучи используются (как и в случае сферического зеркала) при решении ряда задач на построение. С их помощью наглядно объясняется принцип действия и рассчитываются характеристики многих оптических приборов (об этом речь впереди). Сейчас мы применим один из этих лучей для вывода формулы линейного увеличения линзы, рассмотрев простейший случай предмета в виде перпендикулярного главной оптической оси вектора с основанием, расположенным на этой оси (рис. 7). Проведём луч №1 через вершину вектора и оптический центр линзы. Очевидно, на нём (на каком-

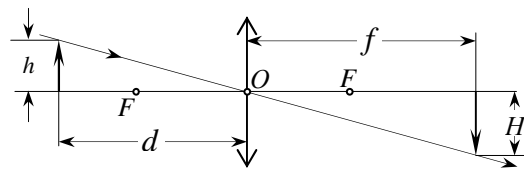


Рис. 7

<sup>1</sup> Речь идёт о линзах, изготовленных из оптически более плотного вещества, нежели среда, в которой они находятся. В противном случае (скажем, воздушная линза в воде) приведённые утверждения меняются на обратные. Соответственно меняются местами и профили линз, изображённые на рис. 4 а и 5 а.

то расстоянии  $f$ , определяемом формулой линзы) будет лежать изображение этой вершины. Из подобия треугольников рис.7

$$\Gamma \equiv \frac{H}{h} = \left| \frac{f}{d} \right|, \quad (6)$$

т. е. формула получается абсолютно такой же, как и для зеркала. Поскольку, как нетрудно убедиться, эта формула справедлива не только для действительных, но и для мнимых источников и изображений<sup>1</sup>, в её правой части стоит модуль.

## ЗРЕНИЕ. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

### § 14.7. Глаз как оптическая система

Глаз человека представляет собой приблизительно шарообразное тело диаметром около 2,5 см (рис. 8). Он окружён защитной оболочкой — *склерой*. Передняя прозрачная часть склеры называется *роговой оболочкой* или *роговицей*. За роговицей расположена непрозрачная *радужная оболочка*, или *радужка*, окрашенная в какой-либо цвет. В радужке имеется входное отверстие — *зрачок*, диаметр которого рефлекторно меняется в

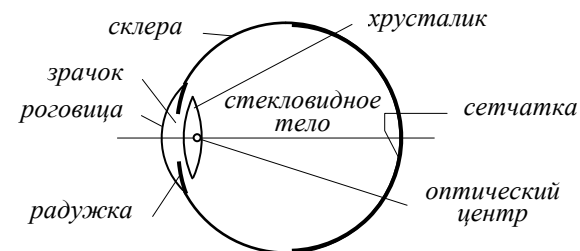


Рис. 8

зависимости от падающего освещения в пределах  $2 \div 8 \text{ мм}$ . За радужкой находится *хрусталик* — двояковыпуклая линза, кривизна поверхностей которой может меняться с помощью специальной кольцевой мышцы (на рисунке не показана). Задняя стенка склеры (глазное дно) покрыта так называемой *сетчатой оболочкой*, или *сетчаткой*, являющейся светочувствительным элементом и представляющей собой разветвления зрительного нерва. Внутренность глаза заполнена прозрачным *стекловидным телом*. Попадающие в глаз лучи испытывают преломление сначала на поверхности роговицы, а затем, проходя через хрусталик.

В целом глаз схематически можно рассматривать как собирающую линзу с переменным фокусным расстоянием и экран, роль которого играет сетчатка. За оптический центр линзы можно условно принять точку, находящуюся внутри хрусталика вблизи его задней границы. При рас-

<sup>1</sup> Она справедлива, очевидно, и для любых видов тонких линз.

сматривании какого-либо предмета линза формирует на сетчатке его действительное изображение, которое воспринимается зрительным нервом и передаётся в мозг. При изменении расстояния до предмета глазная мышца так меняет кривизну хрусталика, чтобы изображение всегда оставалось на сетчатке. Этот процесс называется *аккомодацией* глаза, а наименьшее и наибольшее расстояния до предмета при этом — соответственно ближним  $d_{min}$  и дальним  $d_{max}$  *пределами аккомодации*. Для нормального глаза  $d_{max} = \infty$  (полностью расслабленное состояние), а  $d_{min}$  (максимальное напряжение мышцы) в зависимости от возраста человека меняется приблизительно от 10 см у двадцатилетних и более молодых до 22-25 см у 40-45-летних. У пожилых людей  $d_{min}$  оказывается ещё больше.

*Расстоянием наилучшего зрения*  $d_0$  называется наименьшее расстояние до предмета, на котором глаз может его чётко видеть без чрезмерного напряжения. Оно принимается равным 25 см. Мы отождествим это расстояние с усреднённым по различным возрастным группам ближним пределом аккомодации, т. е. положим (для нормального глаза)

$$d_{min} = d_0 = 25 \text{ см} .$$

*Углом зрения* называется угол между прямыми, проведёнными из крайних точек предмета в оптический центр глаза. Очевидно, что этот угол определяет размеры изображения предмета на сетчатке. При удалении предмета его угол зрения уменьшается, и при некотором значении  $\alpha_{min} \approx 1'$  изображение данного предмета на сетчатке попадает на одно нервное окончание, т. е. протяжённый объект воспринимается глазом, как точка. Этот угол называется *разрешающей способностью* глаза.

**Замечание.** Рассмотренная упрощённая модель глаза была предложена Г. Гельмгольцем. Существует ещё одна — модель У. Бейтса, — отличающаяся от описанной механизмом аккомодации. По Бейтсу хрусталик всегда имеет постоянную кривизну, а наведение на резкость происходит путём деформации особыми мышцами самого глазного яблока: при приближении рассматриваемого объекта глаз растягивается по горизонтали и сетчатка отдаляется от хрусталика. Для описания работы глаза и характеристики его параметров можно с равным правом пользоваться любой из приведённых моделей (мы и дальше будем опираться на модель Гельмгольца). Аккомодация реального глаза осуществляется за счёт одновременного действия обоих указанных механизмов.

## § 14.8. Близорукость и дальновзоркость

Рассмотрим два наиболее распространённых дефекта зрения — *близорукость* и *дальновзоркость*, — связанных с нарушением соответственно

дальнего и ближнего пределов аккомодации.

При близорукости  $d_{max} < \infty$ . Это значит, что даже при полном расслаблении кольцевой мышцы кривизна хрусталика оказывается избыточной и входящий параллельный пучок, испущенный бесконечно удалённой точкой, пересекается перед сетчаткой в некоторой точке  $M$  (рис. 9). Однако если перед глазом поставить отрицательную линзу и правильно подобрать её оптическую силу, то она превратит этот параллельный пучок в расходящийся, который будет казаться глазу исходящим из точки  $S'$ , находящейся на расстоянии  $d_{max}$  от глаза. Расходящийся пучок соберётся как раз на сетчатке, и человек в таких очках увидит бесконечно удалённую точку. Поскольку параллельный пучок после преломления в рассеивающей линзе кажется исходящим из её фокуса, оптическая сила очков

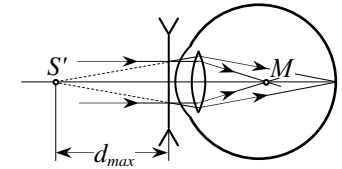


Рис. 9

$$D_{\text{близ}} = -\frac{1}{d_{\text{max}}}. \quad (7)$$

Дальзоркий человек, наоборот, плохо видит вблизи. Его ближний предел аккомодации  $d_{min} > d_0$ . Даже максимально напрягаясь, дальзоркий глаз не в состоянии собрать на сетчатке пучок лучей, испущенный точкой, находящейся на расстоянии  $d_0$ : он сходится за сетчаткой (рис. 10). Дальзоркость корректируется положительными линзами. Пройдя через такую линзу, пучок становится менее расходящимся, и оптической силы хрусталика оказывается уже достаточной, чтобы собрать пучок на сетчатке. Таким образом, очки должны «переводить» источник  $S$  с расстояния  $d_0$ , в его мнимое<sup>1</sup> изображение  $S'$ , находящееся на расстоянии  $d_{min}$ . По формуле линзы

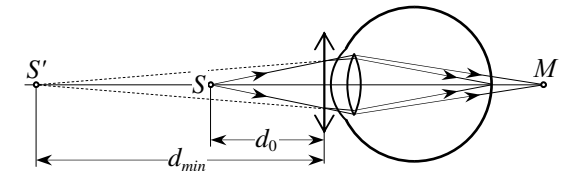


Рис. 10

$$D_{\text{дальн}} = \frac{1}{d_0} - \frac{1}{d_{min}}. \quad (8)$$

**Замечание.** Следует иметь в виду, что очки исправляют только один, причём вполне определённый, нарушенный предел аккомодации — даль-

<sup>1</sup> Изображение, даваемое любыми очками, всегда является мнимым, поскольку находится с той же стороны от линзы, что и источник.



ний для близорукого глаза и ближний для дальнозоркого. Обычно при близорукости «укорачиваются» оба предела и  $d_{min} < d_0$ . При этом малый ближний предел близорукого глаза является его преимуществом перед нормальным: близорукому часто не нужна лупа, чтобы, например, вытащить занозу. Поэтому совершенно неправильно подбирать очки, которые «отодвигали» бы ближний предел на  $d_0$  (т. е. ухудшали бы зрение).

### § 14.9. Угловое увеличение приборов, вооружающих глаз

Основным назначением многих оптических приборов является увеличение угла зрения рассматриваемых объектов. Данные приборы делятся на два класса: приборы для наблюдения близких объектов и приборы для наблюдения далёких объектов. Для каждого из этих классов немного по-разному определяется угловое увеличение.

Угловым увеличением  $\gamma$  приборов для наблюдения близких объектов называется отношение

$$\gamma = \frac{\alpha'}{\alpha}, \quad (9)$$

где  $\alpha'$  — угол зрения с использованием прибора (рис 11 б), а  $\alpha$  — угол зрения без прибора с расстояния наилучшего зрения  $d_0$  (рис 11 а).

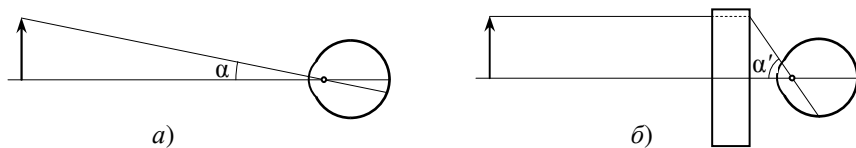


Рис. 11

Угловым увеличением  $\gamma$  приборов для наблюдения далёких объектов называется отношение

$$\gamma = \frac{\alpha'}{\alpha}, \quad (9')$$

где  $\alpha'$  — угол зрения с использованием прибора, а  $\alpha$  — угол зрения без прибора с того же расстояния (рис. 11 а, б).

### § 14.10. Лупа

Лупой называется короткофокусная собирающая линза, предназначенная для наблюдения близких объектов. Лупу располагают таким образом, чтобы рассматриваемый предмет находился в её фокальной плоскости. Тогда гомоцентрический пучок, испущенный каждой точкой предмета, по выходе из лупы превратится в параллельный, идущий под вполне опреде-

лѐнным углом по отношению к главной оптической оси системы (рис 12). Попадая в глаз, этот пучок расслабленным хрусталиком фокусируется на сетчатке. Таким образом, формирование изображения происходит по схеме: точка предмета — угол параллельного пучка — точка изображения. Как явствует из рис. 12, наибольший угол параллельного пучка и есть угол зрения  $\alpha'$  в (9). Он равен  $h/F$ . Угол же  $\alpha$ , согласно определению (9), равен  $h/d_0$ . Стало быть,

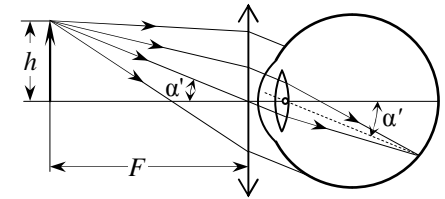


Рис. 12

$$\gamma = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{d_0}{F}. \quad (10)$$

**Замечание.** Выражение (10) даёт увеличение лупы при так называемом *профессиональном* её использовании, т. е. когда изображение рассматривается ненапряжённым глазом. При этом глаз не обязательно должен располагаться вплотную к линзе. Можно, однако, получить большее увеличение, если немного приблизить предмет к лупе и рассматривать его мнимое изображение с расстояния наилучшего зрения. Такое использование лупы называется *непрофессиональным*, поскольку глаз при этом (расположенный вплотную к лупе) максимально напряжён.

Лупы с  $\gamma > 40$  не применяются, ибо малое фокусное расстояние может быть только у линзы малого диаметра, что затрудняет её практическое использование.

## § 14.11. Микроскоп

Микроскоп в принципе представляет собой двухлинзовый прибор, предназначенный для наблюдения близких объектов. Обе линзы положи-

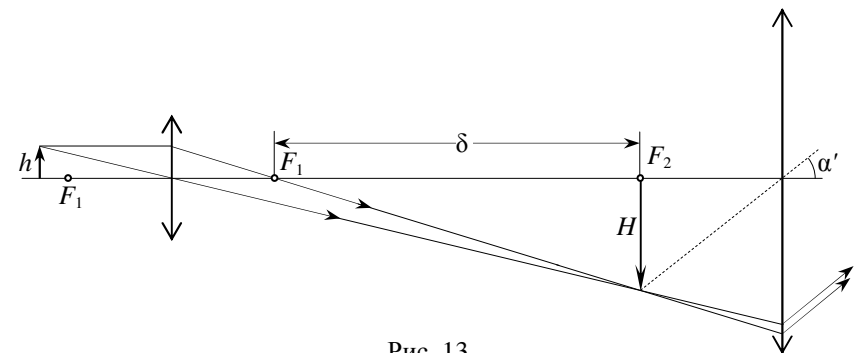


Рис. 13

тельные; передняя называется *объективом*, задняя — *окуляром*. Рассматриваемый объект располагается чуть дальше передней фокальной плоскости объектива, который даёт действительное увеличенное изображение объекта (рис. 13). Это изображение совмещается с передней фокальной плоскостью окуляра и рассматривается в него, как в лупу. Из рис. 13

$$\alpha' = \frac{H}{F_2},$$

где  $H$  — размер изображения, даваемого объективом, а  $F_2$  — фокусное расстояние окуляра. Из подобия треугольников рис. 13

$$\frac{H}{h} = \frac{\delta}{F_1},$$

где  $h$  — размер предмета,  $F_1$  — фокусное расстояние объектива, а  $\delta$  — расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра. Выражая из второго равенства  $H$  и подставляя в первое, получим

$$\alpha' = \frac{h\delta}{F_1 F_2}.$$

Поскольку угол  $\alpha$ , согласно определению (9), равен  $h/d_0$ ,

$$\gamma = \frac{\delta}{F_1} \cdot \frac{d_0}{F_2}. \quad (11)$$

Из этого выражения следует, что для получения значительного увеличения необходимо и в качестве объектива, и в качестве окуляра использовать короткофокусные линзы.

**Замечание.** Если предмет  $h$  чуть приблизить к объективу, изображение  $H$  немного приблизится к окуляру и расположится между ним и его фокальной плоскостью. В этом случае глаз, уже напрягаясь, будет рассматривать *мнимое изображение этого изображения*, даваемое окуляром, что позволит получить несколько большее увеличение прибора.

Максимально возможное увеличение микроскопа  $\gamma_{max} \sim 10^3$ . При больших  $\gamma$  начинает сказываться волновая структура света и законы геометрической оптики перестают выполняться.

## § 14.12. Телескопы

Телескоп является оптическим прибором, предназначенным для наблюдения удалённых объектов. Так же, как и микроскоп, он состоит из объектива и окуляра. Телескопы, использующие в качестве объектива по-

ложительную линзу, называются *рефракторами* или *зрительными трубами*. Телескопы с вогнутым зеркалом в качестве объектива называются *рефлекторами*.

**1. Труба Кеплера.** В трубе Кеплера, так же, как и в микроскопе, и объектив, и окуляр — положительные линзы. При наблюдении удалённого предмета объектив формирует его действительное изображение в своей задней фокальной плоскости. Это изображение (как и в микроскопе) рассматривается в окуляр, как в лупу. Если фокальные плоскости объек-

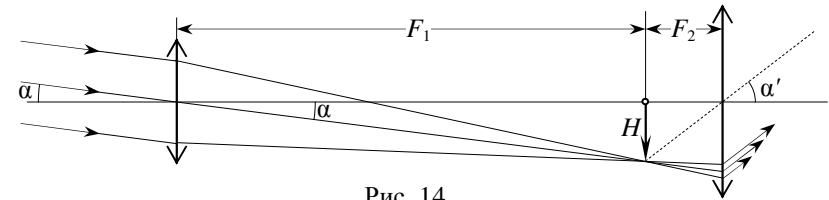


Рис. 14

тива и окуляра совпадают (рис. 14), то параллельный входящий пучок переходит в параллельный выходящий (такая система линз и, по аналогии, зеркал называется *телескопической*), но идущий, вообще говоря, под другим углом к главной оптической оси системы. В этом случае наблюдение ведётся ненапряжённым глазом и угловое увеличение телескопа легко находится из рис. 14 (где, в отличие от предыдущих случаев, представлен не только угол  $\alpha'$ , но, в соответствии с (9'), и  $\alpha$  — угол зрения предмета без прибора с того же расстояния):

$$\gamma = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{H/F_2}{H/F_1} = \frac{F_1}{F_2}. \quad (12)$$

Если немного уменьшить расстояние между линзами, то окуляр начнёт работать, как лупа при непрофессиональном использовании, что приведёт к некоторому возрастанию увеличения трубы (и напряжению глаза).

Из (12) видно, что  $\gamma$  растёт с увеличением  $F_1$  и уменьшением  $F_2$ . Поэтому в трубе Кеплера используется длиннофокусный объектив (в отличие от микроскопа) и короткофокусный окуляр.

**2. Труба Галилея.** В этом телескопе окуляр — не собирающая, а рассеивающая линза. Чтобы можно было вести наблюдение ненапряжённым

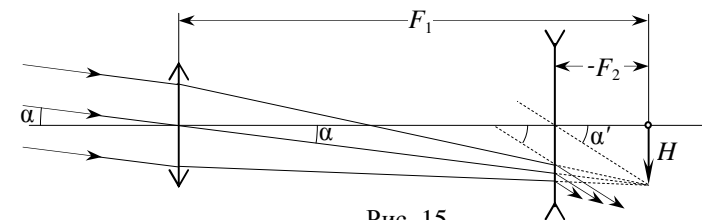


Рис. 15

глазом, линзы и здесь, очевидно, должны образовывать телескопическую систему. Но поскольку одна из линз рассеивающая, для этого необходимо, чтобы задний фокус объектива совпадал с задним же фокусом окуляра (рис. 15). Тогда сходящийся пучок, падающий на вторую линзу, станет параллельным, образуя вполне определённый угол с главной оптической осью. Для нахождения этого угла дополним наш пучок ещё одним (базовым) лучом, идущим через центр окуляра. Этот луч и даст, очевидно, направление преломлённого пучка. Из рис. 15

$$\gamma = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{H/|F_2|}{H/F_1} = \left| \frac{F_1}{F_2} \right|, \quad (13)$$

т. е. формула получается такой же (с точностью до знака), как и для трубы Кеплера. Поэтому здесь также для объектива используются длиннофокусные, а для окуляра — короткофокусные линзы.

Труба Галилея даёт прямое изображение объекта, а труба Кеплера — перевёрнутое. Стало быть, при использовании последней для земных наблюдений необходимо дополнить её *оборачивающей системой* (как это сделано, скажем, в призмённом полевом бинокле, где с помощью оборотных призм верхние лучи переводятся в нижние и наоборот). В более простых и дешёвых биноклях, например театральных, применяются трубы Галилея. Недостатком трубы Галилея по сравнению с трубой Кеплера является отсутствие промежуточного действительного изображения, с которым можно совместить измерительную шкалу, фотопластинку и т. п. По этой причине трубы Галилея в современной астрономии не применяются.

**3. Рефлекторы.** Рефлектор (Ньютона) представляет собой зеркальный аналог трубы Кеплера. Собирающее зеркало объектива даёт действительное изображение небесного тела в фокальной плоскости, и это изображение рассматривается с помощью окуляра-лупы. Для удобства наблюдения перед фокальной плоскостью объектива расположено поворотное плоское зеркало  $Z$ , которое перехватывает сходящийся отражённый пучок и отводит его в сторону (рис. 16). Увеличение рефлектора, очевидно, даётся формулой (12).

Одним из важных параметров любого телескопа помимо увеличения

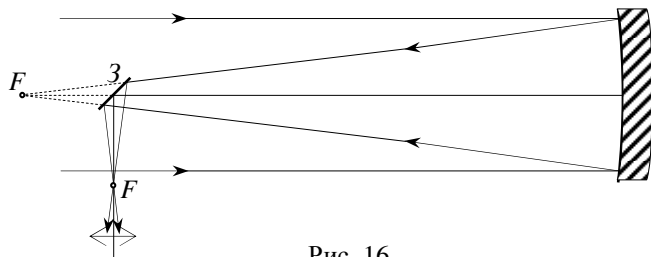


Рис. 16

является диаметр объектива. Он определяет количество световой энергии, перехваченной прибором, что оказывается решающим фактором при наблюдении слабо светящихся или очень удалённых небесных тел. Кроме того, с ростом диаметра объектива снижаются так называемые дифракционные искажения (вызванные волновой природой света) наблюдаемой картины. Максимальный диаметр объектива современного рефрактора чуть более 1 м, рефлектора — свыше 10 м<sup>1</sup>. Ограничения на размер объектива — технологические. Трудно изготовить большую линзу, удовлетворив всем требованиям к чистоте (отсутствие пузырьков, вкраплений и т. п.) и однородности стекла. Большое зеркало изготовить легче, но оно обладает значительно меньшей жёсткостью. Как следствие возникают существенные температурные деформации, прогибы под действием силы тяжести, вибрации за счёт тряски фундамента обсерватории и т. п.

Принципиальным недостатком рефрактора по сравнению с рефлектором является наличие *хроматической аберрации*. Такие аберрации возникают из-за того, что показатель преломления любого вещества зависит от длины волны падающего света (т. е. от его цвета). Стало быть, фокусное расстояние линзы зависит от длины падающей волны. Если на вход рефрактора поступает параллельный пучок, состоящий из волн разных длин, то в фокальной плоскости, относящейся к средней длине волны, получается не точка, а цветное пятнышко, и изображение объекта оказывается размытым. Впрочем, используя комбинации линз из различных сортов стекла, удаётся значительно уменьшить хроматические аберрации.

В общем, каждый из рассмотренных типов телескопов имеет свои преимущества и недостатки и оба типа используются в астрономии<sup>2</sup>.

### Контрольные вопросы и задания

1. Дать определение линзы, тонкой линзы. Что называют оптическим центром тонкой линзы, её главной и побочной оптическими осями?
2. Вывести формулу тонкой линзы. Сформулировать правило знаков.
3. Изобразить базовые лучи тонкой линзы. Сравнить их с базовыми

---

<sup>1</sup> Это относится к «мозаичному» зеркалу. Диаметр самого крупного в мире цельного зеркала несколько меньше, но всё равно превосходит 8 м.

<sup>2</sup> В отличие от микроскопа наблюдения с помощью телескопа производятся не в лабораторных условиях, а потому результаты этих наблюдений подвержены влиянию многих случайных или не зависящих от наблюдателя факторов (состояние атмосферы, воздушные потоки, вызванные неравномерностью распределения температуры, малая яркость рассматриваемых объектов, наличие светового фона, затрудняющего наблюдения и т. п.). В связи с этим угловое увеличение (предельное значение которого мы не приводим, хотя оно при благоприятных условиях без труда может быть доведено до величин, намного превышающих 10<sup>3</sup>) — далеко не единственный и отнюдь не главный параметр телескопа. Однако в связи с нехваткой времени останавливаться на этих параметрах не представляется возможным.

лучами сферического зеркала.

4. Получить формулу линейного увеличения тонкой линзы.
5. Показать, что формула линзы справедлива также и для точек, не лежащих на её главной оптической оси.
6. Описать устройство глаза как оптической системы.
7. Что такое расстояние наилучшего зрения, дальний и ближний пределы аккомодации? Чему они равны для нормального глаза?
8. Что называется углом зрения? От чего он зависит? Что такое разрешающая способность глаза? Чему она равна?
9. Чем различаются модели глаза Гельмгольца и Бейтса?
10. Что такое близорукость и дальнозоркость? С помощью каких очков исправляются эти дефекты?
11. Что называется угловым увеличением приборов, вооружающих глаз? Какие два их основных класса можно выделить?
12. Что такое лупа? Получить формулу её углового увеличения. Где на рисунке, изображающем ход лучей в лупе, представлен угол  $\alpha$  зрения предмета невооружённым глазом?
13. Изобразить оптическую схему микроскопа. Вывести формулу его увеличения. Какова величина  $\gamma_{max}$  микроскопа? Чем она ограничивается?
14. Как устроены зрительные трубы Кеплера и Галилея? Чем различаются устройства трубы Кеплера и микроскопа?
15. Вывести формулы увеличения труб Кеплера и Галилея, а также телескопа-рефлектора.
16. Описать преимущества и недостатки линзового и зеркального телескопов. Каков максимальный диаметр объектива современного рефрактора (рефлектора)?