

## ЛЕКЦИЯ . Элементы геометрической оптики

### 3.1. Понятие оптического изображения

Если пучок световых лучей, исходящий из какой-либо точки, в результате отражений, преломлений или изгибаний в неоднородной среде, сходится в точке  $P'$ , то точка  $P'$  называется *изображением* точки  $P$ .

Изображение называется *действительным*, если в точке световые лучи действительно пересекаются, и *мнимым*, если в точке  $P'$  пересекаются продолжения лучей, проведенные в направлении, обратном распространению света.

Если источник света поместить в точку  $P'$ , то изображение источника окажется в точке  $P$ . Поэтому эти две точки называются *взаимно сопряженными*.

Задача геометрической оптической теории заключается в определении положения изображения при любом заданном положении предмета. Эта задача выполняется геометрическими построениями, которые выполняются согласно определенным правилам, законам и ограничениям, упрощающим анализ. Перечислим основные из них:

- свет в однородных средах распространяется *прямолинейно* (то есть дифракцией пренебрегают);
- отдельные лучи распространяются *независимо друг от друга* (то есть явлением интерференции пренебрегают);
- выполняется закон *преломления*; *отражение* рассматривается как частный случай преломления обратно в первую среду;
- частичное отражение лучей при преломлении и частичное поглощение лучей при отражении не учитывается;
- расчет ведется только для лучей, падающих и отражающихся под столь малыми углами, что можно пользоваться приближенными соотношениями:  $\sin \alpha \approx \tg \alpha \approx \alpha$ .

Для понимания принципов построения оптических приборов требуется знание основных особенностей прохождения света через криволинейную (чаще всего сферическую) границу, разделяющую две поверхности с разными оптическими свойствами. Комбинируя несколько поверхностей, отражающих и преломляющих определенным образом световые лучи, создаются сложные оптические системы, предназначенные для выполнения различных практических задач.

### 3.2. Преломление на сферических поверхностях

Представим себе два луча, выходящих из точки  $P$  и падающих на сферическую границу раздела двух сред с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  – рис. 3.1.

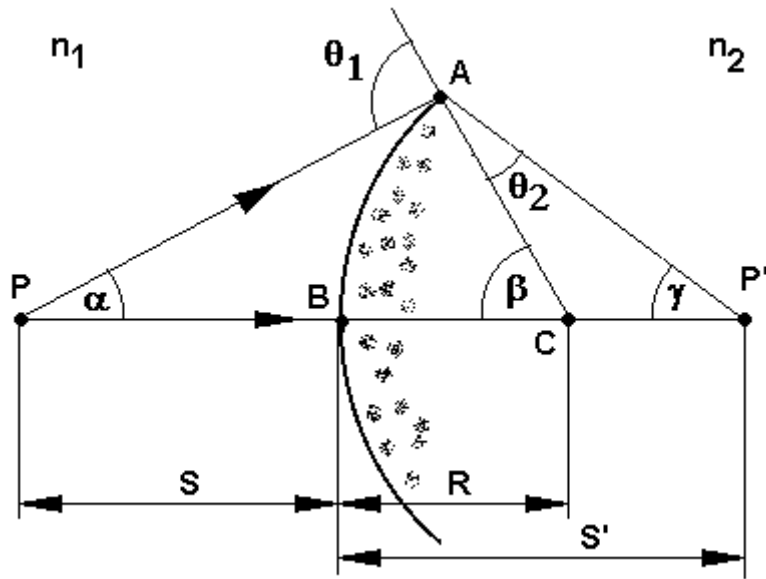


Рис. 3.1. Преломление на сферической поверхности.

Пусть точки **P** и **P'** лежат на прямой, проходящей через центр кривизны сферической границы раздела (точка **C**). Луч, идущий вдоль этого направления, падает на границу раздела в точке **B** *нормально* и, таким образом, после входа во вторую среду *не отклоняется от первоначального направления*. Вторым луч, выходящий из точки **P** под *малым* углом  $\alpha$ , входит во вторую среду в точке **A** под углом  $\Theta_1$  и, преломляясь под углом  $\Theta_2$ , проходит далее через точку **P'**. Условие малости угла состоит в том, что отрезки **РА** и **РВ** можно считать примерно равными.

В соответствии с законом преломления запишем:  $n_1 \Theta_1 = n_2 \Theta_2$ .

Из треугольника **РАС** имеем:  $\angle \Theta_1 = \alpha + \beta$ . Из треугольника **Р'АС** имеем:  $\angle \beta = \gamma + \Theta_2$ . Таким образом,

$$\angle \beta = \frac{n_1}{n_2} \theta_1 + \gamma = \frac{n_1}{n_2} (\alpha + \beta) + \gamma$$

Преобразуем это выражение:

$$n_1 \cdot \alpha + n_2 \cdot \gamma = (n_2 - n_1) \cdot \beta \quad (3.1)$$

Ввиду малости рассматриваемых углов  $\alpha$ ,  $\beta$ , и  $\gamma$  выразим их в следующем виде:

$$\alpha \approx \frac{1}{S} \quad \beta = \frac{1}{R} \quad \gamma \approx \frac{1}{S'}$$

Здесь  $l$  – длина дуги  $AB$  на рис. 1. В дальнейшем отрезки, откладываемые от точки  $B$  *вправо* (то есть вдоль распространения света), мы будем считать положительными, а *влево* – отрицательными.

Подставив эти выражения в (3.1), получим окончательное соотношение, связывающее между собой:

- расстояния от сферической преломляющей поверхности до точек расположения предмета и его изображения (на рис.1 -  $S$  и  $S'$  соответственно),
- преломляющие свойства среды слева и справа от сферической поверхности (на рис.1 -  $n_1$  и  $n_2$  соответственно);
- радиус кривизны преломляющей границы  $R$ .

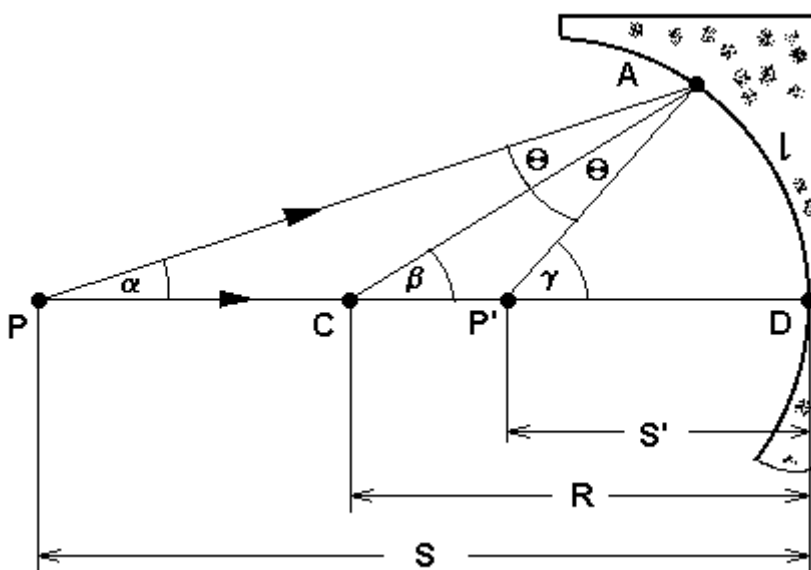
$$\frac{n_1}{S} - \frac{n_2}{S'} = \frac{n_2 - n_1}{R} = \Phi \quad (3.2)$$

Здесь  $\Phi$  носит название *оптической силы преломляющей поверхности*. В соответствие с (3.2) оптическая сила измеряется в *обратных единицах длины*. В системе СИ единица оптической силы – *1 диоптрия* ( $1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}$ ).

### 3. Отражение от зеркальных сферических поверхностей.

Сферические зеркала широко применяются в различных оптических устройствах. Рассмотрим особенности отражения света от сферической поверхности вогнутого зеркала, изображенного на рис. 3.2.

Пусть в точке  $P$  находится точечный источник света. Прямая  $PD$  проходит через центр кривизны сферического зеркала (точка  $C$ ) и носит название *оптической оси сферического зеркала*. Отрезок  $AC$  является радиусом кривизны  $R$  сферического зеркала.



### Рис. 3.2. Отражение от сферической поверхности

Рассмотрим два световых луча, выходящие из точки **P**. Первый луч движется вдоль линии **PD** и, отразившись в точке **D** от поверхности зеркала, движется вдоль этой же прямой в обратном направлении.

Второй луч выходит из точки под малым углом  $\alpha$  к прямой, падает на сферическую поверхность под углом  $\theta$  и отражается от нее под таким же углом  $\theta$ . Угол отсчитывается от радиуса, проведенного в точку падения **A**. Лучи, идущие под малыми углами к оптической оси, называются *параксиальными лучами* (или параксиальными пучками). Параксиальные световые пучки после отражения от поверхности сферического зеркала сходятся в одной точке, которая называется *фокусом* сферического зеркала. Таким образом, второй луч пересекает прямую **PD** в точке фокуса **P'**, где и будет находиться изображение точки **P**.

$$\text{Из } \triangle PAC: \quad \angle\beta = \alpha + \theta \quad \text{Из } \triangle PAP': \quad \angle\gamma = \alpha + 2\theta$$

Таким образом:

$$\alpha + \gamma = 2\beta \quad (3.3)$$

Предполагая луч 2 параксиальным, ввиду малости углов  $\alpha$  и  $\gamma$  можно записать:

$$\angle\alpha \approx \frac{l}{S} \quad \angle\gamma \approx \frac{l}{S'} \quad \angle\beta = \frac{l}{R}$$

где **l** – длина дуги **AD** (рис.3.2).

$$\text{Подставив в (3.3), получим:} \quad \frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{2l}{R}$$

Сократив левую и правую часть на **l**, запишем окончательное выражение, связывающее координату предмета и изображения (на рис.3.2 - **S** и **S'** соответственно), и радиус кривизны зеркала **R**:

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{2}{R} \quad (3.4)$$

Если предмет находится на бесконечно большом расстоянии от зеркала ( $S \rightarrow \infty$ ), что соответствует световому пучку, параллельному оптической оси, то координата изображения  $S' = R/2 = f$ . Это и есть точка фокуса, следовательно:

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f} \quad (3.5)$$

где **f** - фокусное расстояние сферического зеркала.

Если же, наоборот,  $S' \rightarrow \infty$ , то при этом расстояние от зеркала до предмета становится равным фокусному расстоянию **f**. Следовательно, *если*

**предмет помещен в точку фокуса сферического зеркала, то отраженный от зеркала световой пучок становится параллельным оптической оси.**

Величина, обратная фокусному расстоянию зеркала носит название **оптической силы** зеркала.

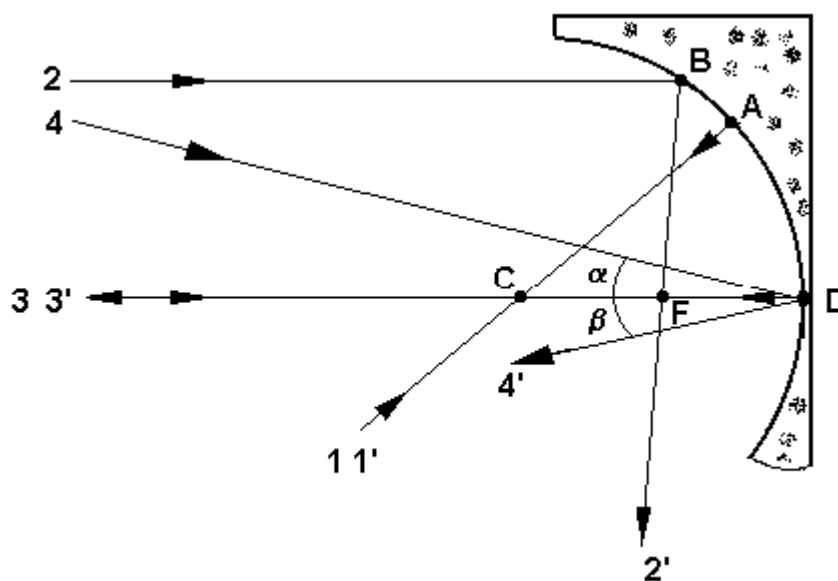
Для построения изображения протяженного объекта, даваемого сферическим зеркалом, следует построить изображения двух или нескольких крайних точек предмета. При этом для каждой точки рассматриваются лучи, поведение которых после отражения от зеркала заранее известно. Такие лучи называются **кардинальными** (рис.3.3).

Луч **1** проходит через центр кривизны зеркала – точку **С** и, таким образом, падает на поверхность зеркала нормально к ней. Отраженный луч **1'** совместится с падающим лучом.

Луч **2** проходит параллельно оптической оси зеркала. Отраженный луч **2'** проходит через точку фокуса зеркала **F**.

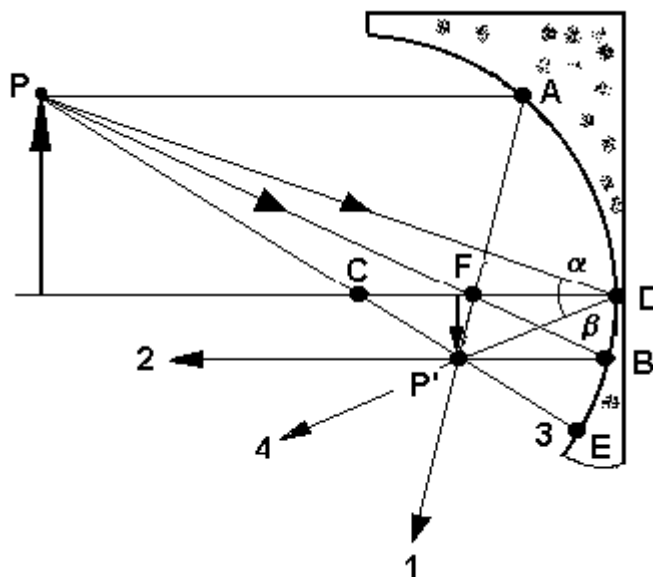
Луч **3** проходит вдоль оптической оси. Отраженный луч **3'** совмещен с падающим лучом **3**.

Луч **4** падает на поверхность зеркала в точку выхода оптической оси **D** под углом  $\alpha$  и отражается от нее под углом  $\beta = \alpha$  таким образом, что оптическая ось зеркала лежит в плоскости, образованной падающим лучом **4** и отраженным лучом **4'**.



**Рис 3.3.** Кардинальные лучи сферического зеркала.

Изображения, даваемые сферическими зеркалами, в отличие от изображений, получаемых с помощью плоских зеркал (которые всегда прямые и равные по размерам предмету), могут быть как прямыми, так и обращенными, увеличенными или уменьшенными. Примером является *уменьшенное обращенное* изображение предмета, построенное на рис. 3.4 с использованием кардинальных лучей 1, 2, 3 и 4.

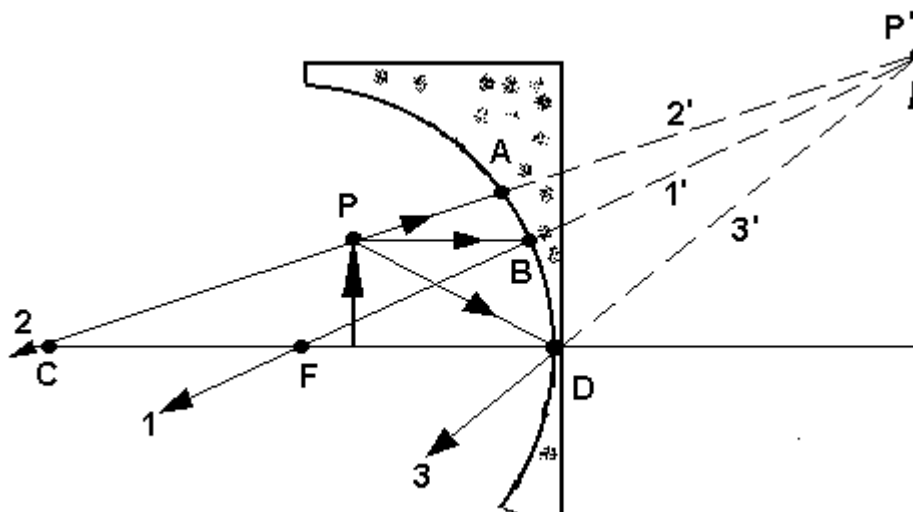


**Рис. 3.4.** Пример построение изображения в сферическом зеркале.

Видно, что все 4 луча пересекаются в одной точке  $P'$ . Из рис. 3.4 видно, что изображение построено с помощью лучей, действительно проходящих через ту область пространства, где находится изображение. Такое изображение называется *действительным*.

Действительное изображение можно спроектировать на экран. Изображение, построение которого осуществляется при использовании не световых лучей, а их продолжений, направленных в противоположную сторону по отношению к направлению распространения светового пучка, называется *мнимым* изображением.

Пример мнимого прямого увеличенного изображения, построенного в сферическом зеркале, приведен на рис. 3.5.



### Рис. 3.5. Пример мнимого изображения в сферическом зеркале.

Увеличением зеркала  $\beta$  называется отношение линейного размера изображения  $Y'$  и предмета  $Y$ .

$$\beta = Y' / Y = S' / S \quad (3.6)$$

Изображение, получаемое в плоском зеркале, всегда является мнимым. Мнимое изображение нельзя спроектировать на экран, так как световые лучи через него *фактически не проходят*.

#### 3.4. Соглашение о знаках.

При использовании выражения **2** для оптической силы преломляющей поверхности мы уже использовали определенные правила знаков для входящих в него величин. Эти правила носят общий характер и называются *соглашением о знаках*. Перечислим эти правила:

**1\***. Расстояние  $S$  вдоль оптической оси до предмета считается *положительным*, если предмет находится на той же стороне, что и падающий на зеркало свет. В противном случае расстояние  $S$  считается *отрицательным*.

**2\***. Расстояние  $S'$  до изображения считается *положительным*, если изображение находится на той же стороне, что и выходящий пучок света. В противном случае расстояние до изображения считается *отрицательным*, а само изображение – *мнимым*.

**3\***. Радиус  $R$  кривизны поверхности считается *положительным*, если центр кривизны находится на той же стороне, что и выходящий пучок света. В противном случае радиус кривизны считается *отрицательным*.

**4\***. Увеличение зеркала считается *положительным* для *прямого* изображения и *отрицательным* – для *обращенного* изображения.

**5\***. Знак фокусного расстояния  $F$  определяется знаками радиусов кривизны.

С последним из приведенных соглашений о знаках мы встретимся в следующем разделе, при рассмотрении темы, относящейся к построению изображений, даваемых в линзах.

#### 3.5. Линзы.

*Линзой называется кусок прозрачного материала, ограниченный сферическими поверхностями. При этом плоскость считается поверхностью с бесконечно большим радиусом кривизны.*

Кроме сферических, применяются цилиндрические линзы, а также линзы, ограниченные поверхностями более сложных форм.

*Зажигательные стекла*, то есть собирающие линзы, были известны древним грекам и римлянам. В Европе линзы были изобретены в 14 веке, и получили широкое распространение после распространения книгопечатания для коррекции зрения в *очках*.

Рассмотрим несколько определений, связанных с понятием линзы.

1). **Оптический центр линзы** - у каждой линзы есть точка, проходя через которую, луч не испытывает отклонения от первоначального направления.

2). **Оптическая ось** – любая прямая, проходящая через оптический центр линзы.

3). **Главная оптическая ось линзы** – оптическая ось, проходящая через центры кривизны поверхностей линзы и являющаяся осью симметрии.

4). **Главная плоскость линзы** – плоскость, проходящая через оптический центр линзы нормально к главной оптической оси.

Установим соотношения, связывающие между собой положение предмета и изображения (на рис. 6 -  $S_a$  и  $S_a'$  соответственно), а также кривизну поверхностей линзы ( $R_1$  и  $R_2$ ) и оптические свойства материала линзы и окружающей линзу среды ( $n$  и  $n_0$ ).

Пусть из источника света, расположенного в точке  $A$ , на расстоянии  $S_a$  от линзы, в сторону линзы распространяется параксиальный луч под углом  $\alpha$  к главной оптической оси.

После преломления на первой поверхности, радиус кривизны которой  $R_2$ , луч отклонится от первоначального направления и пересечет оптическую ось в точке  $B$ , находящейся от главной плоскости линзы на расстоянии  $S_b$ . Найдем оптическую силу передней преломляющей поверхности линзы в соответствии с соотношением (3.2).

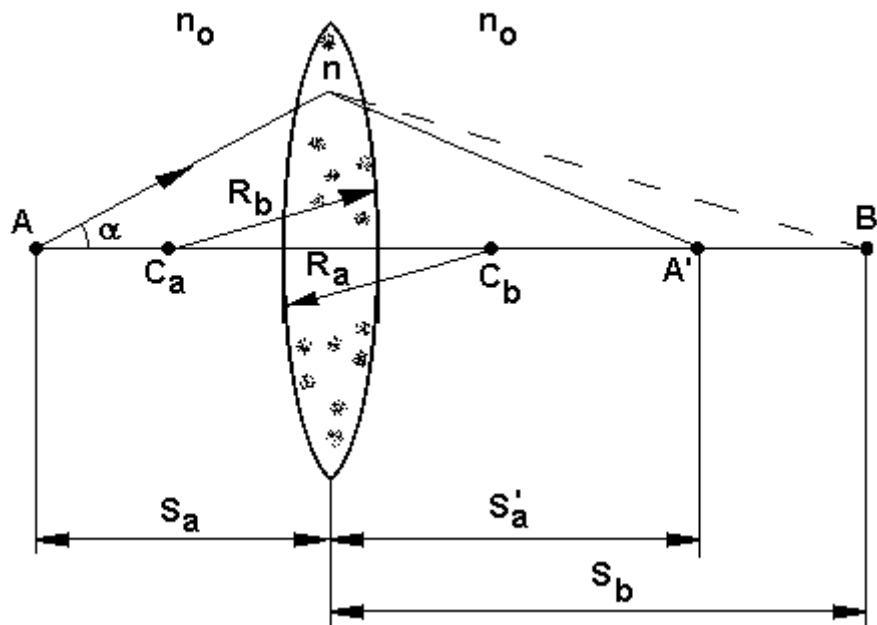


Рис. 3.6. К выводу формулы тонкой линзы

$$\Phi_1 = \frac{n_0}{S_a} - \frac{n}{S_b} = \frac{n_0 - n}{R_1}$$



Для второй преломляющей поверхности точка **В** является мнимым источником света. Найдем оптическую силу второй преломляющей поверхности.

$$\Phi_2 = \frac{n}{S_b} - \frac{n_o}{S_{a'}} = \frac{n - n_o}{R_2}$$

Складывая два последних выражения, исключим  $S_b$  и окончательно получим:

$$\Phi_{\text{линзы}} = \left( \frac{1}{S_{a'}} - \frac{1}{S_a} \right) = \left( \frac{n - n_o}{n_o} \right) \cdot \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3.7)$$

В соответствии с соглашением о знаках оптическая сила линзы – алгебраическая величина. Если она *положительна*, то линза также называется является *положительной*, или *собирающей*, после прохождения через нее лучи отклоняются к главной оптической оси. *Отрицательная* оптическая сила соответствует *отрицательной (рассеивающей)* линзе.

Величина, обратная оптической силе линзы, называется *фокусным расстоянием* линзы. Фокусное расстояние, таким образом, также является алгебраической величиной. Подставляя в формулу линзы знаки радиусов кривизны в соответствии с соглашением о знаках (рис. 3.7) дает знак фокусного расстояния в каждом из 4 рассмотренных основных случаев.

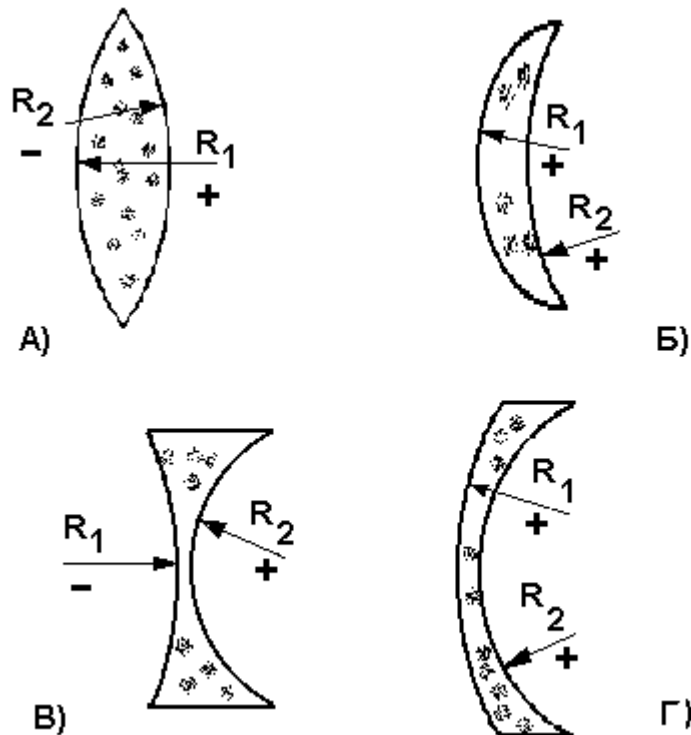


Рис. 3.7. Определение знака фокусного расстояния линзы.

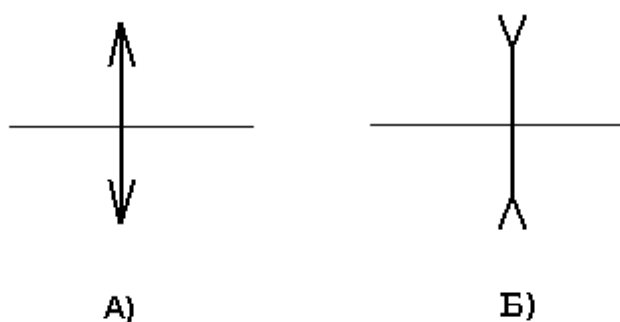
**А). Двояковыпуклая линза.** Фокусное расстояние положительно при любых радиусах кривизны  $R_1$  и  $R_2$ .

**Б). Выпукло-вогнутая линза.** Так как  $R_1 > R_2$ , фокусное расстояние положительно.

**В). Вогнуто-выпуклая линза.**  $R_1 < R_2$ , фокусное расстояние отрицательно.

**Г). Двояковогнутая линза.** Фокусное расстояние отрицательно при любых радиусах кривизны  $R_1$  и  $R_2$ .

На оптических схемах собирающие и рассеивающие линзы изображаются в соответствии с рис. 3.8.

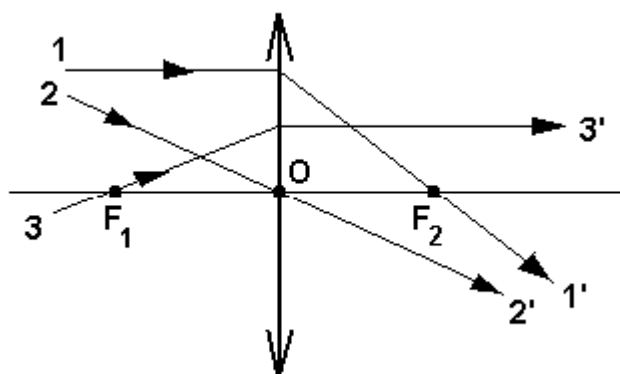


**Рис. 3.8.** Условные изображения линз.

А). Собирающая (положительная) линза;

Б). Рассеивающая (отрицательная) линза.

Для построения изображений в линзах необходимо так же, как и в случае сферического зеркала, использовать понятие *кардинальных лучей*, то есть лучей, ход которых после прохождения через линзу заранее известен. (рис. 3.9 и 3.10). На рис. 3.9 показаны кардинальные лучи собирающей линзы.



**Рис. 3.9.** Кардинальные лучи собирающей линзы.

Луч **1**, идущий параллельно главной оптической оси, после выхода из собирающей линзы пересекает ось в точке расположения фокуса  $F_2$ .

Луч **2**, проходящий через оптический центр, после выхода из собирающей линзы не изменяет своего первоначального направления.

Луч 3, проходящий через точку фокуса  $F_1$ , после выхода из собирающей линзы движется параллельно главной оптической оси.

Кардинальные лучи рассеивающей линзы приведены на рис. 3.10.

Луч 1, идущий параллельно главной оптической оси, после выхода из рассеивающей линзы отклоняется от главной оптической оси таким образом, что прямая, являющаяся продолжением выходящего луча, проведенным в противоположную сторону, пересекает главную оптическую ось в точке расположения фокуса  $F_1$ .

Луч 2, проходящий через оптический центр, после выхода из рассеивающей линзы не изменяет своего первоначального направления.

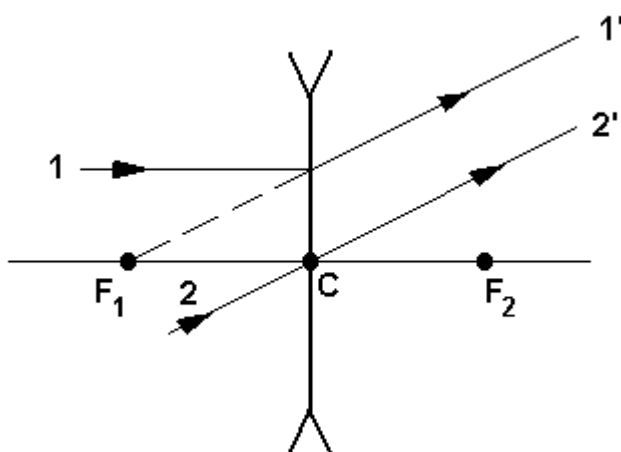


Рис. 3.10. Кардинальные лучи рассеивающей линзы.

*Линейным увеличением линзы* (или *поперечным увеличением*) называется отношение размеров изображения, получаемого в линзе, и предмета.

$$\beta = Y' / Y$$

Линейное увеличение линзы – алгебраическая величина. Увеличение *положительно*, если изображение прямое, и *отрицательно*, если изображение обращенное.

Угловым увеличением линзы называется отношение тангенсов углов, которые составляют с главной оптической осью линзы сопряженные лучи, идущие от изображения и от предмета к линзе (рис. 3.11).

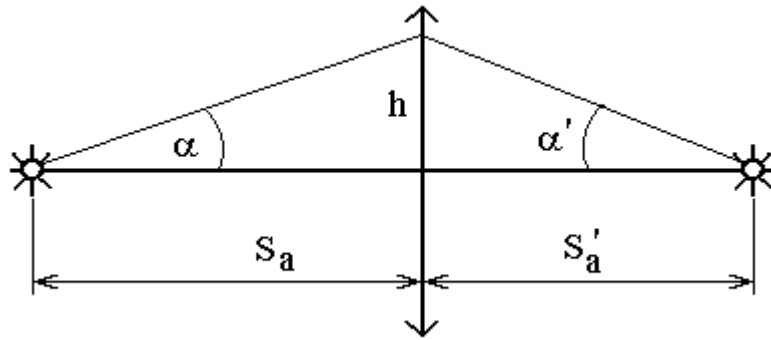


Рис. 3.11. К понятию углового увеличения линзы

$$K = \frac{\operatorname{tg} \alpha'}{\operatorname{tg} \alpha}$$

Геометрическое рассмотрение позволяет получить соотношение между линейным и угловым увеличениями линзы:

$$K = 1 / \beta$$

Чем дальше от линзы получается изображение, тем больше его линейные размеры и меньше угловые размеры.

### 3.6. Центрированные оптические системы.

*Оптическая система представляет собой совокупность преломляющих и отражающих поверхностей, отделяющих друг от друга оптически однородные среды.*

Чаще всего эти поверхности бывают сферическими или плоскими. Это вызвано тем, что такие формы проще всего в изготовлении.

*Если оси симметрии всех отражающих и преломляющих поверхностей оптической системы совпадают, то такая оптическая система называется центрированной. Общую ось симметрии в этом случае называют оптической осью системы.*

В зависимости от вида оптической системы выходящий из нее световой пучок будет или сходящимся, или расходящимся, или параллельным.

Если на пути пучка света, идущего параллельно оптической оси системы, поставить какой-либо *предмет*, то на выходе из оптической системы будет получено *изображение* этого предмета.

Пространство *слева от оптической системы* называется *пространством предметов*, а *справа от оптической системы* – *пространством изображений*.

Линейное и угловое увеличение оптических систем определяется так же, как и для тонкой линзы.

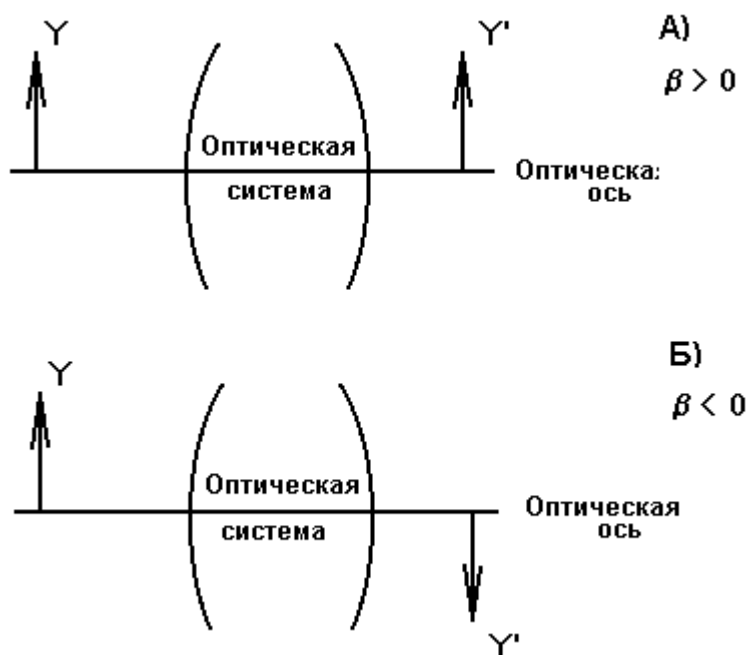


Рис. 3.12. Линейное увеличение  $\beta$  оптических систем.

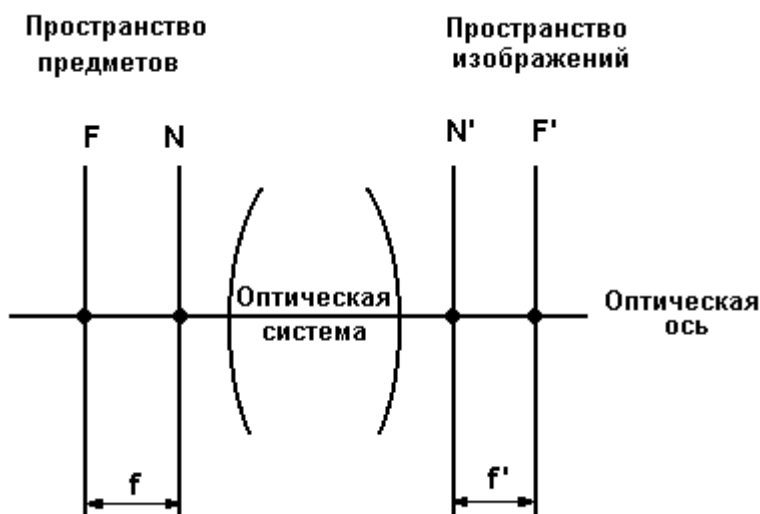
Линейное увеличение оптической системы – алгебраическая величина. Если изображение, даваемое системой, *прямое*, то линейное увеличение считается *положительным*, если изображение *обращенное* – *отрицательным*.

В пространстве предметов есть такая точка на оптической оси, что пучок света, выходящий из нее, после прохождения через оптическую систему становится параллельным оптической оси системы. Эта точка называется *передним*, или *первым фокусом оптической системы*. Плоскость, проходящая через точку переднего фокуса нормально к оптической оси системы, называется *передней фокальной плоскостью*.

В пространстве изображений есть такая точка на оптической оси, что пучок света, выходящий из нее, после прохождения через оптическую систему становится параллельным оптической оси системы. Эта точка называется *задним*, или *вторым фокусом оптической системы*. Плоскость  $F'$ , проходящая через точку заднего фокуса нормально к оптической оси системы, называется *задней фокальной плоскостью*.

Существуют две плоскости  $N$  и  $N'$  – одна в пространстве предметов, другая в пространстве изображений – которые отображают друг друга с увеличением  $K = 1$ . Эти плоскости называются *главными плоскостями оптической системы*. Предмет, поставленный в одну из таких плоскостей, будет иметь изображение, равное ему по величине.

Фокусное расстояние – алгебраическая величина. Оно положительно, если данный фокус лежит справа от главной плоскости, и отрицательно – если фокус лежит слева от главной плоскости.



**Рис. 3.13.** Основные элементы оптической системы:

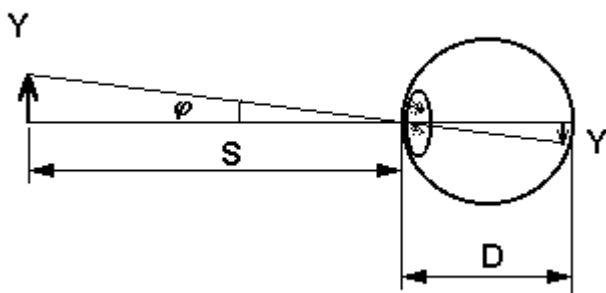
**F** и **F'** - передняя и задняя фокальные плоскости;  
**N** и **N'** - передняя и задняя главные плоскости;  
**f** и **f'** - переднее и заднее фокусные расстояния

### 3.7. Оптические приборы.

Размер изображения предмета, получаемого на сетчатке глаза, зависит от угла, под которым мы рассматриваем предмет. В соответствии с рис. 3.14:

$$\frac{Y'}{D} = \frac{Y}{S} = \operatorname{tg} \varphi \quad \text{откуда} \quad Y' \approx \operatorname{tg} \varphi \quad (3.8)$$

где **D** примерно соответствует размеру глазного яблока.



**Рис. 3.14.** К понятию углового увеличения предмета.

Назначением оптических приборов, рассматриваемых в этом разделе, является получение на сетчатке глаза изображения, большего по угловому размеру, чем видимый угловой размер предмета. Степень углового увеличения прибора, которым мы вооружаем глаз, определяется соотношением:

$$K = \operatorname{tg} \varphi' / \operatorname{tg} \varphi \quad (3.9)$$

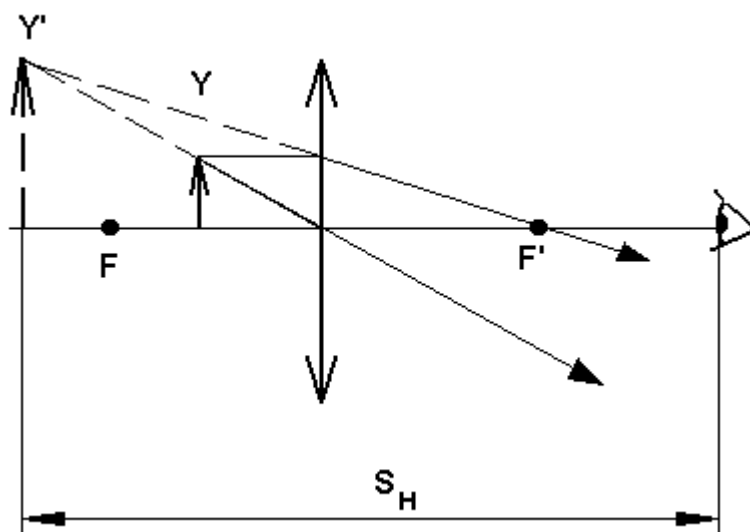
где  $\varphi$  и  $\varphi'$  - углы, под которыми мы видим предмет соответственно невооруженным глазом и с применением прибора.

Угол  $\varphi$  растет с уменьшением расстояния от глаза до предмета. Однако минимальное расстояние до предмета  $S$  ограничено возможностями аккомодации зрительного аппарата и составляет  $\approx 20 - 25$  см для нормального зрения. Дальнейшее увеличение угла зрения возможно только с применением оптических приборов.

#### А). Лупа.

Лупа представляет собой положительную линзу с небольшим фокусным расстоянием.

Рассматриваемый предмет ставится на небольшом расстоянии от переднего фокуса. При этом лупа дает *мнимое увеличенное прямое изображение*, которое и рассматривается глазом на расстоянии наилучшего зрения  $S'$ . Глаз практически всегда располагается при этом в точке заднего фокуса.



**Рис. 3.15.** Ход лучей в лупе.

Угловое увеличение лупы может быть определено по формуле:

$$K = S_n / f = 25 / f \quad (3.10)$$

Таким образом, лупа с фокусным расстоянием 5 см дает пятикратное увеличение.

Чем меньше фокусное расстояние лупы, тем больше ее увеличение. Однако уменьшение фокусного расстояния вызывает соответствующее уменьшение радиусов кривизны, а, следовательно, диаметра лупы. Поэтому практически с помощью лупы невозможно получить увеличение более чем в 25 – 40 раз.

### Б). Микроскоп.

Для получения увеличений, существенно превосходящих возможности лупы (~ до 2000), применяются микроскопы.

Микроскоп (рис. 3.16) представляет собой оптическую систему, состоящую из объектива с фокусным расстоянием  $f_1$  и окуляра с фокусным расстоянием  $f_2$ , расстояние  $L$  между которыми можно варьировать, изменяя длину тубуса (трубы) микроскопа.

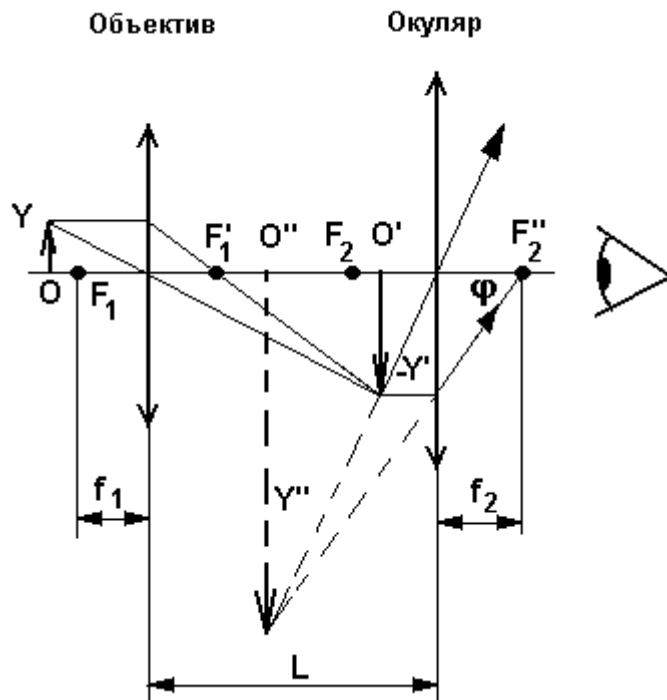


Рис. 3.16. Ход лучей в микроскопе.

Рассматриваемый предмет с линейным размером  $Y$  помещают в точку  $O$ , на расстояние, немного превышающее фокусное расстояние объектива  $f_1$ . С помощью объектива в точке  $O'$  получают действительное обращенное изображение предмета  $Y'$ , увеличенное в  $L / f_1$  раз. Это изображение



рассматривается в окуляре, представляющий собой лупу. Окуляр дает мнимое прямое увеличенное изображение  $Y''$ , расположенное в точке  $O''$ .

Общее угловое увеличение микроскопа:

$$K = \frac{L}{f_1} \cdot \frac{25}{f_2} \quad (3.11)$$

При достаточно большом отношении  $L / f_1$  можно получить общее увеличение порядка 1500 – 2000. Фактический предел увеличения микроскопа ограничен волновыми свойствами света.

### В). Зрительная труба (телескоп)

Телескоп предназначен для рассматривания удаленных предметов, когда предмет невозможно поставить на расстояние, соизмеримое с фокусным расстоянием объектива. Он состоит из длиннофокусного объектива и короткофокусного окуляра, которые устанавливаются на таком расстоянии друг от друга, что задний фокус объектива совпадает с передним фокусом окуляра. Ход лучей в телескопе показан на рис. 3.17.

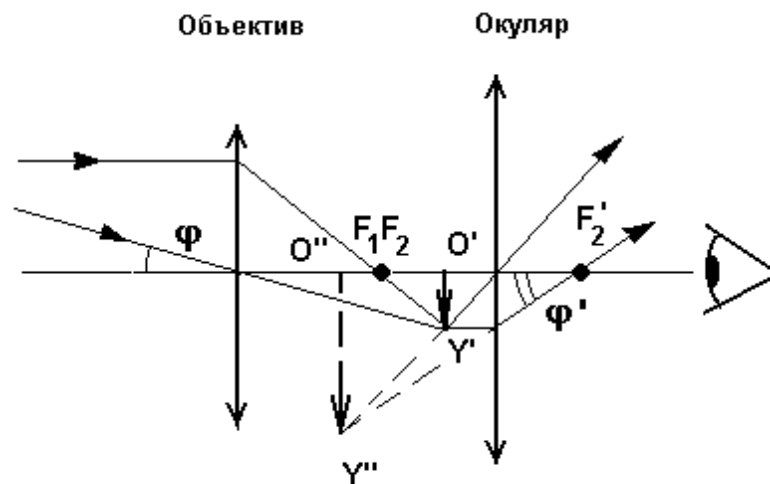


Рис. 3.17. Ход лучей в телескопе.

Лучи от удаленного предмета пересекают оптическую ось под углом  $\varphi$  и дают действительное обращенное изображение  $Y'$ . Объектив, таким образом, превращает удаленный предмет в близкое изображение, которое затем рассматривается в окуляре, как в лупу, под углом  $\varphi'$ .

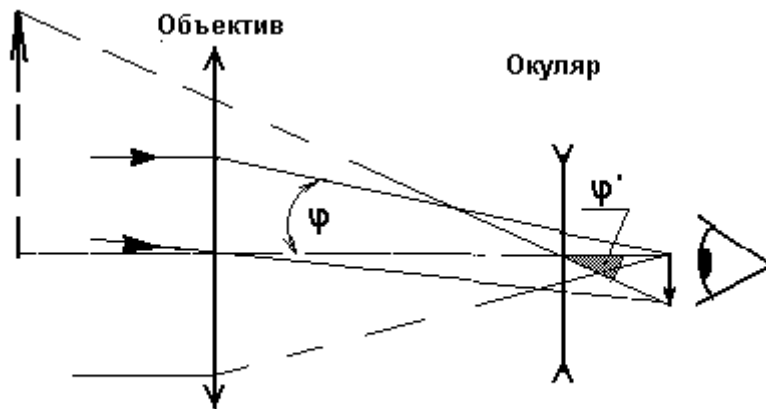
Общее угловое увеличение телескопа равно:

$$K = \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \varphi} \approx \frac{Y' / f_2}{Y' / f_1} = \frac{f_1}{f_2} \quad (3.12)$$

Здесь  $f_1$  и  $f_2$  - соответственно фокусное расстояние объектива и окуляра.

Таким образом, для получения больших увеличений в телескопе необходимо, чтобы фокусное расстояние объектива намного превосходило фокусное расстояние окуляра. Это, соответственно, приводит к увеличению общей длины телескопа. Длина современных астрономических линзовых телескопов (их называют телескопы – рефракторы) достигает 10 метров. Известны конструкции телескопов и большей длины.

Рассмотренная схема телескопа носит название *схемы Кеплера*. Телескоп Кеплера дает *обращенное* изображение предмета. При наблюдении небесных тел это не имеет значения. Для наземных применений (а раньше всего зрительные трубы стали применять для навигации на море) используется другая схема, называемая *схемой Галилея*. Зрительная труба Галилея (рис. 3.18) дает *прямое* изображение предмета.



**Рис. 3.18.** Зрительная труба Галилея

В зрительной трубе Галилея окуляром является рассеивающая линза, поставленная таким образом, что задний фокус объектива совпадает с передним фокусом окуляра.

Угловое увеличение трубы Галилея вычисляется аналогично (3.12):

$$K = \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{f_1}{f_2} \quad (3.13)$$

Увеличение трубы Галилея меньше, чем у трубы Кеплера, при одинаковой длине. Поэтому корпус подзорной трубы делался складным, в виде системыдвигающихся друг в друга цилиндров.

Современные полевые и морские бинокли, имея значительно меньшие габариты, дают увеличение, намного превосходящее увеличение трубы Галилея. Поэтому сейчас схема Галилея широко применяется только в театральном бинокле.

## **8. Искажения (абберации) оптических систем**

В реальных оптических системах не выполняются условия, сформулированные нами в начале этой темы. Так, на практике наибольший интерес представляют не параксиальные, а широкие пучки света. Показатель преломления реальных оптических материалов зависит от длины волны света. Вследствие этого в оптических системах неизбежно возникают различные искажения изображений, называемые *абберациями*. Рассмотрим некоторые из них.

### **А). Сферическая абберация.**

Параксиальные лучи отклоняются линзами в меньшей степени, чем лучи, более отстоящие от оптической оси. Поэтому точка фокуса для параксиальных лучей находится ближе к главной плоскости линзы, чем точка фокуса для более удаленных от оптической оси лучей. Другими словами, фокусное расстояние любой линзы для параксиальных лучей и лучей, не являющихся параксиальными, различаются. Изображение предмета получается в таком случае размытым. Это связано со сферической формой ограничивающих линзу поверхностей, и данный дефект носит название *сферической абберации* (абберация = искажение) линзы. Для уменьшения сферической абберации необходимо ограничить световой пучок, проходящий через линзу, оставив только параксиальную часть. Это достигается *диафрагмированием* пучка. Напр., диафрагмирование объектива фотоаппарата позволяет получить большую глубину резкости изображения на фотопленке. Правда, при этом уменьшается световой поток, падающий на пленку, что требует соответственного увеличения времени экспозиции (выдержки).

В более ответственных случаях сферическую абберацию уменьшают, применяя вместо отдельных линз более сложные оптические системы, состоящие из комбинаций положительных и отрицательных линз.

### **Б). Хроматическая абберация.**

Показатель преломления прозрачных материалов зависит от длины световой волны. Поэтому лучи разных длин волн будут преломляться по-разному, т. е. линза разлагает естественный свет на монохроматические составляющие, подобно призме. Фокусные расстояния для световых лучей разных длин волн будут различными. Изображение предмета при этом

окрашивается цветной каймой. Это явление носит название *хроматической аберрации* линзы. Для ее уменьшения необходимо вместо одиночных линз применять более сложные оптические системы, комбинируя прозрачные материалы с нормальной и аномальной дисперсией. При этом можно добиться, чтобы на выходе такой системы лучи всех длин волн сходились в одной точке фокуса. Объективы современных высококачественных фотоаппаратов содержат 7 – 8 линз (в ряде случаев и более).

### Кома

Светящаяся точка, расположенная не на оптической оси системы, дает изображение в виде пятнышка с хвостиком, похожего на комету. Отсюда произошло название этой аберрации. Устранение комы производится теми же методами, что и сферической аберрации.

### Дисторсия

При больших углах падения лучей нарушается геометрическое подобие между предметом и изображением из-за того, что увеличение отдельных деталей предмета, находящихся на разных расстояниях от оптической оси, различно. Это явление называется дисторсией. Наиболее отчетливо дисторсия проявляется при рассмотрении через линзу прямоугольной сетки (рис. 3.19).

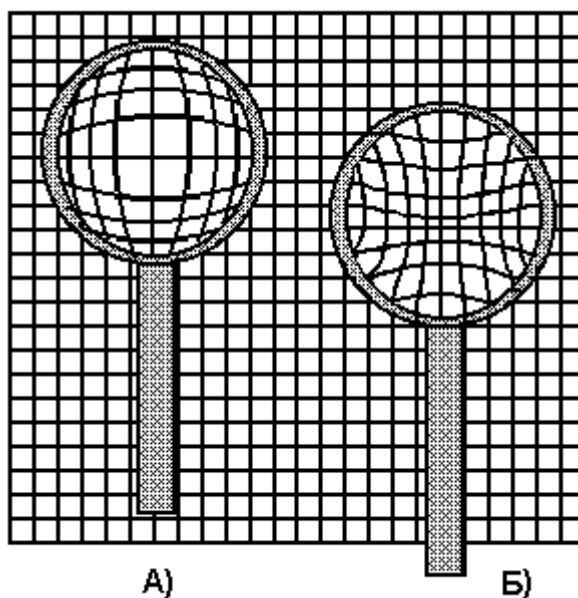


Рис. 3.19. Виды дисторсии.

А). Бочкообразная

Б). Подушкообразная

Исправление дисторсии производится подбором составных элементов оптической системы.

## Литература

- Зисман Г.А., Тодес О.М.. Курс общей физики. Киев: Дніпро, 1994. т.3.Гл.3.  
Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 1997. Гл. 21.  
Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. Гл.12 –14.

### Вопросы и задания для самопроверки

1. Дайте определение линзы. Что называется фокусным расстоянием линзы? оптической силой линзы?
2. Выведите формулу тонкой линзы.
3. Возможно ли изображенное на рис. 3.20 расположение кардинальных точек центрированной оптической системы, находящейся в воздухе?



Рис. 3.20

4. Укажите знак оптической силы  $\Phi$  системы, изображенной на рис. 3.21, и сравните показатели преломления справа и слева от нее.

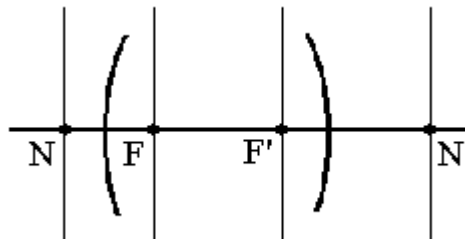


Рис. 3.21

5. Докажите, что отношение высоты изображения, даваемого сферическим зеркалом, к высоте предмета равно отношению расстояний от них до зеркала.
6. Звезды на ночном небе даже в сильный телескоп видны как светящиеся точки. Для чего же нужен телескоп? что он увеличивает?
7. Докажите, что для сложных оптических систем, как и для тонких линз, линейное увеличение  $\beta$  и угловое увеличение  $K$  связаны соотношением  $\beta=1/K$ .
8. Охарактеризуйте основные виды aberrаций оптических систем.