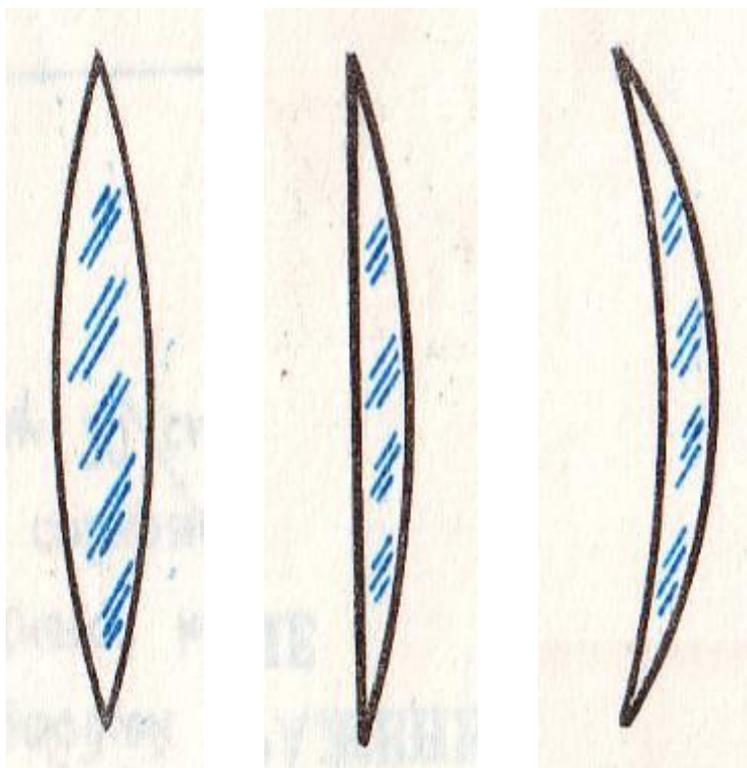


Линзой называют прозрачное тело, ограниченное с двух сторон сферическими поверхностями, либо одной сферической и одной плоской поверхностями.

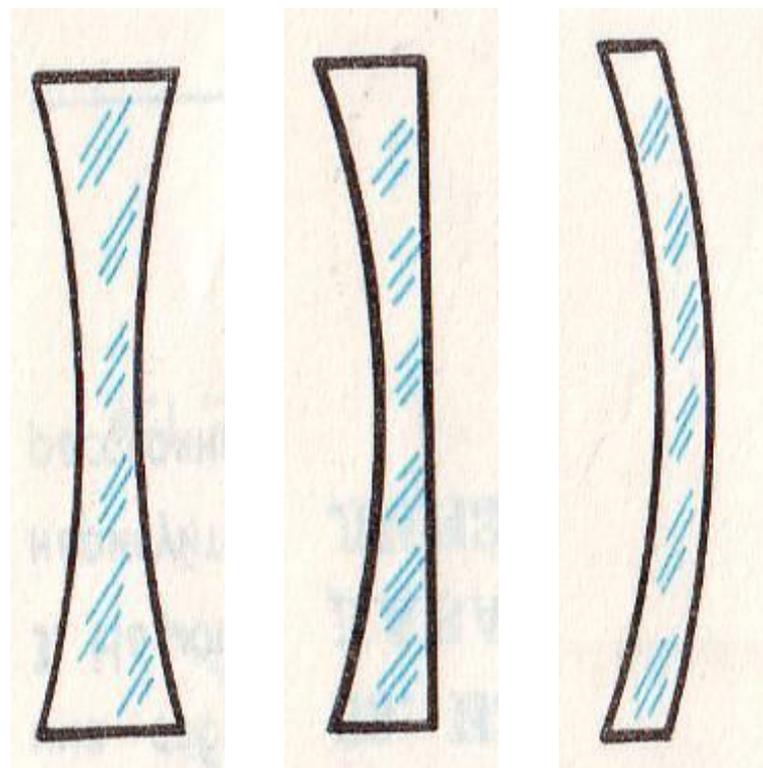
Выпуклые – линзы, у которых края намного тоньше, чем середина.

Вогнутые – линзы, у которых края толще, чем середина

## Собирающие

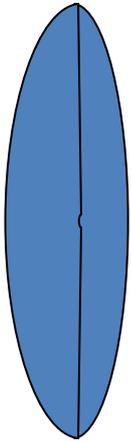


## Рассеивающие



# Собирающие линзы

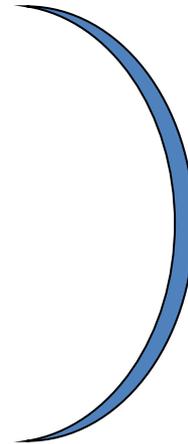
линзы, преобразующие параллельный пучок световых лучей в сходящийся:



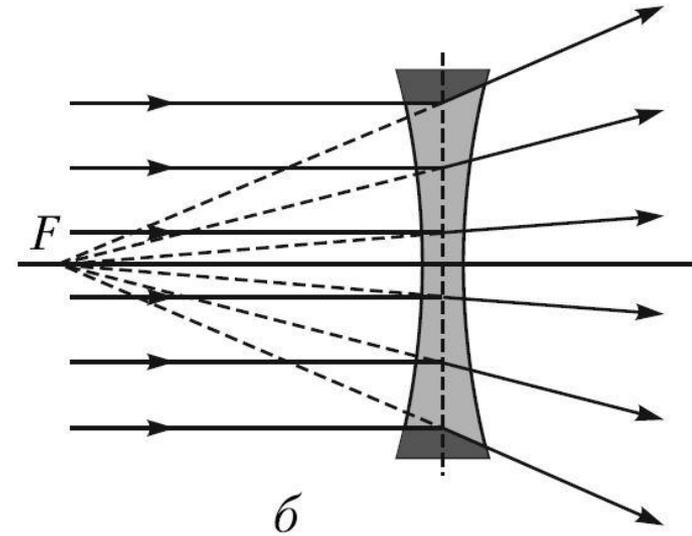
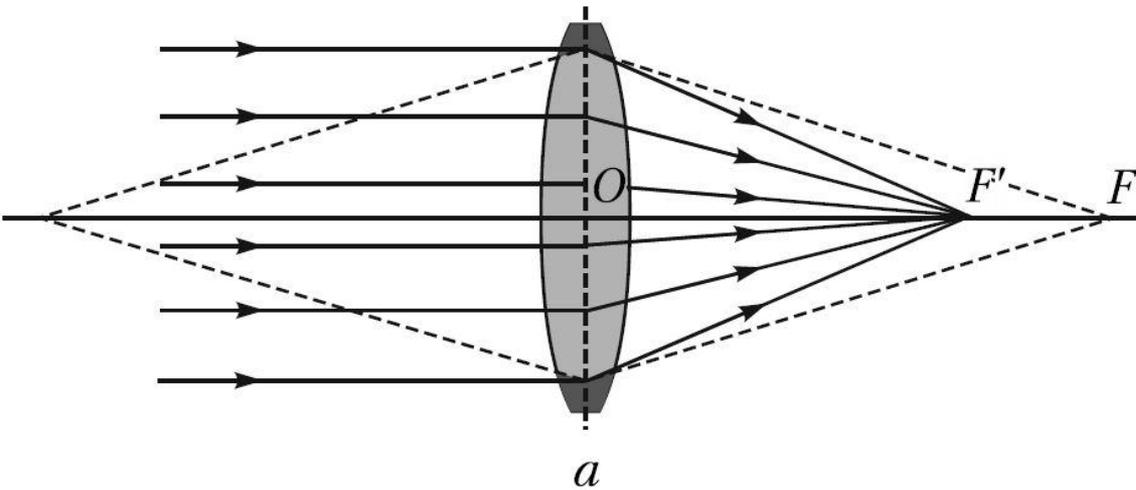
**двояковыпуклые**



**плоско-выпуклые**



**выпукло-вогнутые**

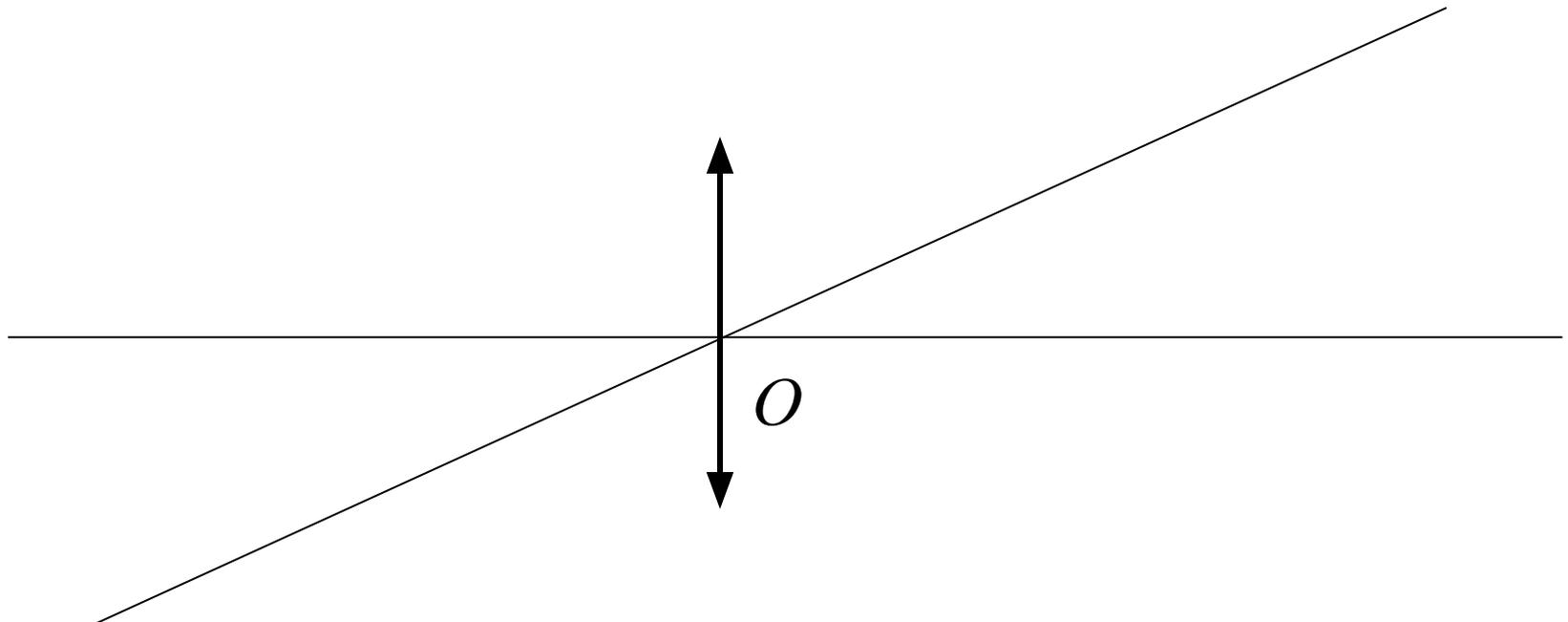


**Действие линз:**

*a* — собирающих; *б* — рассеивающих

Параксиальные (приосевые) лучи идут под малыми углами к оптической оси и образуют на всех преломляющих и отражающих поверхностях малые углы падения, отражения и преломления

# Основные элементы линзы



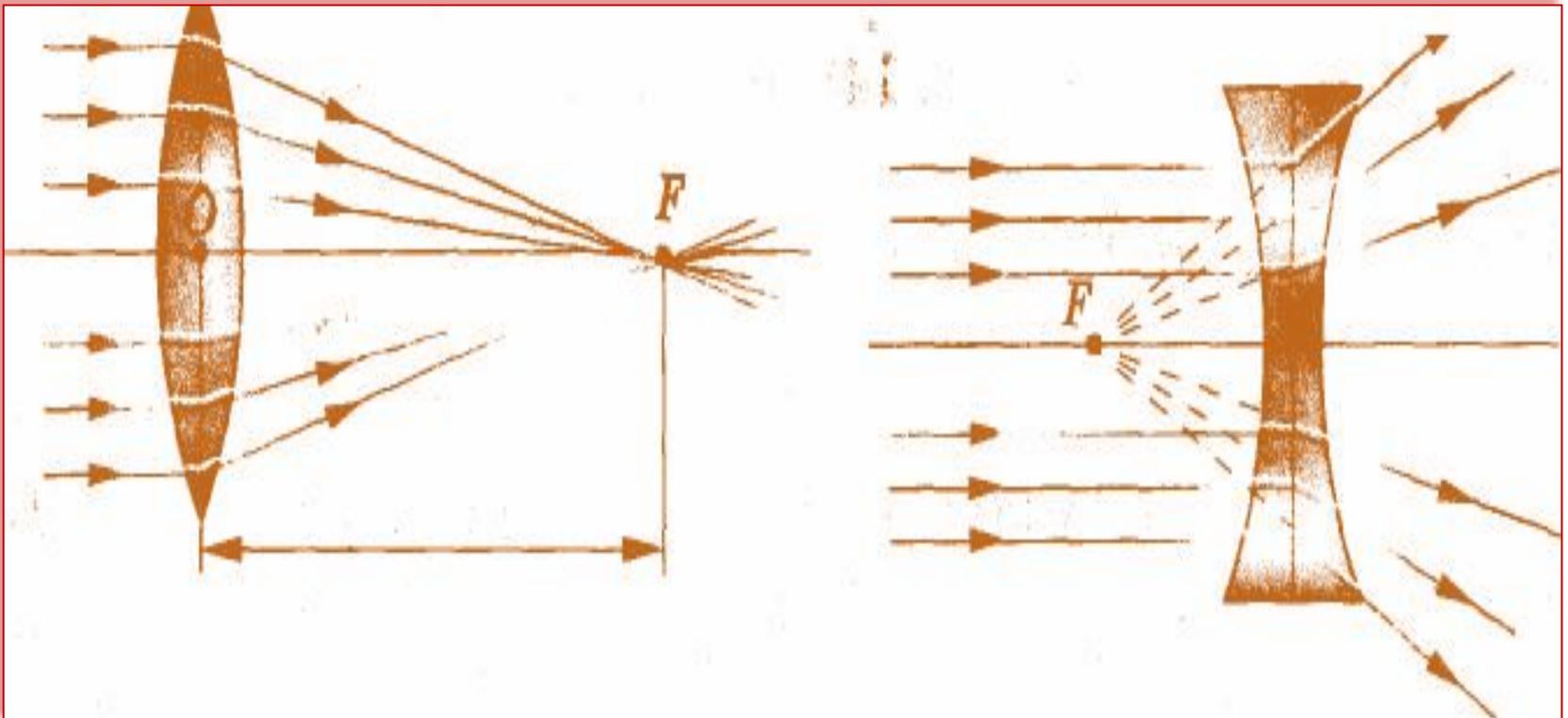
ГЛАВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ОСЬ – прямая, проходящая через центры сферических поверхностей, ограничивающих линзу.

ОПТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР – пересечение главной оптической оси с линзой, обозначается точкой  $O$ .

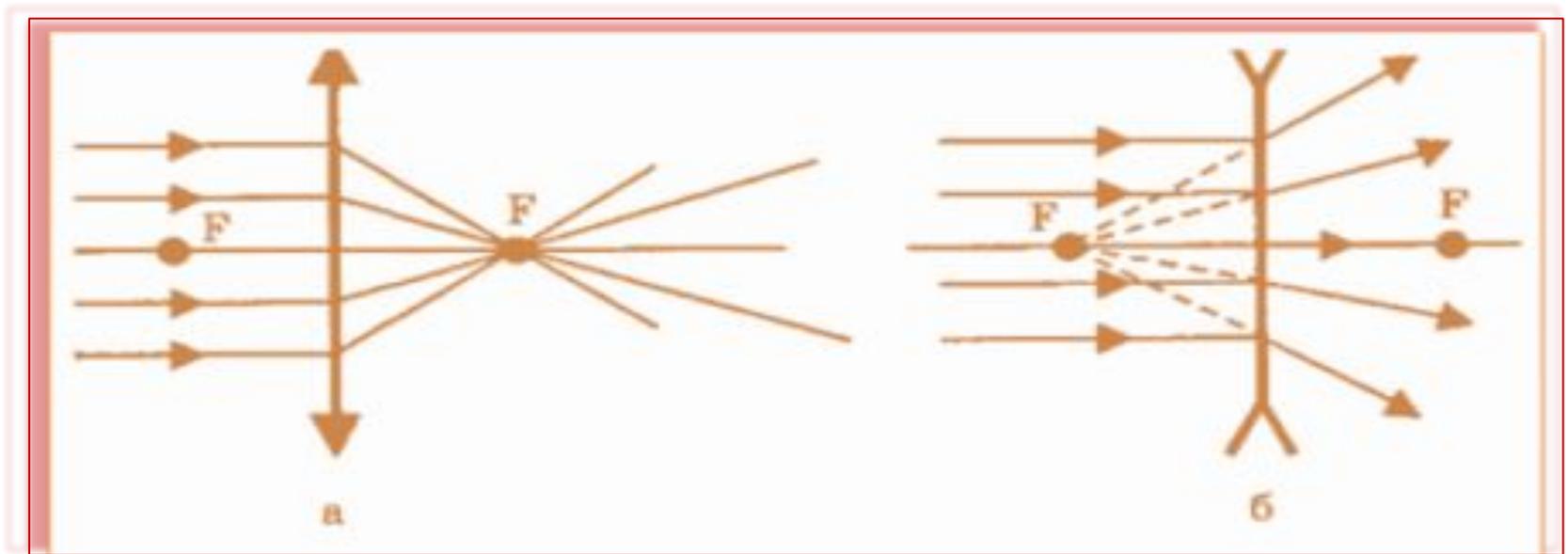
Побочная оптическая ось – любая прямая, проходящая через оптический центр.

# Фокус линзы

Если на собирающую линзу падает пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то после преломления в линзе они собираются в одной точке  $F$ , которая называется **главным фокусом линзы**.

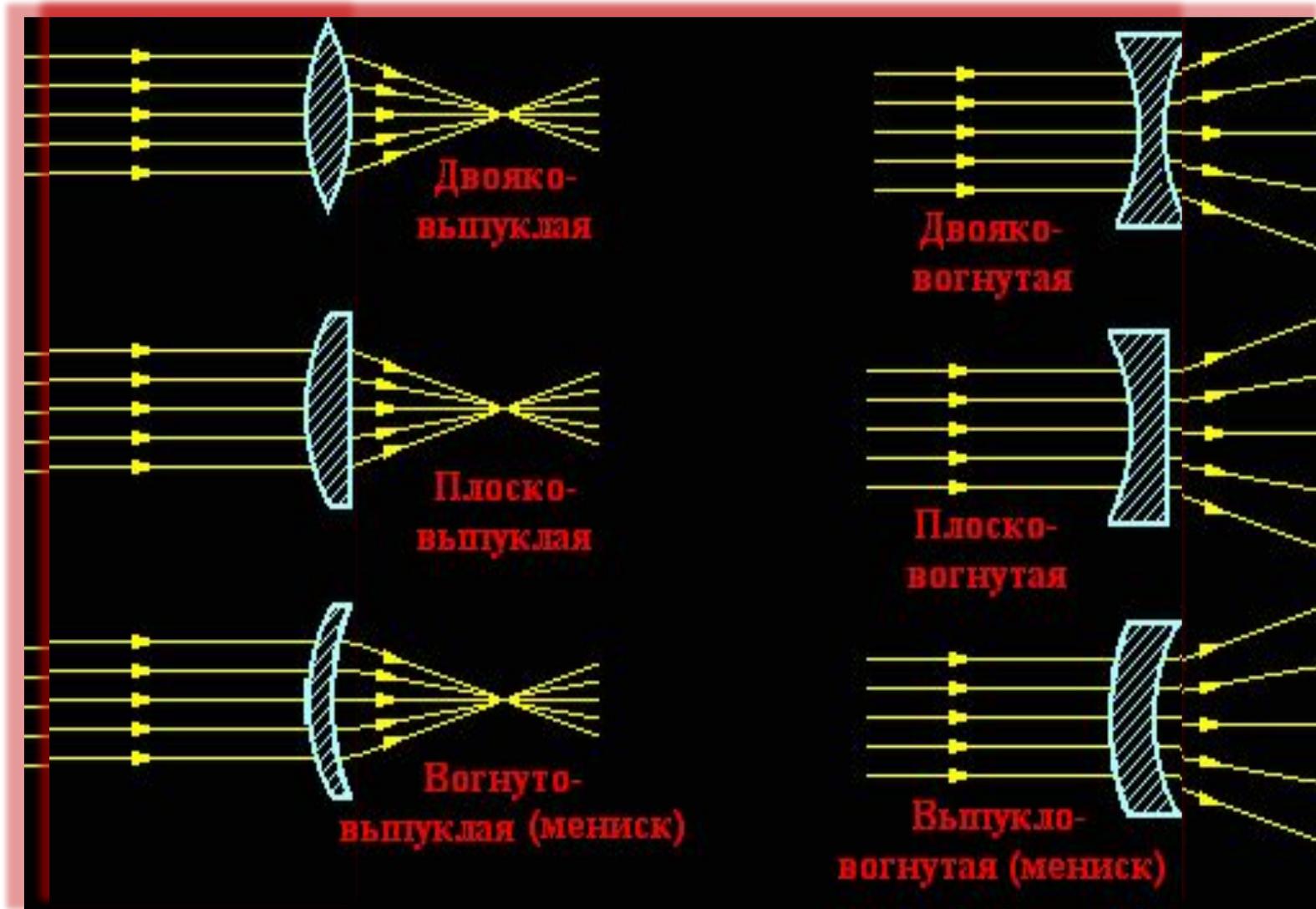


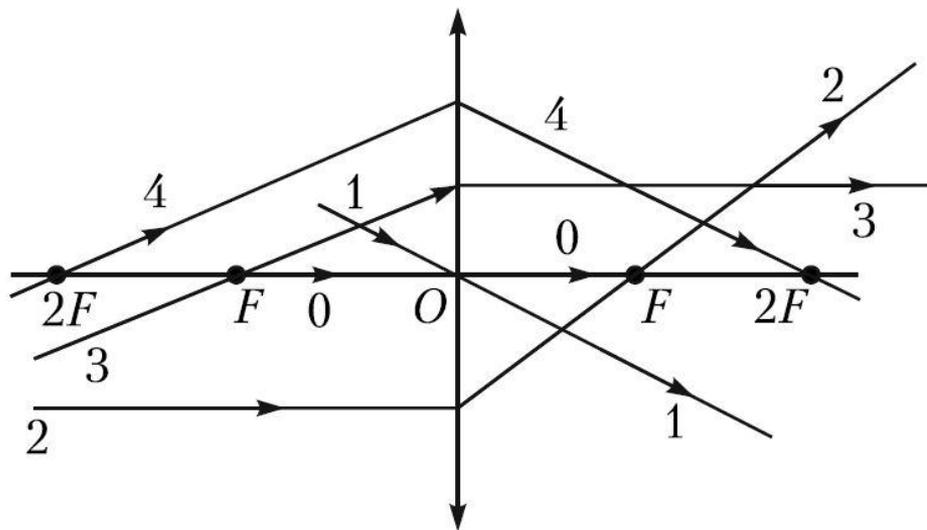
Главных фокусов - два; они расположены на главной оптической оси на одинаковом расстоянии от оптического центра линзы по разные стороны.



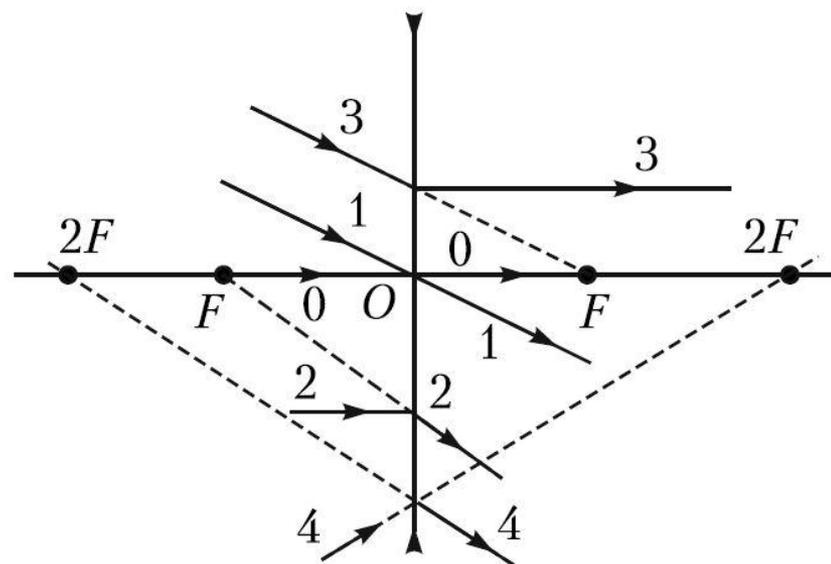
В фокусе рассеивающей линзы пересекаются продолжения лучей, которые до преломления были параллельны ее главной оптической оси. Фокус рассеивающей линзы мнимый.

# Ход лучей через линзу





*a*

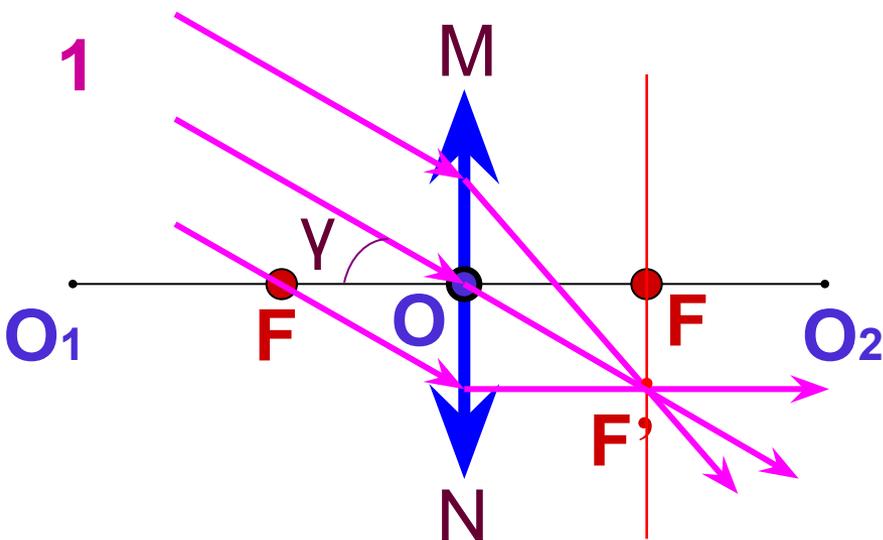


*б*

### Ход лучей:

*a* — в собирающей линзе; *б* — в рассеивающей линзе

# Основные лучи для собирающей линзы.



*Если пучок параллельный лучей падает под углом  $\gamma$  к главной оптической оси, то преломленные лучи пересекутся в одной точке  $F'$ .*

**$F'$  - побочный фокус**

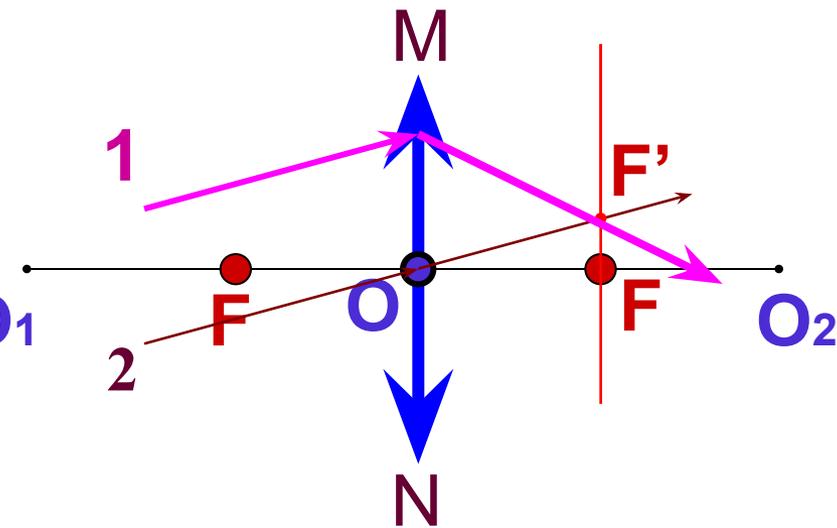
$FF'$  – фокальная плоскость – плоскость, проходящая главный фокус линзы перпендикулярна главной оптической оси

*фокальная плоскость – является совокупностью всех возможных побочных фокусов.*

# Определение направления преломленного луча

Воспользуемся вспомогательным лучом 2 параллельным лучу 1 проходящим через центр линзы.

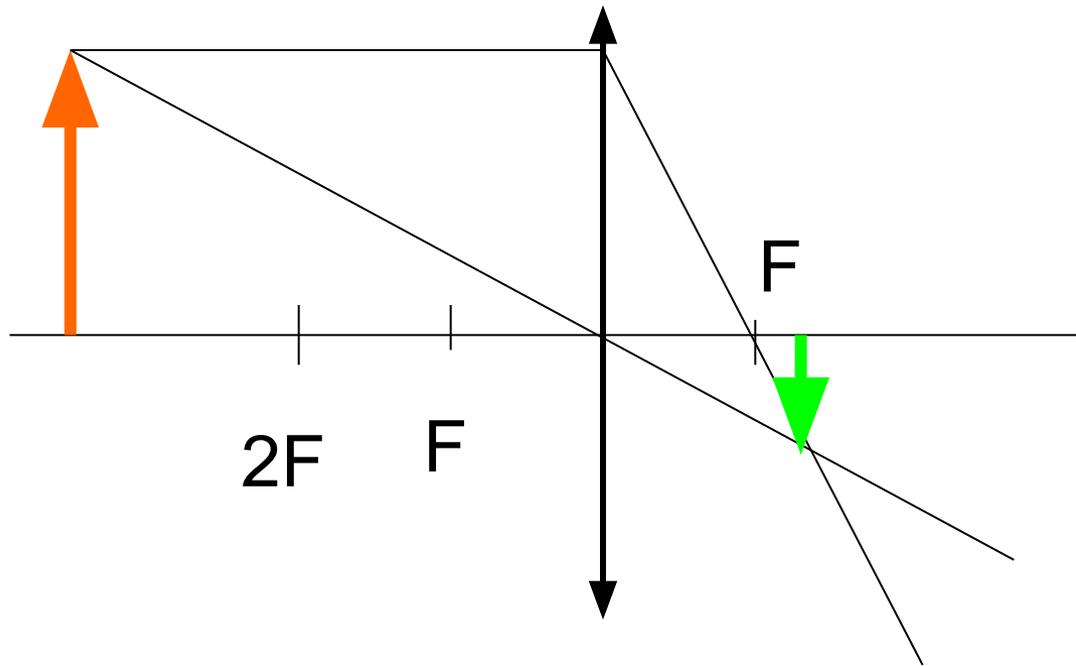
Луч 2 проходящим не преломившись пересекает фокальную плоскость в побочном фокусе  $F'$



Согласно свойству параллельных лучей после преломления луч 1 также пройдет через побочный фокус  $F'$ .

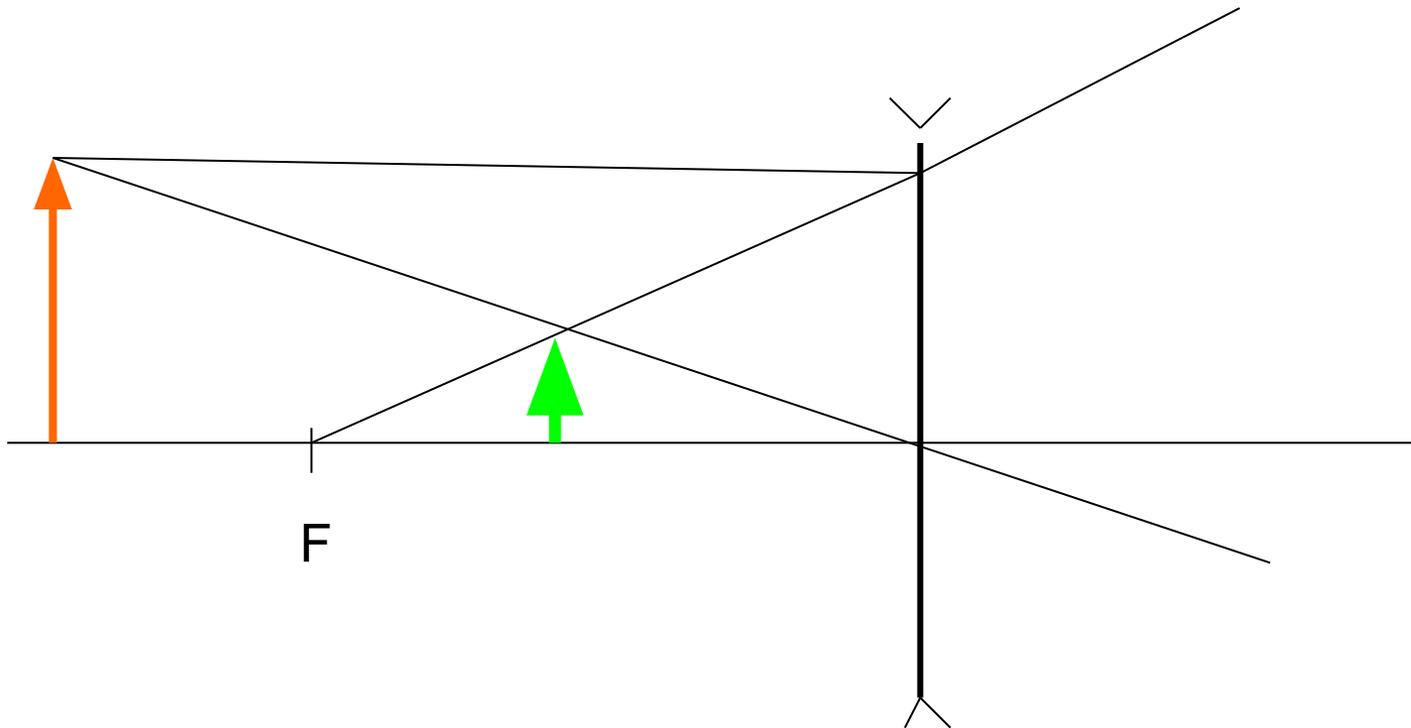
# Построение изображений в собирающей линзе

Изображение: уменьшенное,  
перевёрнутое, действительное.

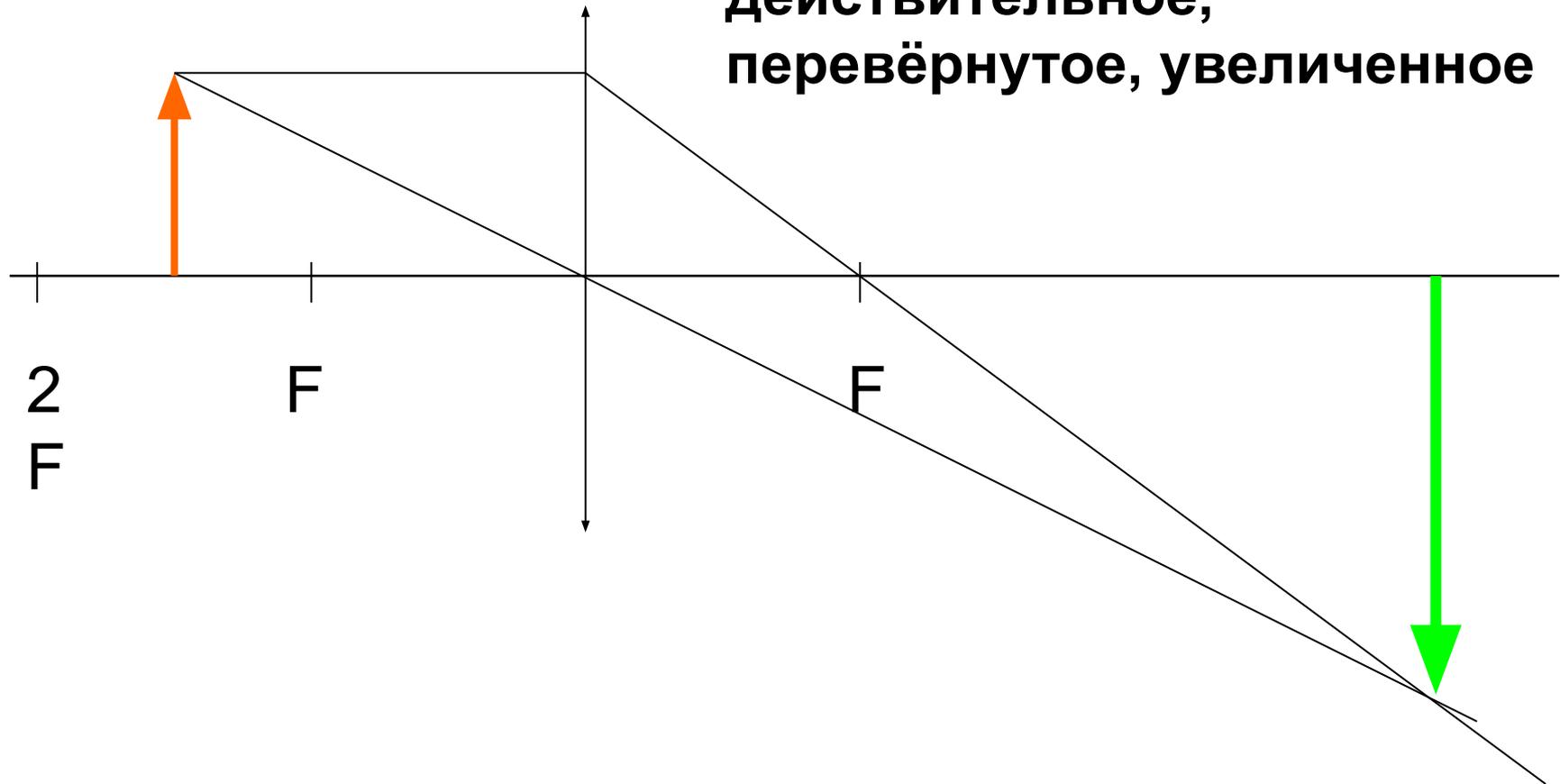


# Построение изображений в рассеивающей линзе

Изображение: уменьшенное, прямое, мнимое.

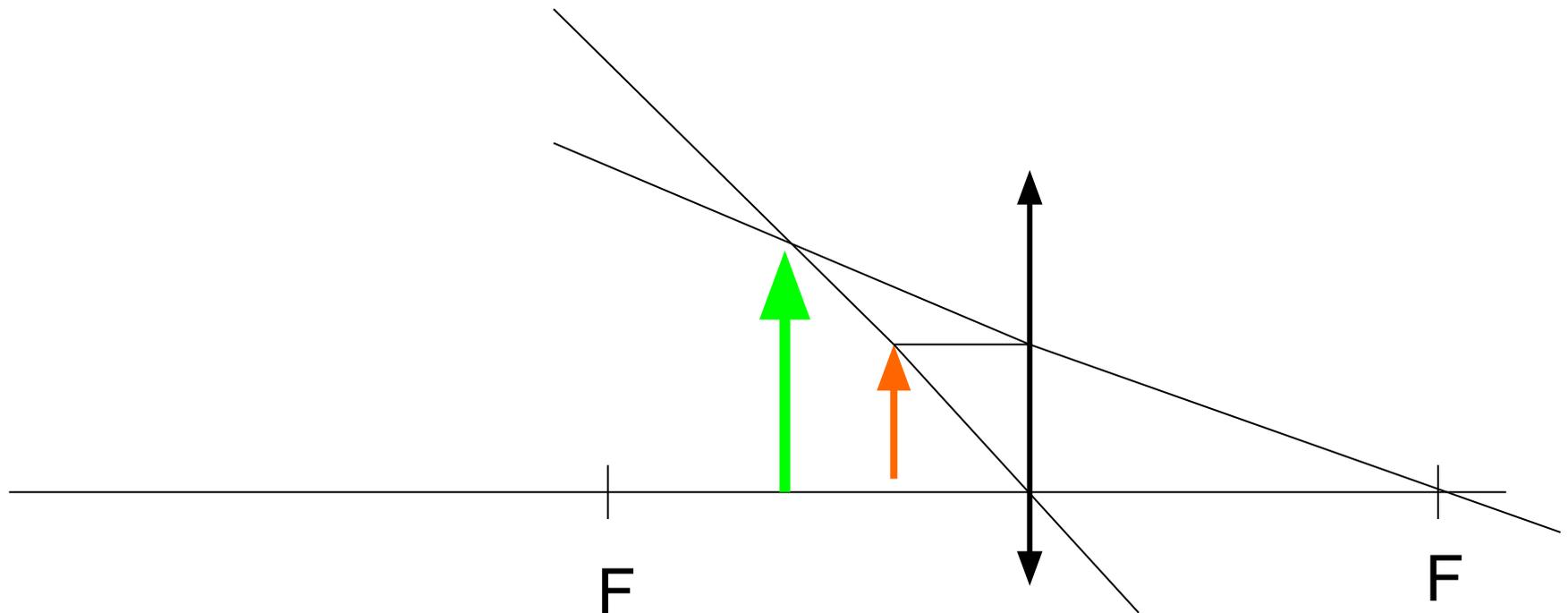


Постройте изображение предмета, предложенного на рисунке.



Постройте изображение предмета, предложенного на рисунке.

Изображение: мнимое, увеличенное, прямое

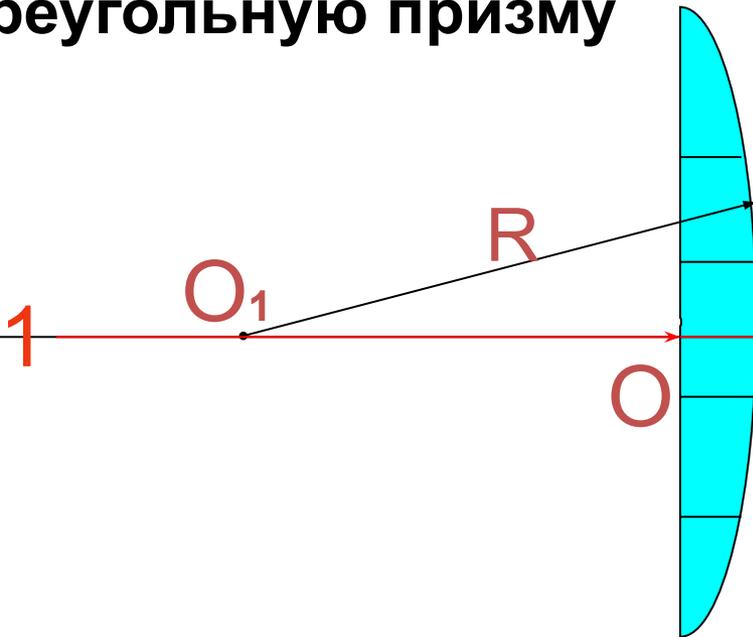


# Рассмотрим преломление лучей в плоско-выпуклой линзе

*Разобьем линзу на отдельные участки*

каждый из которых можно представлять как треугольную призму

Луч **1** пройдет не преломившись так как будет падать перпендикулярно на плоскопараллельную пластину



$R$  – радиус кривизны поверхности

$O_1$  – центр кривизны поверхности

$O$  – центр линзы

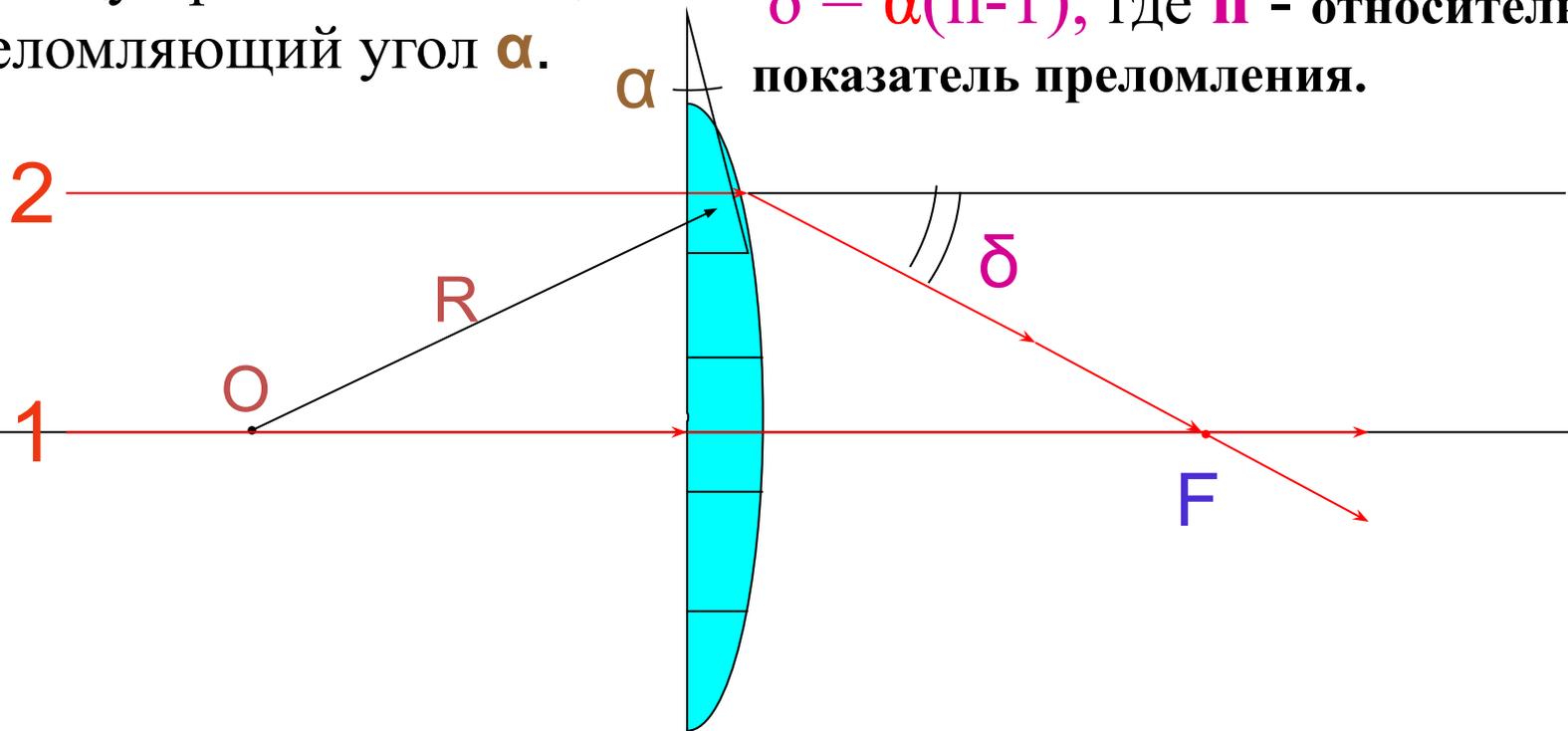
$O_1O$  – главная оптическая ось

# Рассмотрим преломление лучей в плоско-выпуклой линзе

Луч **2** падая на вторую границу призмы имеющий преломляющий угол  $\alpha$ .

Преломляется на угол

$\delta = \alpha(n-1)$ , где  $n$  - относительный показатель преломления.

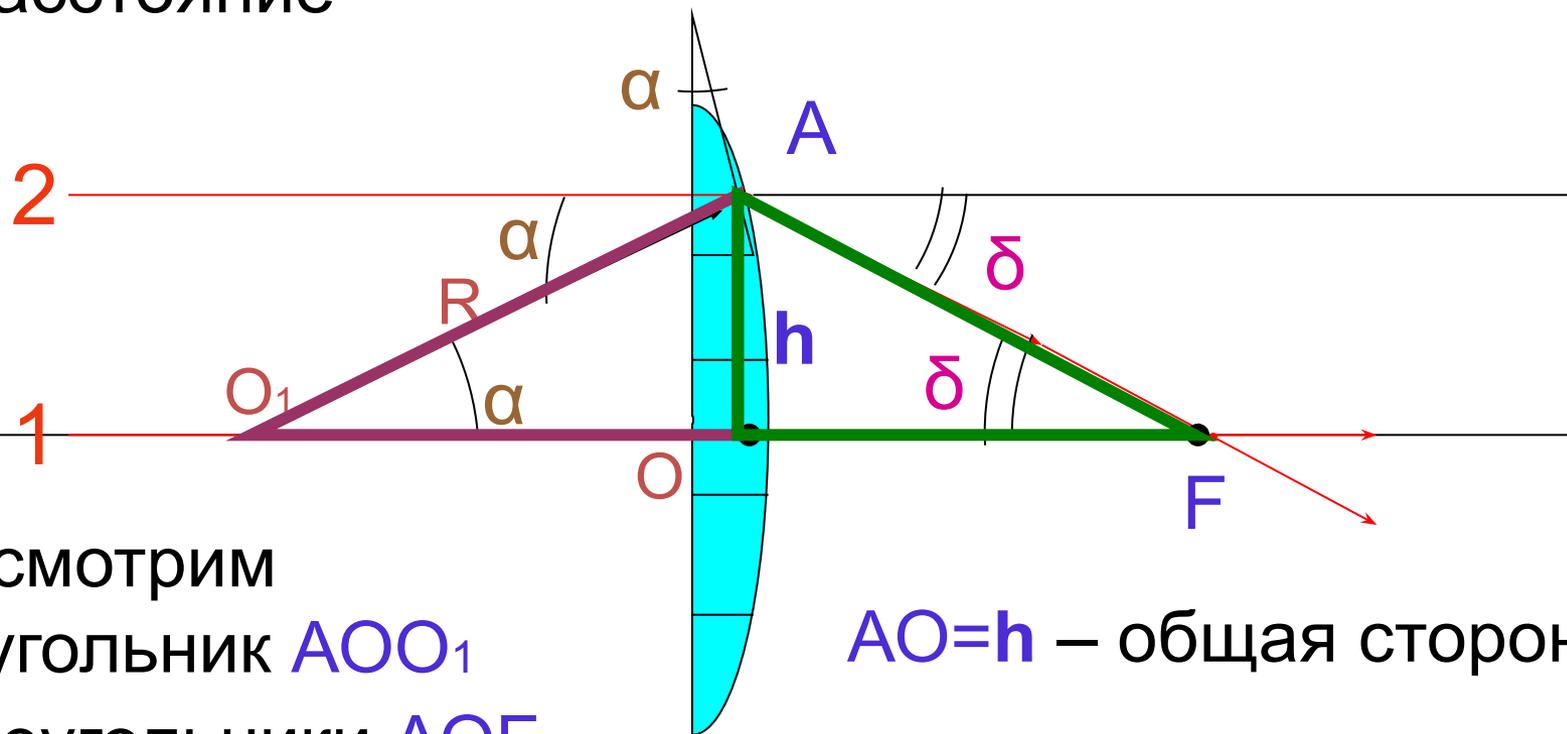


**F** — главный фокус линзы — точка на главной оптической оси в которой пересекаются лучи, падающие параллельно главной оптической оси.

# Найдем расстояние до главного фокуса от центра линзы

$OF$  – фокусное расстояние

Угол  $AFO = \delta$  как накрест лежащие



Рассмотрим  
треугольник  $AOO_1$   
и треугольники  $AOF$

$AO = h$  – общая сторона.

# Найдем расстояние до главного фокуса от центра линзы

Из треугольника  $AOO_1$

$$\sin \alpha = \frac{h}{R}, \text{ так как}$$

$\alpha$  малый угол то:

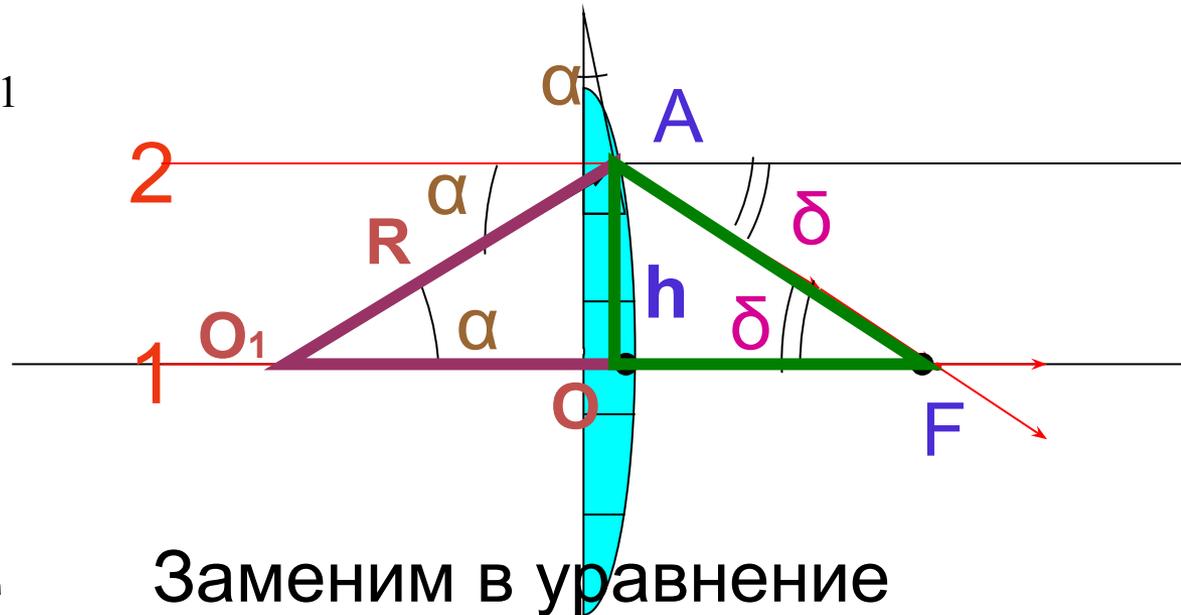
$$\alpha = \sin \alpha = \frac{h}{R}$$

Из треугольника  $AOF$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{h}{F}, \text{ так как}$$

$\delta$  малый угол то:

$$\delta = \operatorname{tg} \delta = \frac{h}{F}$$



Заменим в уравнение

$$\delta = \alpha(n - 1)$$

углы  $\alpha$  и  $\delta$  на их значения:

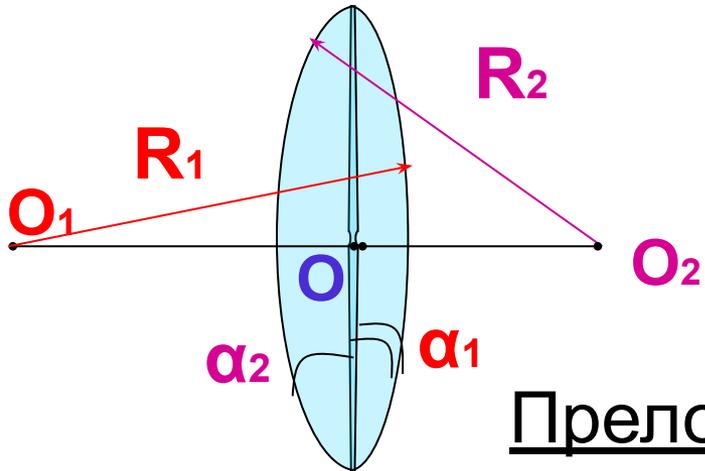
$$\frac{h}{F} = \frac{h}{R}(n - 1)$$

сократим на  $h$ :

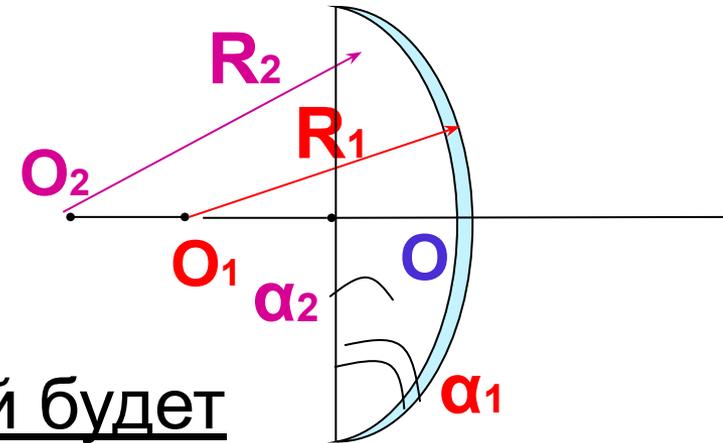
$$\frac{1}{F} = \frac{1}{R}(n - 1)$$

Любую собирающую линзу  
можно рассматривать как совокупность  
двух плоско-выпуклые линз.

**ДВОЯКОВЫПУКЛЫЕ**



**ВЫПУКЛО-ВОГНУТЫЕ**



Преломление лучей будет происходить на двух поверхностях

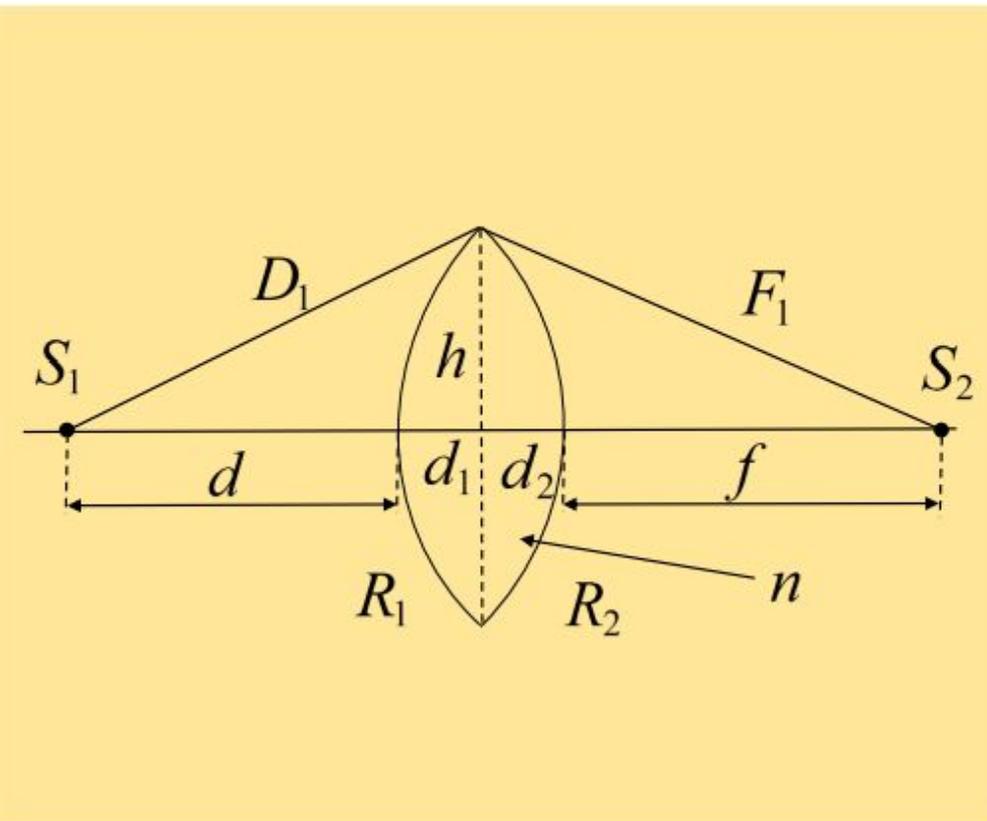
$$\delta = (\alpha_1 + \alpha_2)(n - 1)$$

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

$$\delta = (\alpha_1 - \alpha_2)(n - 1)$$

$$\frac{1}{F} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)(n - 1)$$

# Принцип Ферма



Оптическая длина:

$$l_{opt} = \sum_i l_i n_i = \int n(l) dl$$

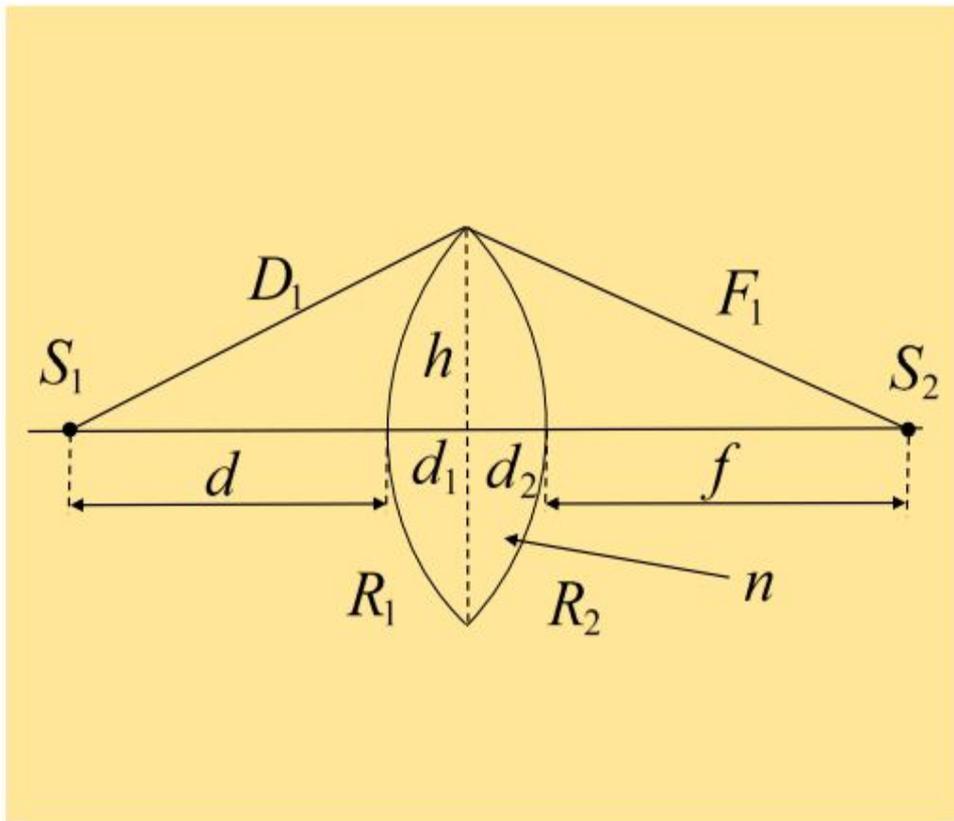
$$l_{opt,1} = D_1 + F_1,$$

$$l_{opt,2} = d + nd_1 + nd_2 + f$$

Таутохронизм:

$$l_{opt,1} = l_{opt,2}$$

## формула тонкой линзы



$$d_1 \approx \frac{h^2}{2R_1}, \quad d_2 \approx \frac{h^2}{2R_2}$$

$$D_1 = \sqrt{(d + d_1)^2 + h^2} \approx d + \frac{h^2}{2d} \left( \frac{d}{R_1} + 1 \right),$$

$$F_1 = \sqrt{(f + d_2)^2 + h^2} \approx f + \frac{h^2}{2f} \left( \frac{f}{R_2} + 1 \right).$$

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

# Оптическая сила линзы

- физическая величина, обратная фокусному расстоянию.

$$D = \frac{1}{F}$$

$$[D] = \frac{1}{[F]} = \frac{1}{1\text{м}} = 1\text{дптр}$$

Диоптрия - оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 метр

1 диоптрия – это оптическая сила линзы, фокусное расстояние которой 1 метр.

Т.к. у рассеивающей линзы фокус мнимый, то условились считать её фокусное расстояние отрицательной величиной. Тогда и оптическая сила рассеивающей линзы будет отрицательной.

Оптическую силу собирающей линзы условились считать положительной величиной.

# Для собирающих линз

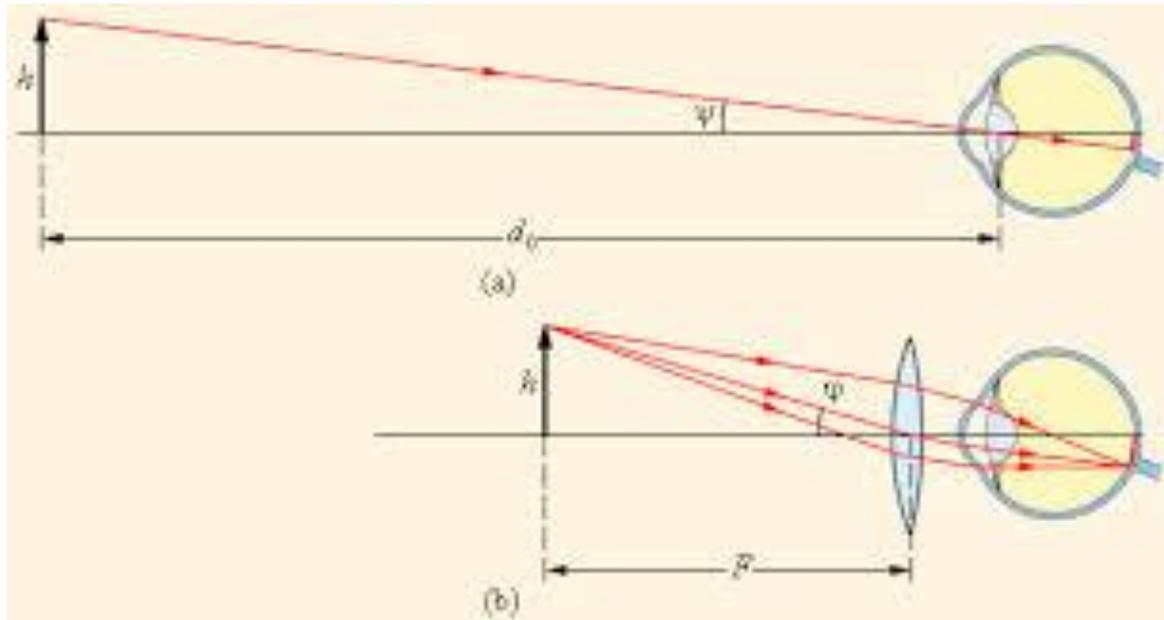
$$D > 0$$

**двояковыпуклые**  $D = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)(n - 1) > 0$ , так как  $R_1 > 0$   
 $R_2 > 0$

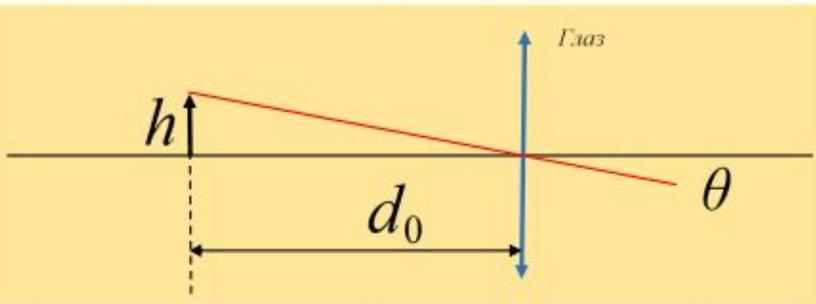
**плоско-выпуклые**  $D = \frac{1}{R}(n - 1) > 0$ , так как  $R > 0$

**выпукло-вогнутые**  $D = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)(n - 1) > 0$ , так как  $|R_2| > R_1$

# Линза как увеличительное стекло (лупа)

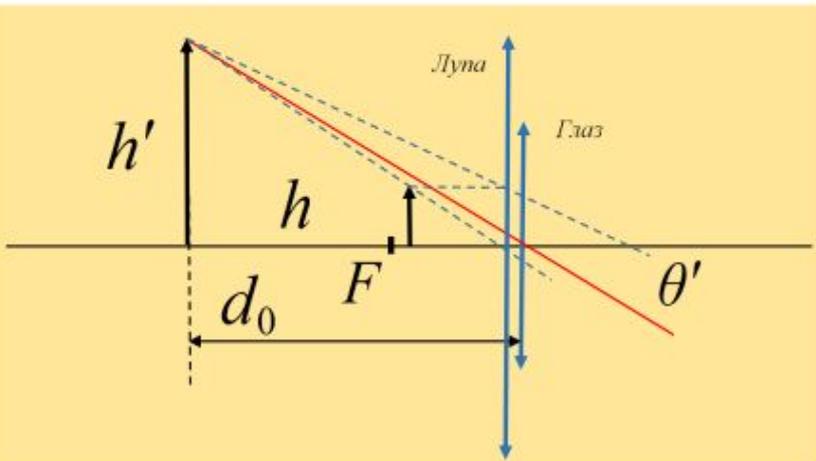


## Увеличение лупы



$$\theta \approx \operatorname{tg}\theta = \frac{h}{d_0}$$

$$\theta' \approx \operatorname{tg}\theta' = \frac{h'}{f}$$



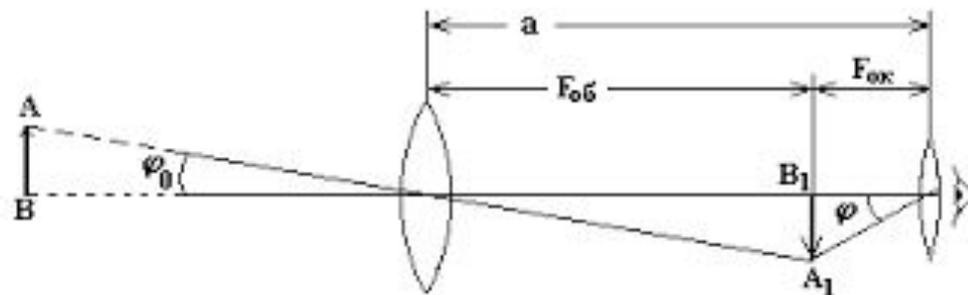
$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{1}{F}, \quad \frac{h'}{h} = \frac{f}{d}, \quad d \approx F, \quad f \approx d_0$$

$$\theta' = \frac{h'}{d_0}, \quad \gamma = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{h'}{h} = \frac{f}{d}, \quad \gamma = \frac{d_0}{F}$$

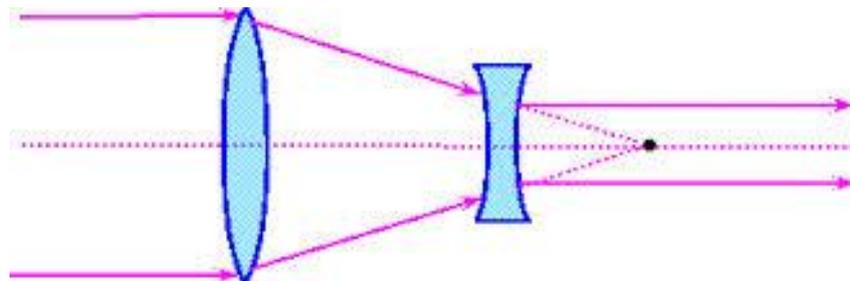
$$d_0 = 25 \text{ см}$$

Линза с фокусным расстоянием 5 см даёт увеличение 5х

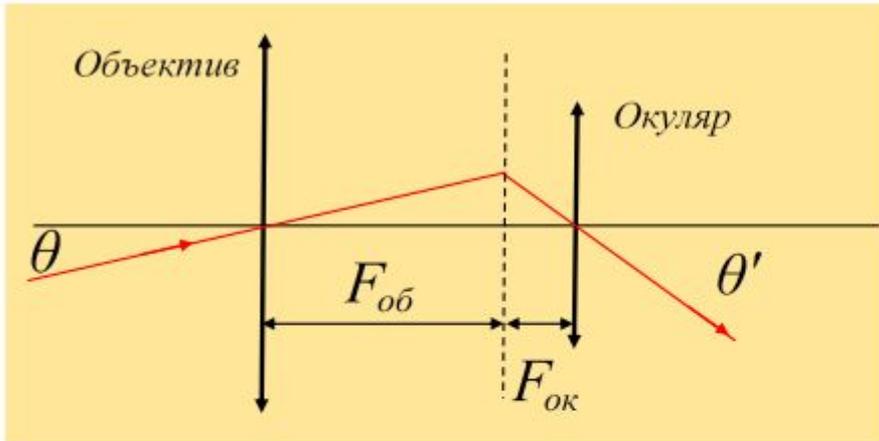
# Зрительная труба Кеплера



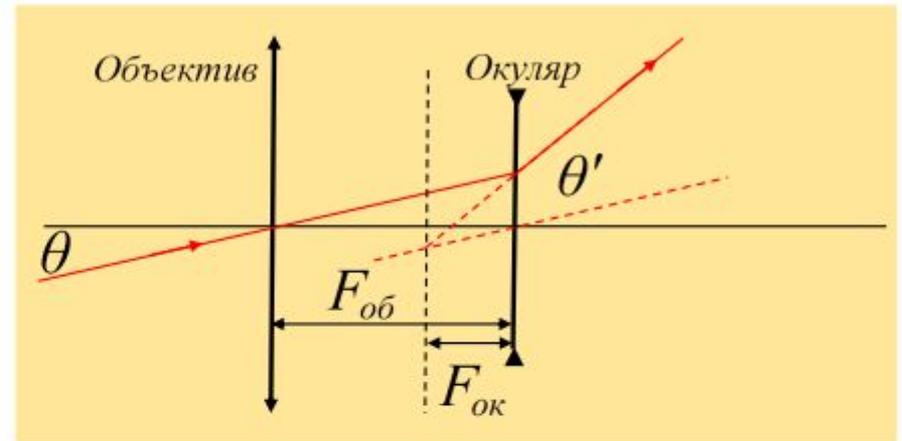
# Зрительная труба Галилея



# Зрительные трубы



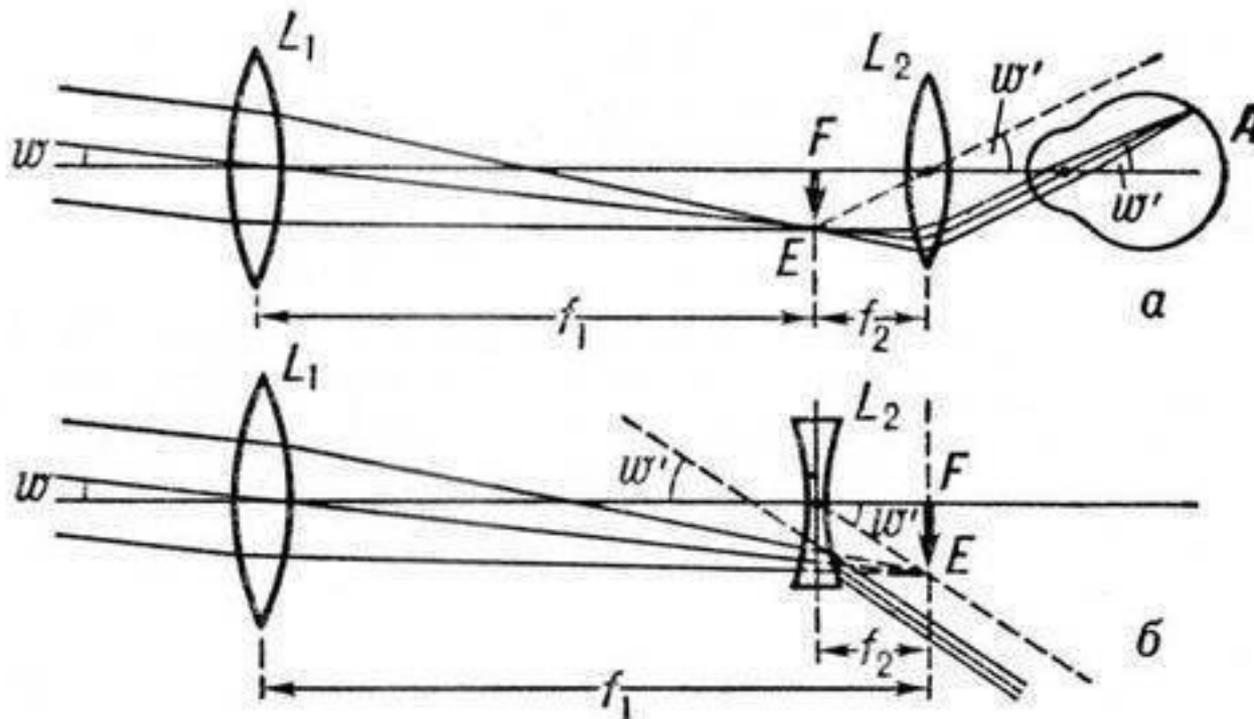
Зрительная труба  
Кеплера



Зрительная труба  
Галилея

$$\gamma = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{F_{об}}{F_{ок}}$$

# Зрительная труба Кеплера и Галилея



# Линза: яркость изображения

Ни один оптический прибор не увеличивает яркость изображения на сетчатке.

При нормальном увеличении яркость изображения равна яркости изображения предмета невооружённым глазом

## **Яркость изображения точечных и протяжённых ИСТОЧНИКОВ.**

Размер изображения точечного источника света (удалённой звезды) на сетчатке глаза практически не изменяется при «вооружении» глаза телескопом.

В этом случае освещённость изображения пропорциональна попадающему в глаз световому потоку.

При использовании телескопа попадающий в глаз световой поток увеличивается во столько раз, во сколько площадь отверстия объектива больше площади зрачка глаза.

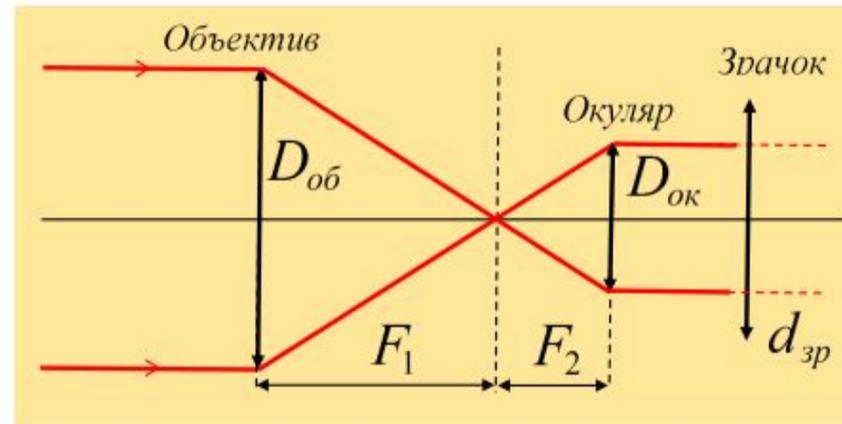
# Яркость изображения точечных и протяжённых ИСТОЧНИКОВ.

Для объектива телескопа заданного диаметра  $D_{об}$  существует **нормальное увеличение**  $\Gamma_{норм}$ , при котором освещённость протяжённого объекта максимальная

$$\Gamma_{норм} = \frac{D_{об}}{d_{зр}}, \quad E_{изобр} = \frac{B \cdot S_{зр}}{f^2}$$

Диаметр зрачка глаза  $d_{зр}$ :  $\approx 6 \div 8$  мм - ночью,  $\approx 2 \div 3$  мм - днём

$$D_{об} = 200 \text{ мм}, \quad \Gamma_{день} = \frac{D_{об}}{d_{зр,д}} \approx 100, \quad \Gamma_{ночь} = \frac{D_{об}}{d_{зр,н}} \approx 33$$



# Можно ли в телескоп увидеть звёзды днём?

- Звезда – точечный объект, размер изображения на сетчатке не изменяется; яркость изображения звезды растёт  $\sim D^2$
- Участок неба – объект протяжённый – яркость изображения на сетчатке не изменяется.
- При определённом диаметре объектива  $D$  изображение звезды станет ярче изображения неба!

# Импульс электромагнитного поля. Давление света

- Импульс релятивистской частицы:  $\mathbf{p} = (W/c^2)\mathbf{v}$
- Плотность импульса

электромагнитного поля:

$$\mathbf{g} = \frac{w\mathbf{v}}{c^2} = \frac{\mathbf{S}}{c^2} = \frac{1}{4\pi c} \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

- Давление света:

$$P = c\bar{g} = \bar{w} = \frac{\bar{w}c}{c} = \frac{I}{c}$$

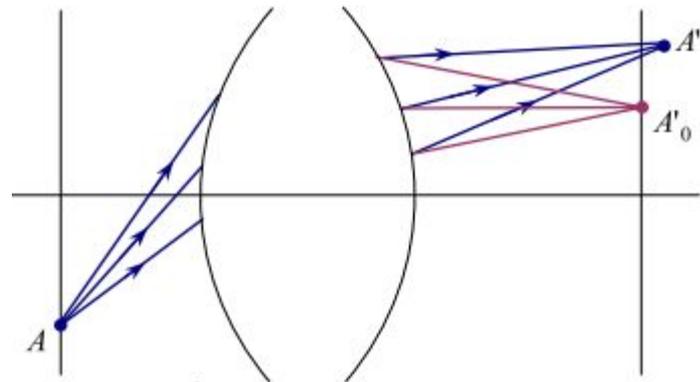
- Если коэффициент отражения  $R$ , то:  $P = (1 + R)\frac{I}{c}$
- Давление солнечного света:

$$I_c = 1,5 \text{ кВт/м}^2$$

$$P = I/c = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$$

# Аберрации

В идеальной оптической системе все лучи, исходящие из т.А пересекаются в сопряженной с ней точке  $A'$

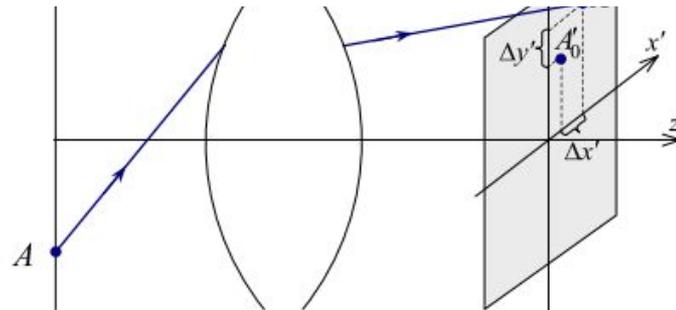


*Идеальное и реальное изображения точки.*

В реальной системе или нарушается гомоцентричность пучка и лучи не имеют общей точки пересечения, или гомоцентричность сохраняется, но лучи пересекаются в другой точке, не совпадающей с точкой идеального изображения. Это является следствием аберрации.

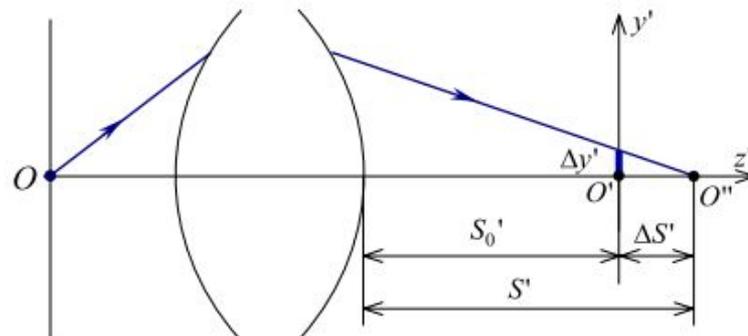
Основная задача расчета оптических систем- корректировка (уменьшение) аберраций.

**Поперечные aberrации**  $(\Delta x', \Delta y')$  – это отклонения координат точки  $A'$  пересечения реального луча с плоскостью изображения от координат точки  $A'_0$  идеального изображения в направлении, перпендикулярном оптической оси



*Поперечные aberrации.*

**Продольные aberrации** – это отклонения координаты точки  $O''$  пересечения реального луча с осью от координаты точки  $O'$  идеального изображения вдоль оси  $\Delta S' = S' - S'_0$



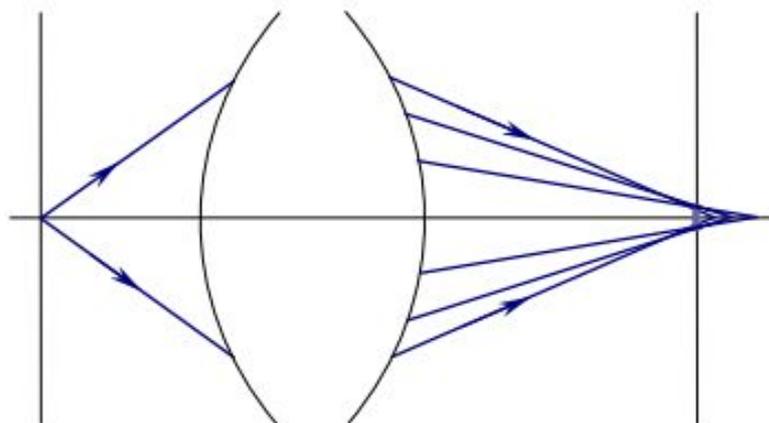
*Продольные aberrации осевого пучка для изображения*

Аберрации делятся на **монохроматические** и **хроматические**. Монохроматические аберрации оптической системы наблюдаются при монохроматическом излучении (на одной длине волны  $\lambda$ ).

Монохроматические аберрации делятся на несколько типов:

- сферическая,
- кома,
- астигматизм и кривизна изображения,
- дисторсия.

Сферическая аберрация приводит к тому, что лучи, выходящие из осевой точки предмета, не пересекаются в одной точке, образуя на плоскости идеального изображения кружок рассеяния. Для коррекции аберрации используют асферические поверхности и /или материалы с экстремальными значениями показателя преломления и числа Аббе, позволяющими компенсировать аберрации.

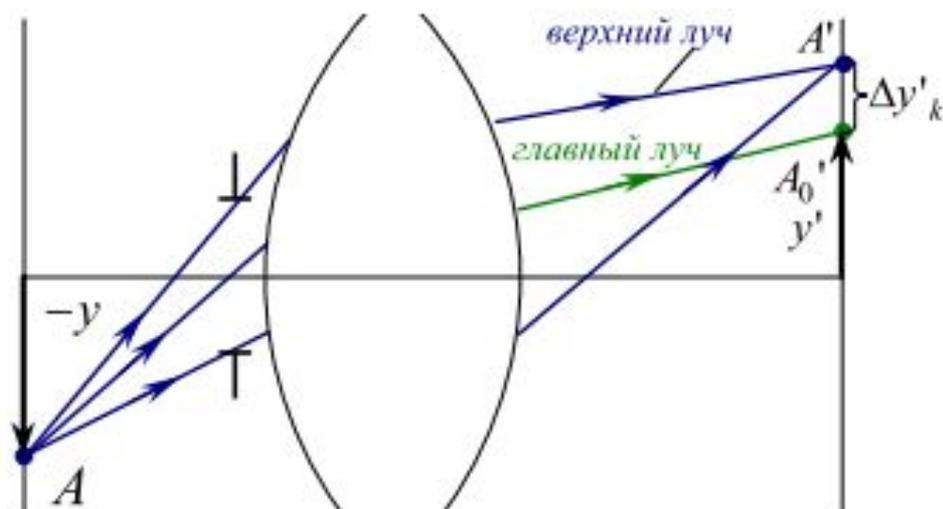


*Сферическая аберрация.*

## Кома

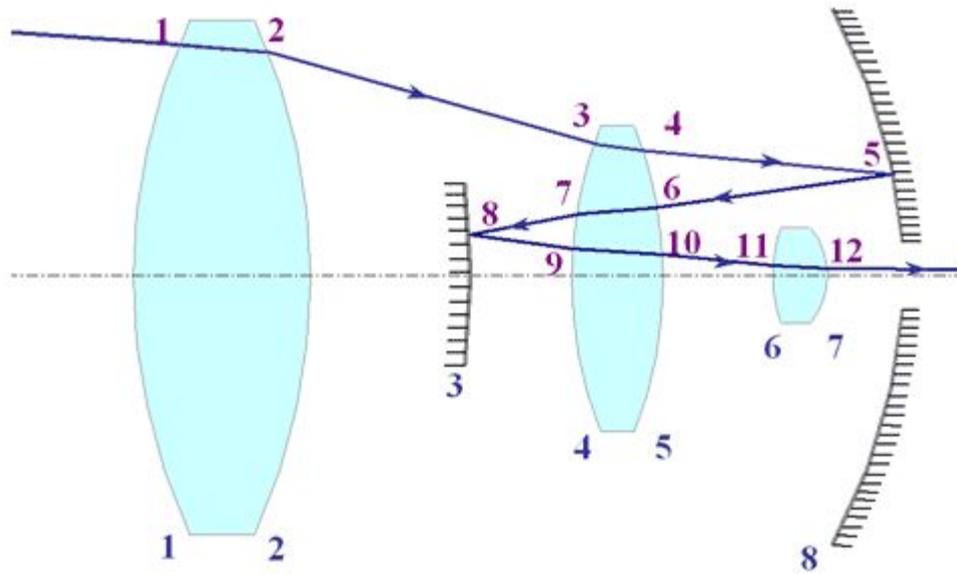
*От греческого: кома – хвост, пучок волос.*

Кома появляется при смещениях точки предмета с оси. Кома добавляется к другим aberrациям (например, к сферической),



*Структура пучка лучей при наличии комы.*

В первом приближении кома прямо пропорциональна смещению предмета с оси. Если смещение равно нулю, то и кома равна нулю. Таким образом, поперечная aberrация при наличии комы прямо пропорциональна величине предмета:

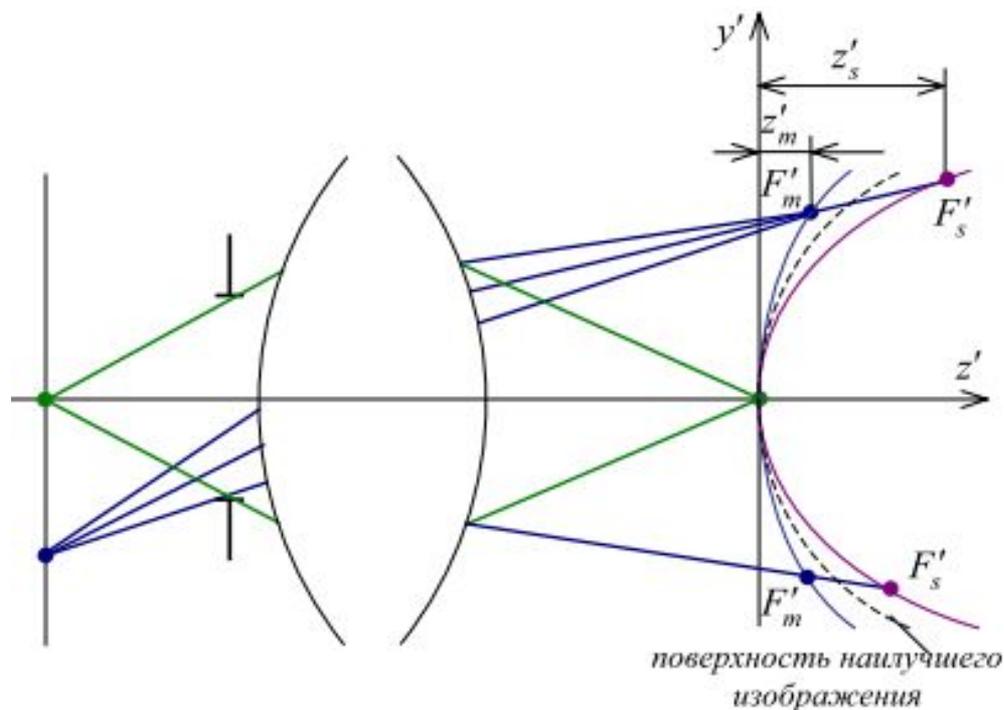


**Меридиональная плоскость** – это плоскость, проходящая через оптическую ось (например плоскость рисунка)

**Сагиттальная плоскость** – это плоскость, которая содержит луч, перпендикулярный меридиональной плоскости и не проходит через ось (может быть ломаной и рассматривается по частям). Ее название произошло от слова “сагитта” (лат.) – стрела. Примером такой плоскости может служить воображаемая ломаная плоскость, содержащая луч на рис и перпендикулярная плоскости этого рисунка.

## Астигматизм и кривизна изображения

Астигматизм появляется при значительном смещении точки предмета с оси и добавляется ко всем остальным aberrациям. Сместим предмет с оси на значительное расстояние. **Астигматизм** состоит в том, что не совпадают точки фокусов в меридиональной  $F'_m$  и сагиттальной  $F'_s$  плоскостях, поэтому лучи бесконечно узкого пучка не сходятся в одной точке. **Кривизна поля** заключается в том, что наилучшее изображение получается на искривленной поверхности, а не на плоскости.

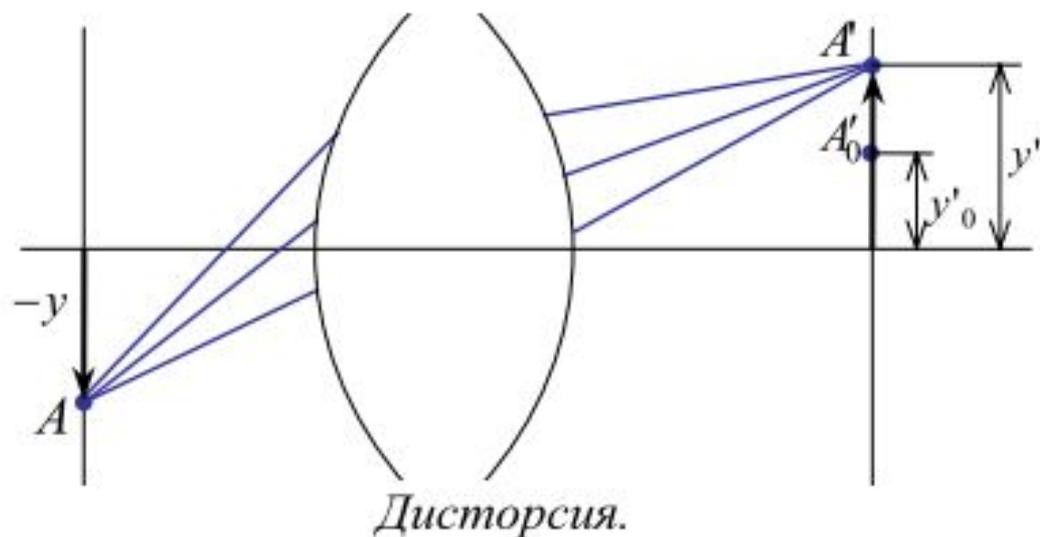


*Астигматизм и кривизна изображения.*

## Дисторсия

*Название происходит от латинского “искажение”.*

Если кроме дисторсии других aberrаций нет, то точка изображается в виде точки (гомоцентрический пучок остается гомоцентрическим), но эта точка смещена от идеальной (рис.8.2.16).

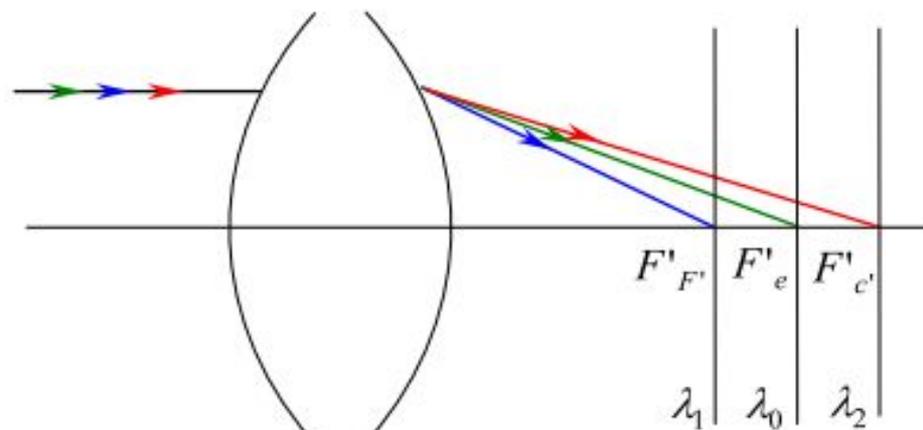


**Хроматические aberrации** – это проявление зависимости характеристик оптической системы от длины волны света (*хромо – цвет*). Хроматические aberrации приводят к тому, что в изображениях неокрашенных предметов появляется окрашенность. Хроматические aberrации появляются из-за того, что оптические системы изготовлены из оптических стекол с показателями преломления, зависящими от длины волны  $n = n(\lambda)$  (дисперсии показателя преломления).

Существуют два основных вида хроматизма:

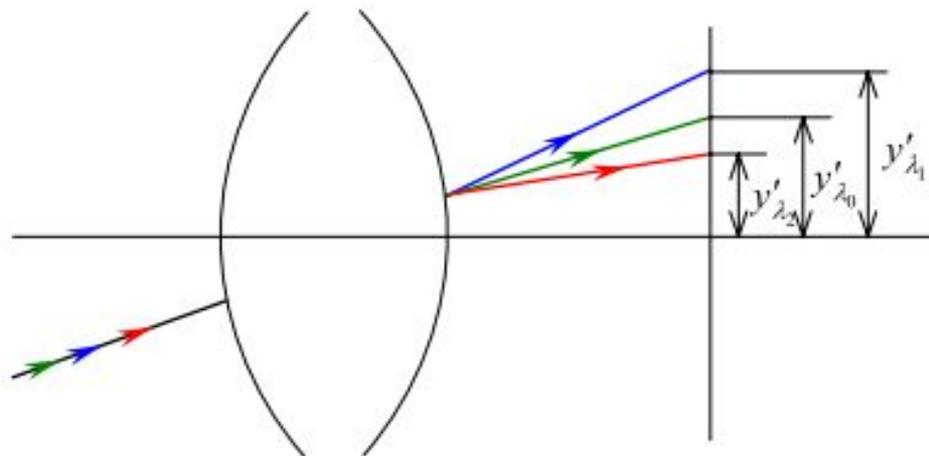
- хроматизм положения,
- хроматизм увеличения.

**Хроматизм положения** – это aberrация, при которой изображения одной точки предмета расположены на разном расстоянии от оптической системы для разных длин волн (разные положения плоскости изображения). В этом случае фокусы также расположены на разных расстояниях



*Хроматизм положения.*

**Хроматизм увеличения** – это aberrация, при которой увеличение оптической системы зависит от длины волны. Вследствие этого вместо изображения точки образуется цветная полоска.



*Хроматизм увеличения.*