

# ОПТИКА

## Лекция 26.

### Тема: Основные законы геометрической оптики

Учебник:

*Трофимова Т.И.* Курс физики : учеб. пособ. для вузов / Т. И. Трофимова. - М.: Академия, 2007.- с. **302-311**.

к.ф.-м.н.  
Курочкин А.  
В

**Оптика** – раздел физики, изучающий свойства света:

- его возникновение,
- распространение и
- взаимодействие с веществом.

Согласно представлениям волновой теории света,

**СВЕТ** – это электромагнитное излучение, воспринимаемое глазом и лежащее в диапазоне длин волн  $\approx 380 - 760$  нм.

Этот диапазон является видимой частью спектра электромагнитных излучений.

# Flashback

**Волны** – возмущения, распространяющиеся в среде (или в вакууме), и несущие с собой энергию.

**Главная особенность:**

**ЭМВ переносят энергию и импульс без переноса вещества.**

**Электромагнитные волны (т.е. свет) являются поперечными.**

Колебания векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  напряжённостей  
электрического и магнитного полей волны

взаимно перпендикулярны

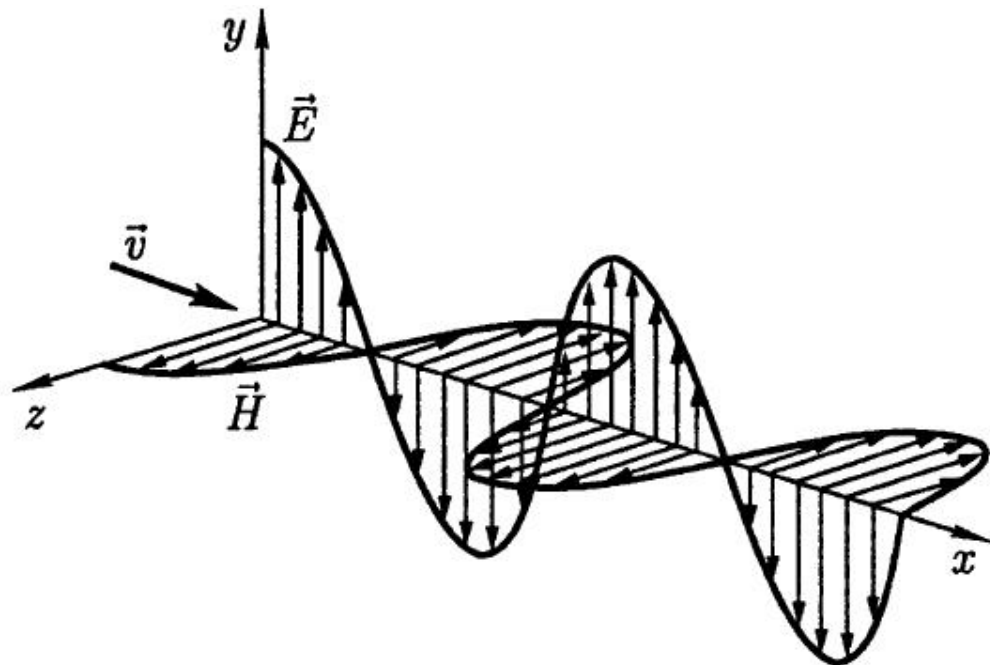
и лежат в плоскости, перпендикулярной вектору  $\vec{v}$

скорости распространения волны,

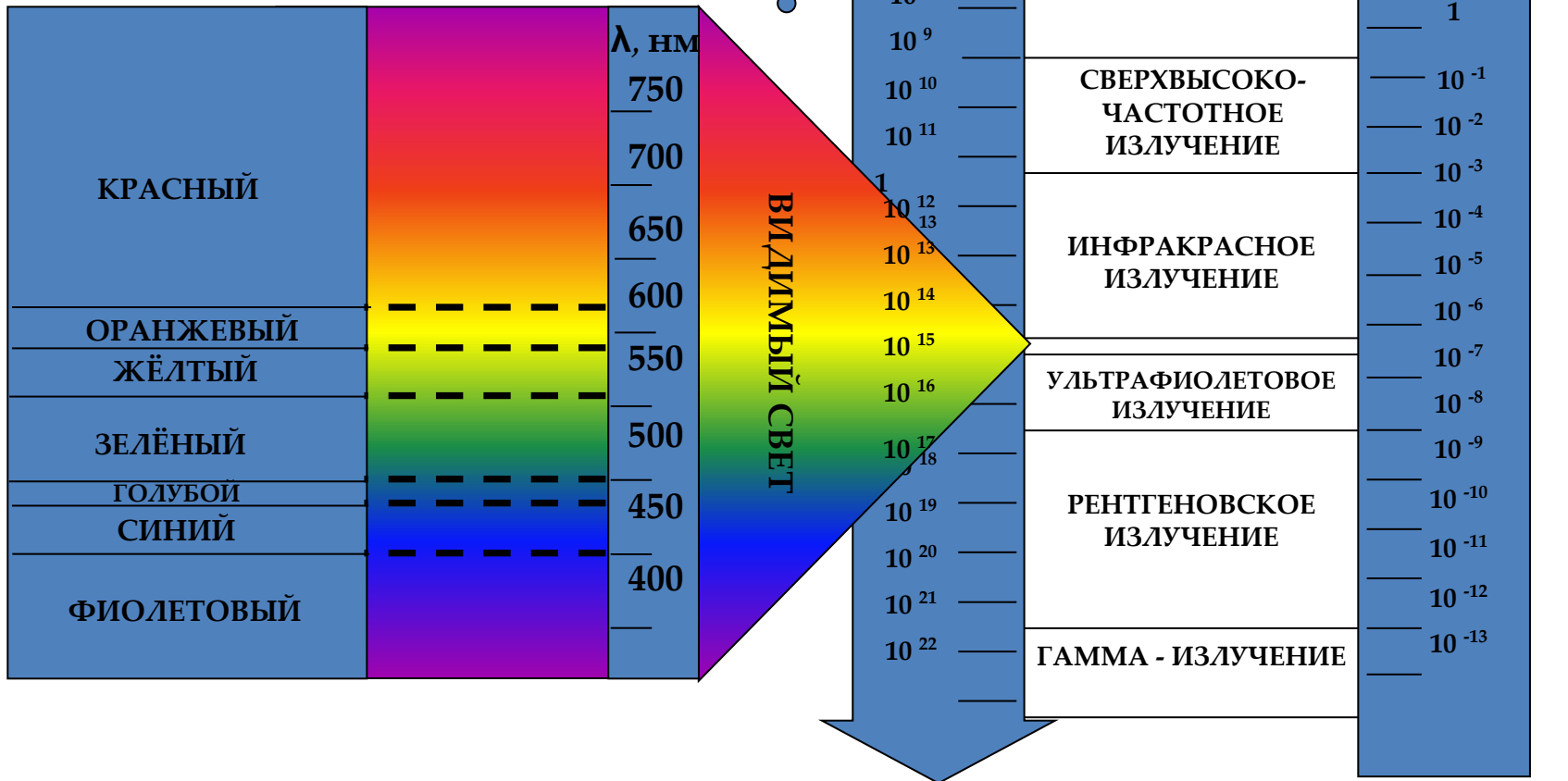
причём векторы  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  и  $\vec{v}$

образуют правовинтовую систему.

$E$  и  $H$   
одновременно  
достигают  
максимума,  
одновременно  
обращаются в ноль  
и т.д.



ШКАЛА  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
ВОЛН



# Основные законы геометрической оптики

## 1. Закон прямолинейного распространения света:

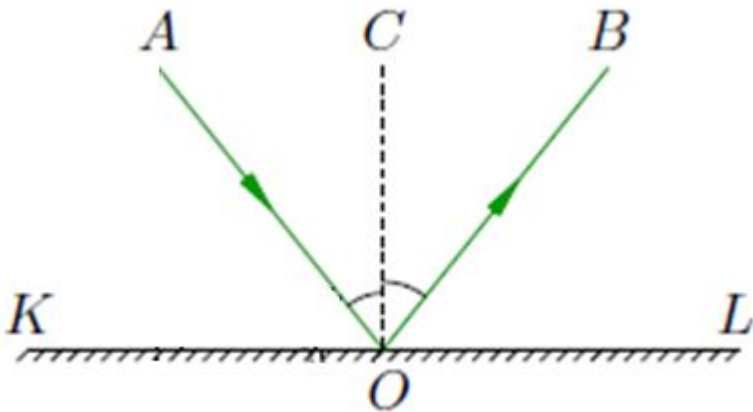
Свет в оптически однородной изотропной среде распространяется прямолинейно;

## 2. Закон независимости световых пучков:

Эффект, производимый отдельным пучком, не зависит от того, действуют ли одновременно остальные пучки или они устранены.

### 3. Закон отражения света:

- луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела двух сред в точке падения, лежат в одной плоскости;
- угол отражения равен углу падения.



$$\angle AOC = \angle COB$$

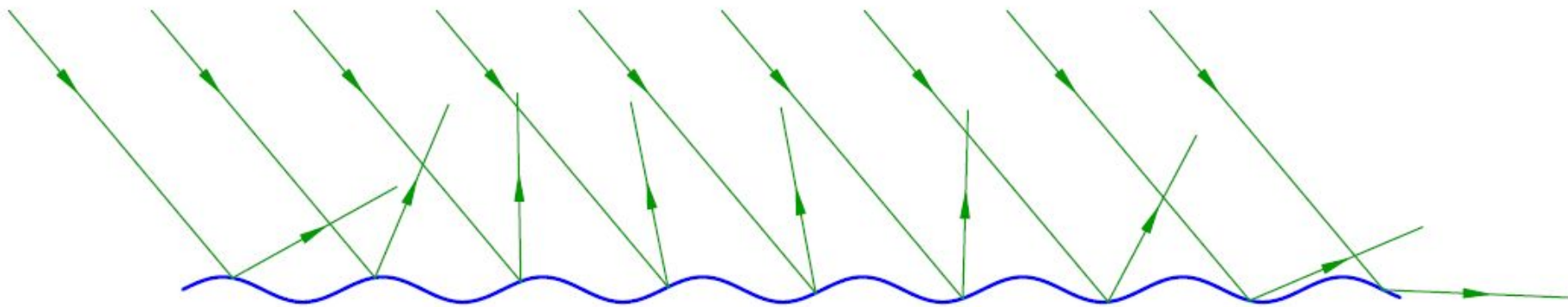
**Диффузное отражение** — это отражение света, падающего на поверхность, при котором отражение происходит под углом, отличающимся от падающего и лежащим не обязательно в плоскости падающего луча и нормали к поверхности.

Диффузным отражение становится в том случае, **если неровности поверхности имеют порядок длины волны** (или превышают её) и **расположены беспорядочно**.

Одна и та же поверхность может быть матовой, диффузно-отражающей для видимого или ультрафиолетового излучения, но гладкой и зеркально-отражающей для инфракрасного излучения.

В случае смешанного отражения света часть излучения отражается зеркально, а часть — диффузно.





Отражение от неровной (волнообразной) поверхности

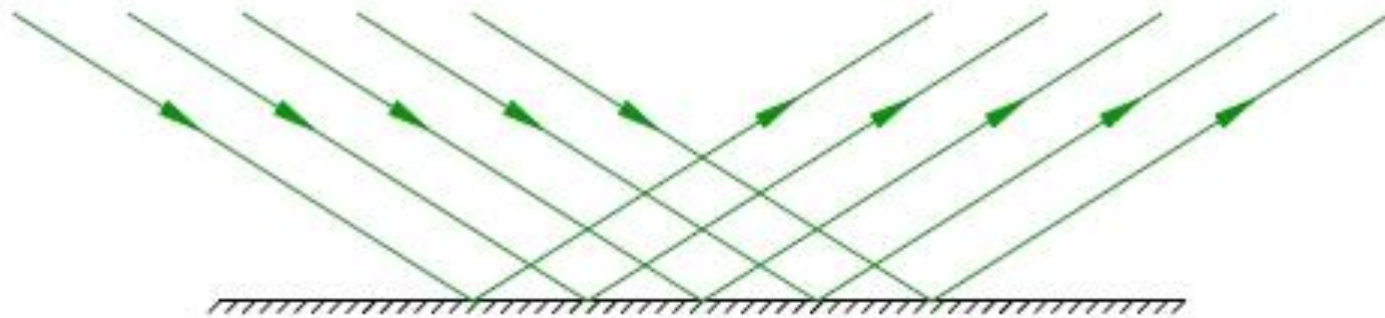
### **Неровная поверхность.**

Размеры ее неровностей **не меньше**  
длин световых волны.

После отражения параллельность лучей **нарушается.**

**Матовая поверхность.** Поверхность с микроскопическими неровностями, **соизмеримыми** с длинами волн видимого света. В результате отражения параллельного пучка получается **рассеянный свет**.

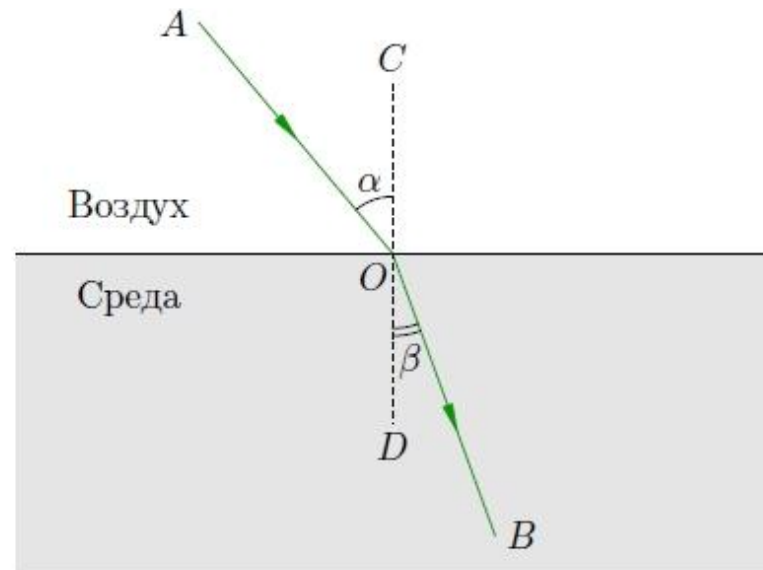
**Зеркальная поверхность.** Поверхность с микроскопическими неровностями, **меньшими**, чем длина световой волны. В результате отражения параллельность пучка **сохраняется**.



## 4. Закон преломления света

- луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела двух сред в точке падения, лежат в одной плоскости;
- отношение синуса угла падения  $\alpha$  к синусу угла преломления  $\beta$  равно отношению абсолютного показателя преломления второй среды к первой.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1},$$



**Абсолютным показателем преломления среды** называется показатель её преломления на границе с вакуумом. Он равен отношению скорости  $c$  света в вакууме к скорости  $v$  распространения света в данной среде:

$$n = \frac{c}{v}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м / с}$$

При переходе света из среды №1 в среду №2 **частота  $\nu$  света всегда остаётся постоянной.**

# ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

**Дисперсия света** — явление, обусловленное зависимостью абсолютного показателя преломления вещества от длины волны (частоты) падающего света.

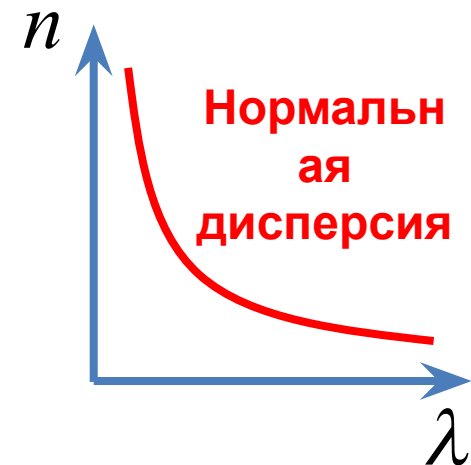
$$n = f(\lambda)$$

$$D = \frac{dn}{d\lambda}$$

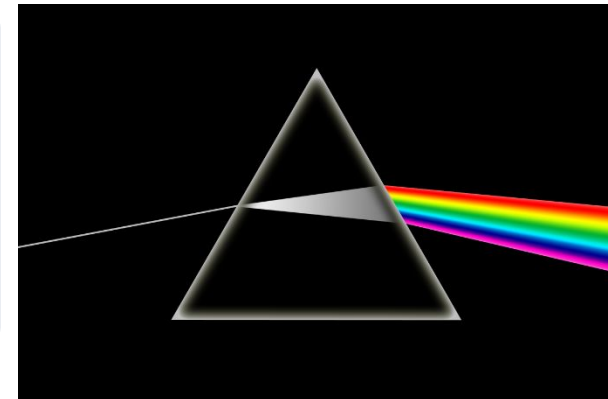
- **дисперсия вещества**, показывает, как быстро изменяется показатель преломления с длиной волны.

Следствием дисперсии является разложение в спектр пучка белого света при прохождении его через призму.

Первые экспериментальные наблюдения дисперсии света принадлежат И. Ньютону (1672 г.).



«Обычно», чем меньше длина световой волны, тем больше показатель преломления среды для неё и тем меньше фазовая скорость волны в среде.



**Фазовая скорость  $v$  ЭМВ** определяется выражением:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \cdot \epsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

где  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$

$\epsilon_0$  – электрическая постоянная;

$\mu_0$  – магнитная постоянная;

$\epsilon$  – электрическая проницаемость среды;

$\mu$  – магнитная проницаемость среды.

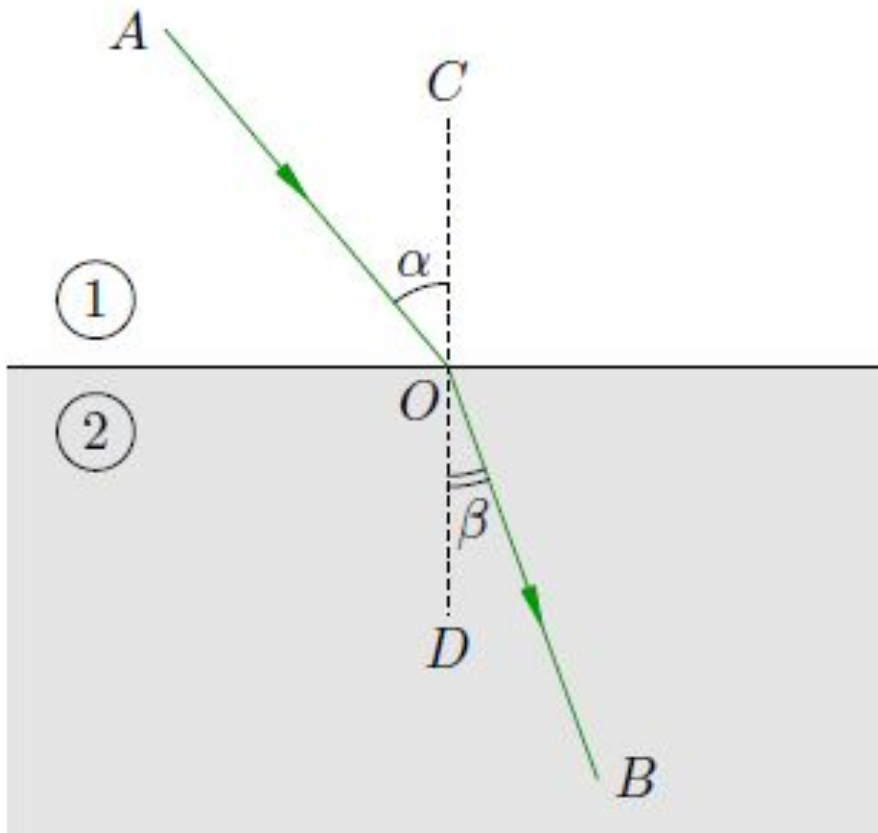
При сравнении (2) с (3) видно, что

$$n = \sqrt{\epsilon \mu}.$$

$$n \geq 1.$$

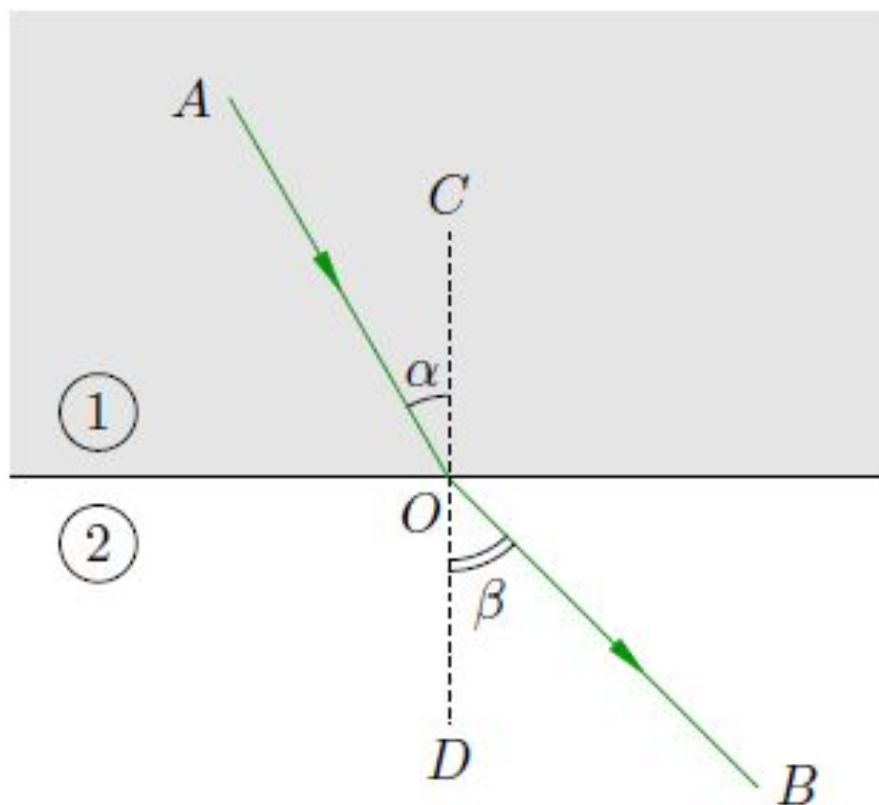
- В вакууме ( $\epsilon=1$ ,  $\mu=1$ ) скорость распространения ЭМВ равна  $c$  (скорости света).
- В веществе  $\epsilon\mu > 1$ , поэтому скорость распространения ЭМВ в веществе всегда меньше, чем в вакууме.

**Переходя из оптически менее плотной среды в более плотную, световой луч после преломления идет ближе к нормали.**



$$n_1 < n_2 \Rightarrow \alpha > \beta$$

**Переходя из оптически более плотной среды в менее плотную, световой луч после преломления идет дальше от нормали.**

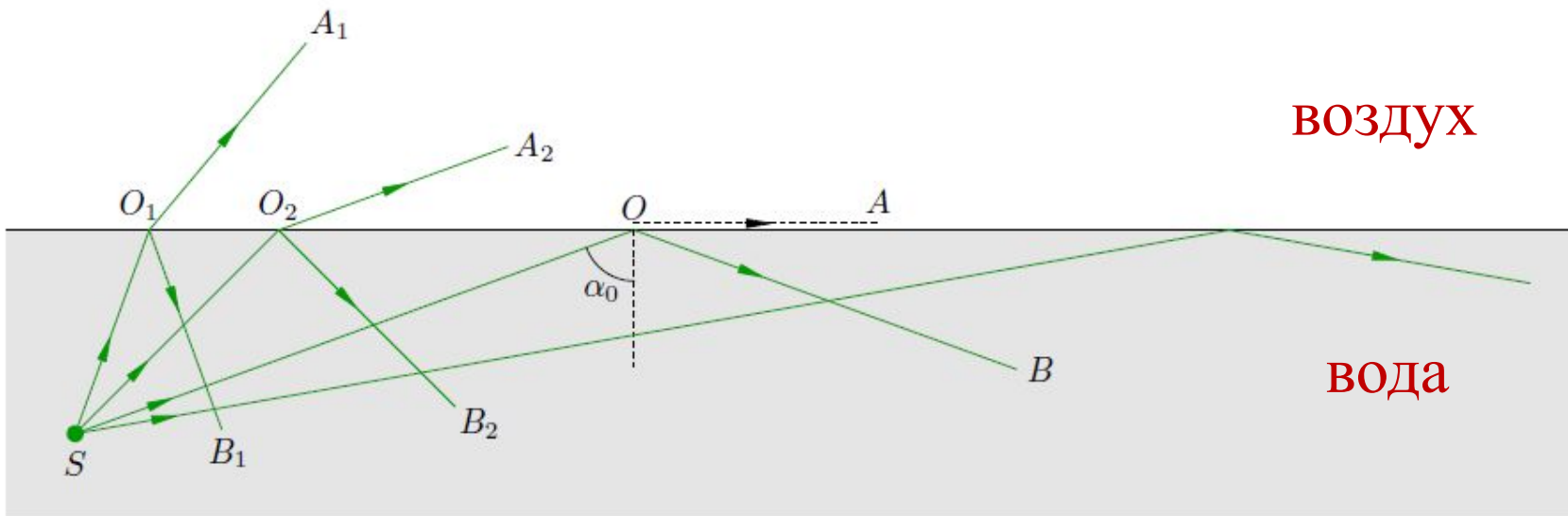


$$n_1 > n_2 \Rightarrow \alpha < \beta$$



# Полное внутреннее отражение

Переходя из оптически более плотной среды в менее плотную может наблюдаться **явление полного внутреннего отражения**. С увеличением угла падения увеличивается угол преломления до тех пор, пока при некотором угле падения  $\alpha$  угол преломления не окажется равным  $\pi/2$ .

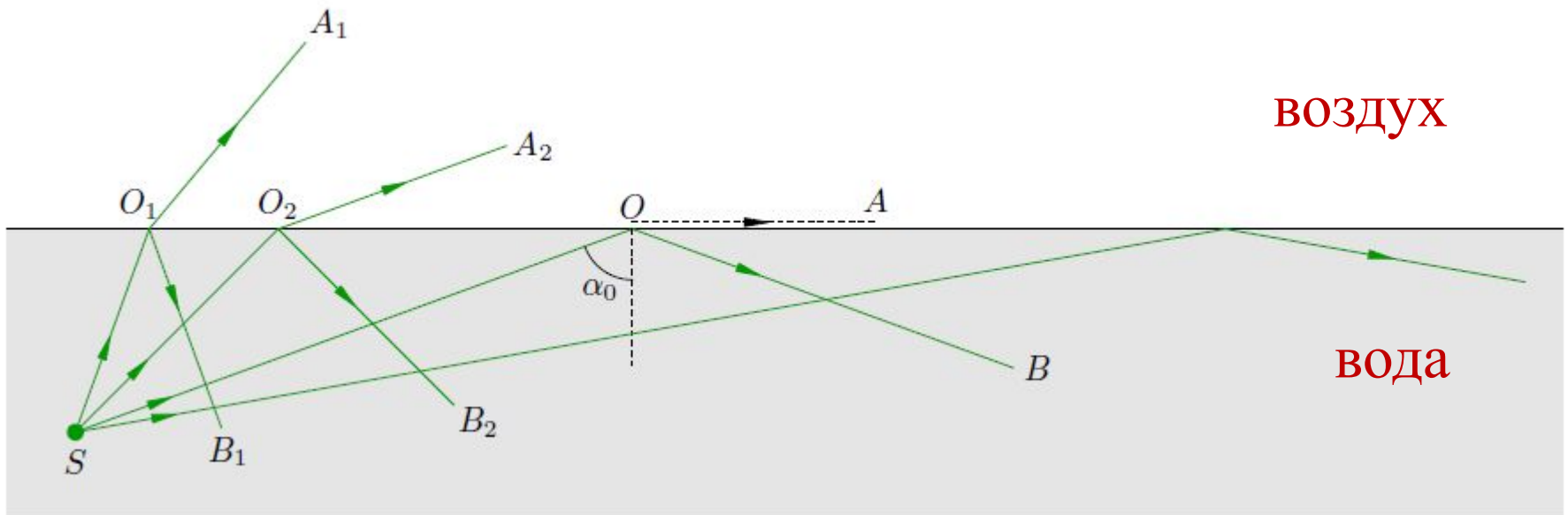


$S$  – точечный источник света;  
 $\alpha_0$  – предельный угол отражения.

При условии  $\alpha \geq \alpha_0$  все лучи целиком отражаются в воду

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n} \text{ (вода - воздух)} \Rightarrow \frac{\sin \alpha_0}{1} = \frac{1}{n} \Rightarrow$$

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{1}{n} \approx 48,8^\circ.$$



# Линзы

Прозрачные тела, ограниченные двумя поверхностями (одна из них обычно сферическая, а другая – сферическая или плоская) и способные преломлять световые лучи и формировать оптические изображения предметов.

# Линзы различаются (по оптическим свойствам)

## 1. Собирающие линзы



Двояковыпуклая

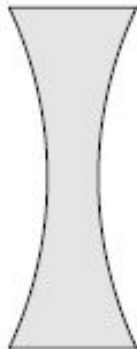


Плосковыпуклая



Вогнуто-выпуклая

## 2. Рассеивающие линзы



Двояковогнутая

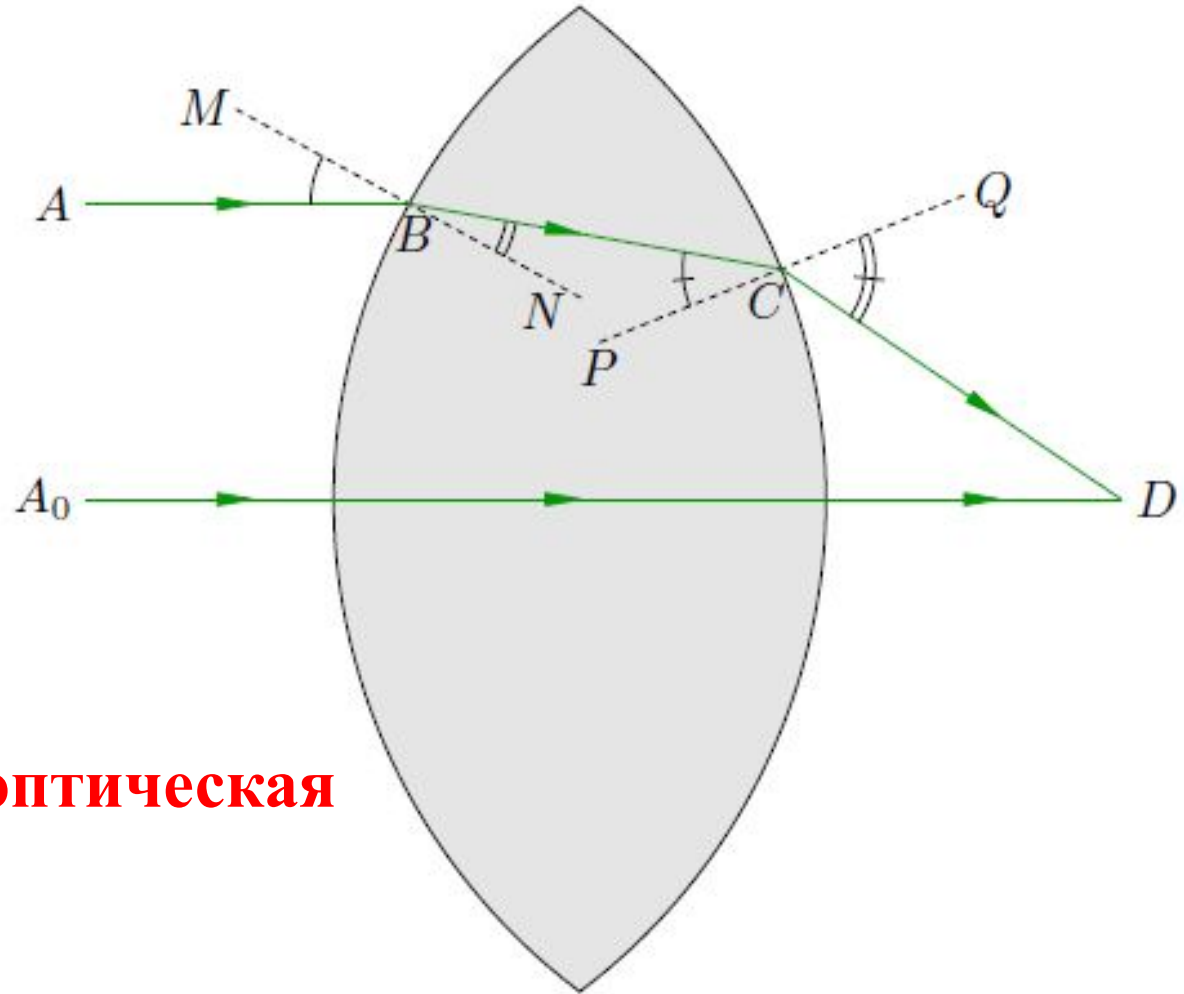


Плосковогнутая



Выпукло-вогнутая

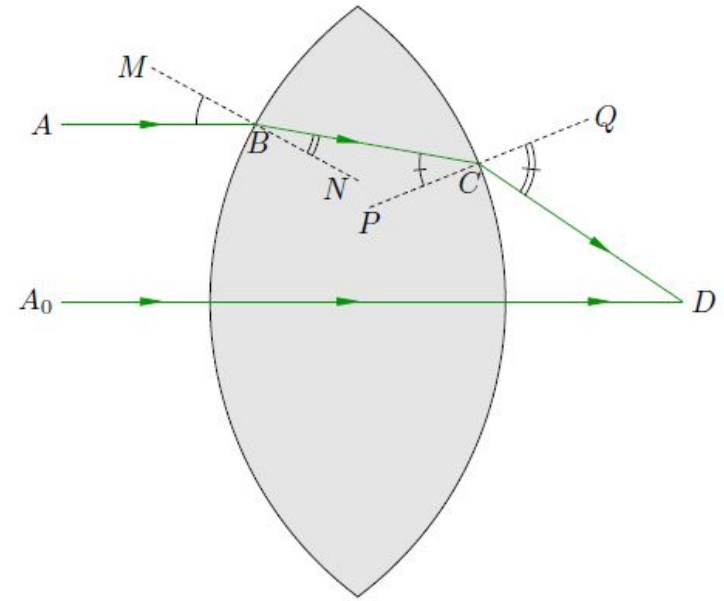
# Ход лучей в двояковыпуклой линзе



$A_0D$  - **главная оптическая ось линзы.**

# Как построить эти лучи?

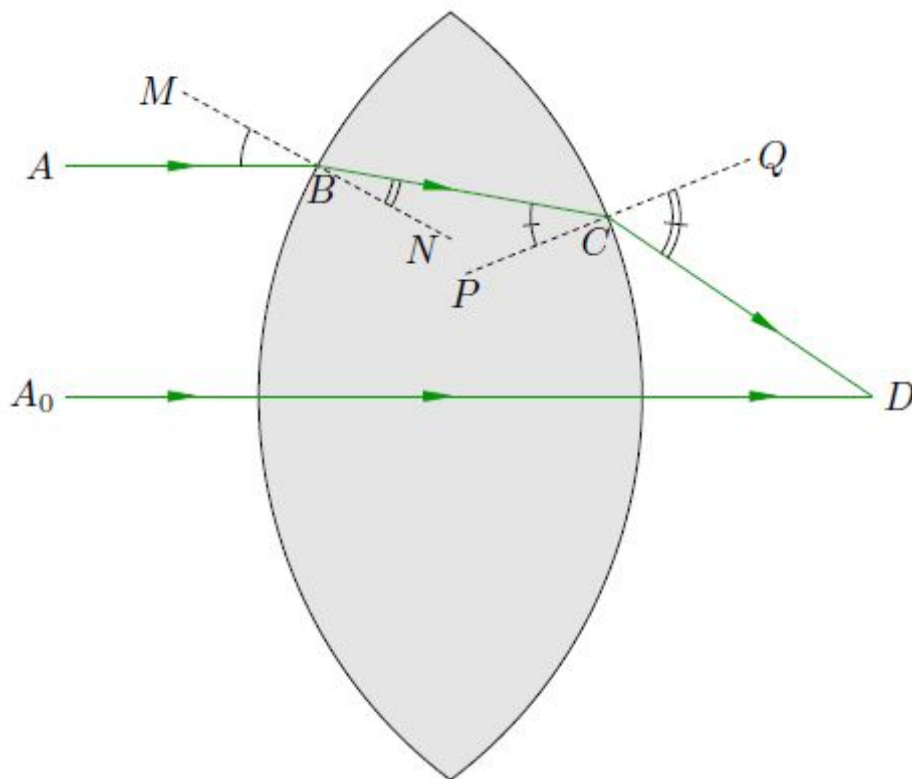
1. Луч, идущий вдоль **главной оптической оси** - оси симметрии линзы. На рисунке этот луч выходит из точки  $A_0$ . Главная оптическая ось **перпендикулярна** обеим сферическим поверхностям, поэтому данный луч идёт сквозь линзу, не преломляясь.



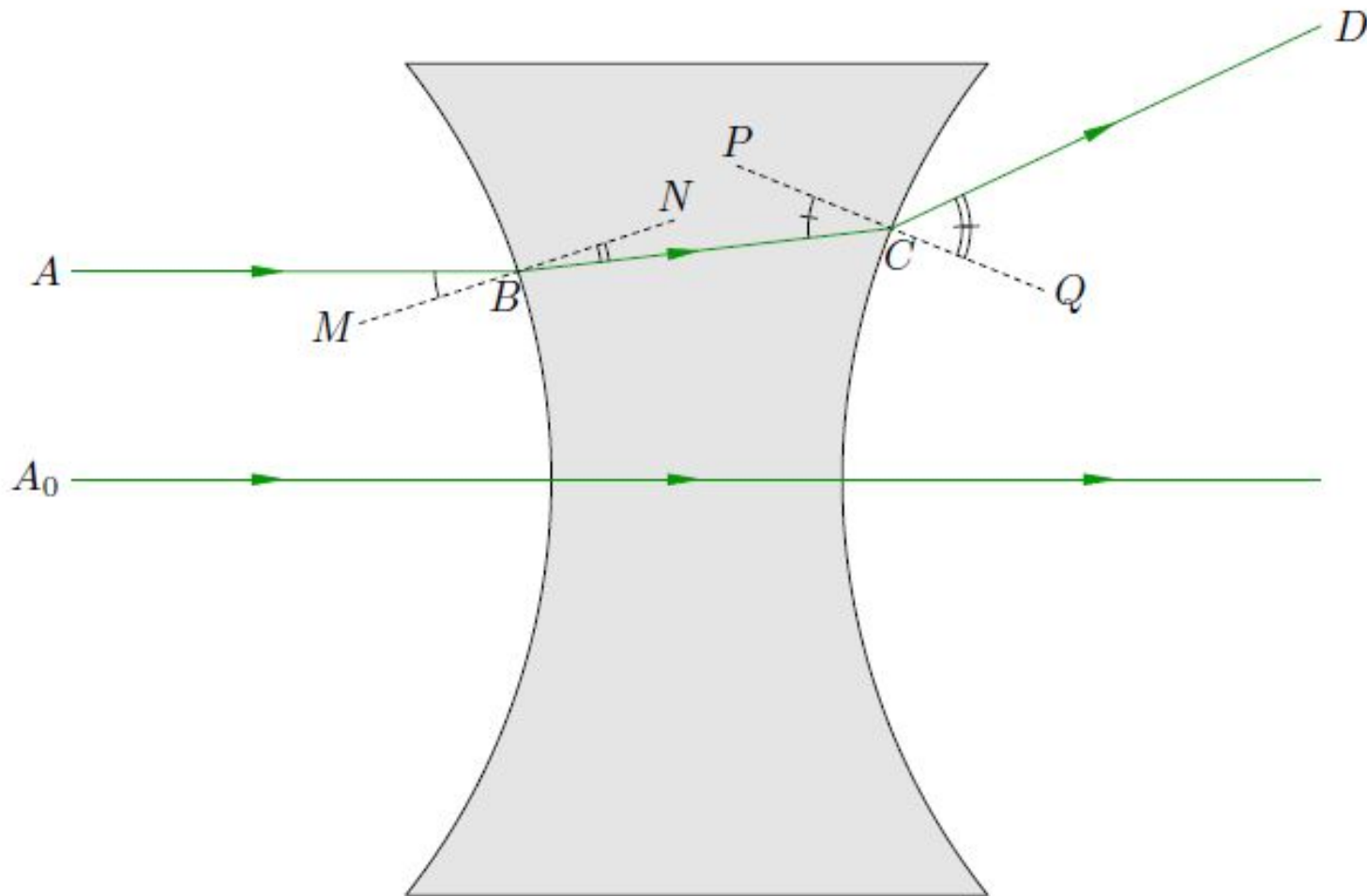
2. Рассмотрим луч  $AB$ , идущий **параллельно главной оптической оси**. В точке  $B$  падения луча на линзу проведена нормаль  $MN$  к поверхности линзы; поскольку луч переходит из воздуха в оптически **более** плотное стекло, угол преломления  $CBN$  меньше угла падения  $ABM$ . Следовательно, преломлённый луч  $BC$  приближается к главной оптической оси.

В точке  $C$  выхода луча из линзы также проведена нормаль  $PQ$ . Луч переходит в оптически **менее** плотный воздух, поэтому угол преломления  $QCD$  больше угла падения  $PCB$ ; луч преломляется опять-таки в сторону главной оптической оси и пересекает её в точке  $D$ .

Таким образом,  
**всякий луч,**  
**параллельный**  
**главной оптической оси,**  
после преломления в  
линзе приближается к  
главной оптической оси и  
**пересекает её.**



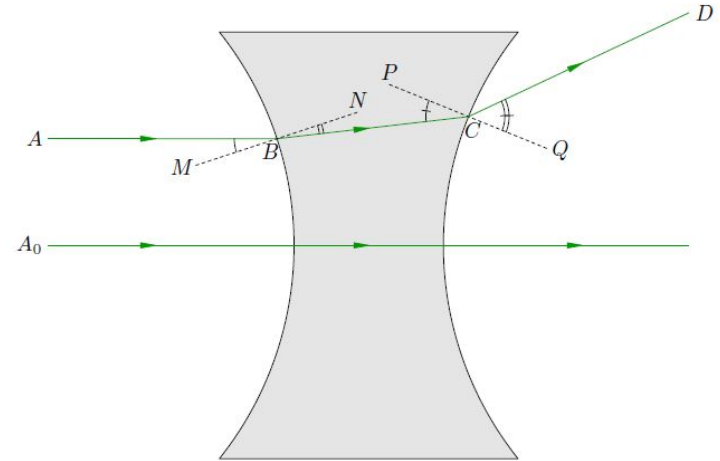
# Ход лучей в двояковогнутой линзе



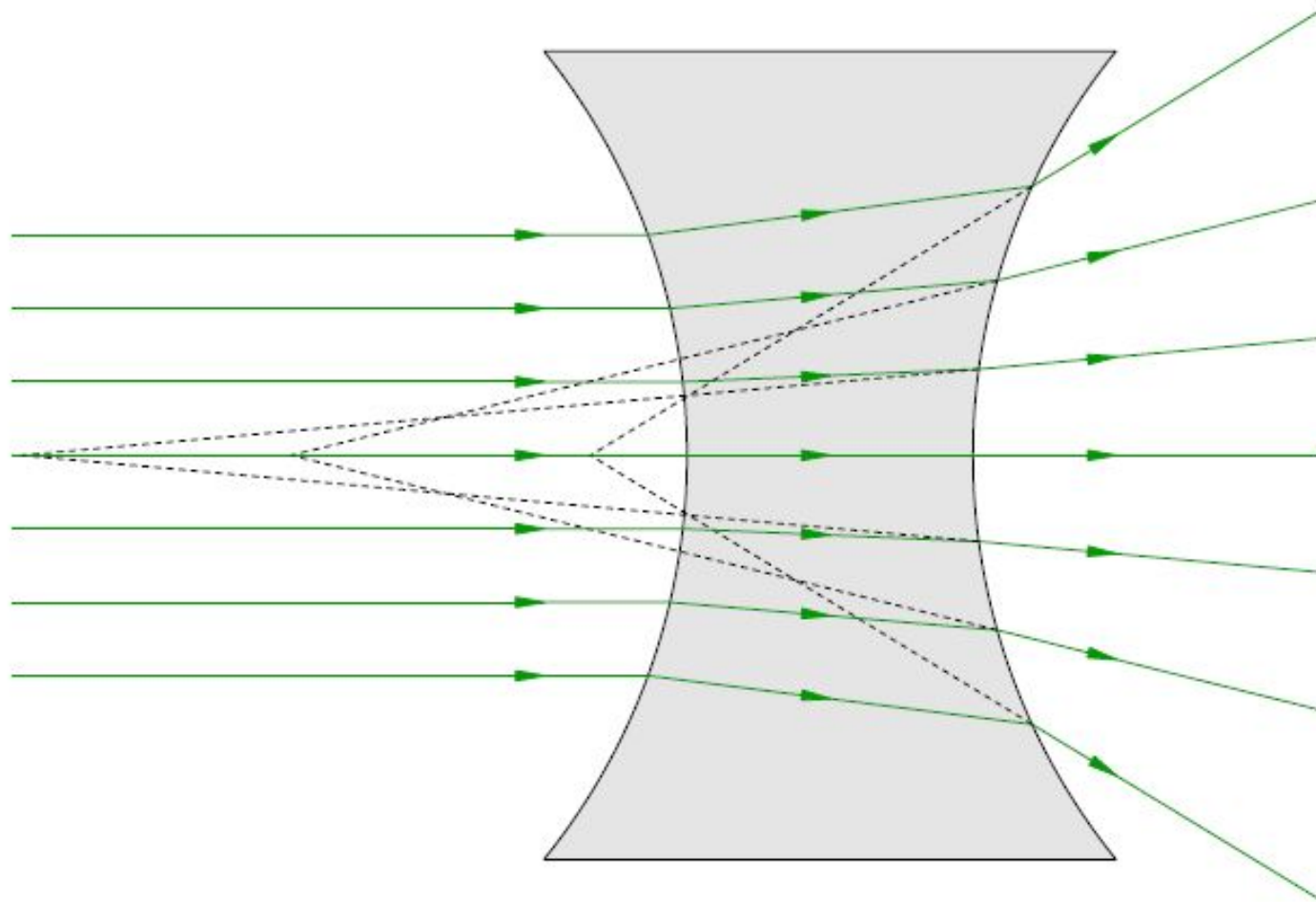


# Как построить эти лучи?

1. Луч, идущий вдоль **главной оптической оси** - оси симметрии линзы. На рисунке этот луч выходит из точки  $A_0$ . Главная оптическая ось **перпендикулярна** обеим сферическим поверхностям, поэтому данный луч идёт сквозь линзу, не преломляясь.



2. Луч  $AB$ , параллельный **главной оптической оси**, после первого преломления начинает **удаляться** от неё (так как при переходе из воздуха в стекло угол  $CBN < ABM$ ), а после второго преломления **удаляется** от главной оптической оси ещё сильнее (так как при переходе из стекла в воздух угол  $QCD > PCB$ ).



**Двояковогнутая линза** преобразует **параллельный пучок** света в расходящийся пучок и поэтому называется **рассеивающей**.

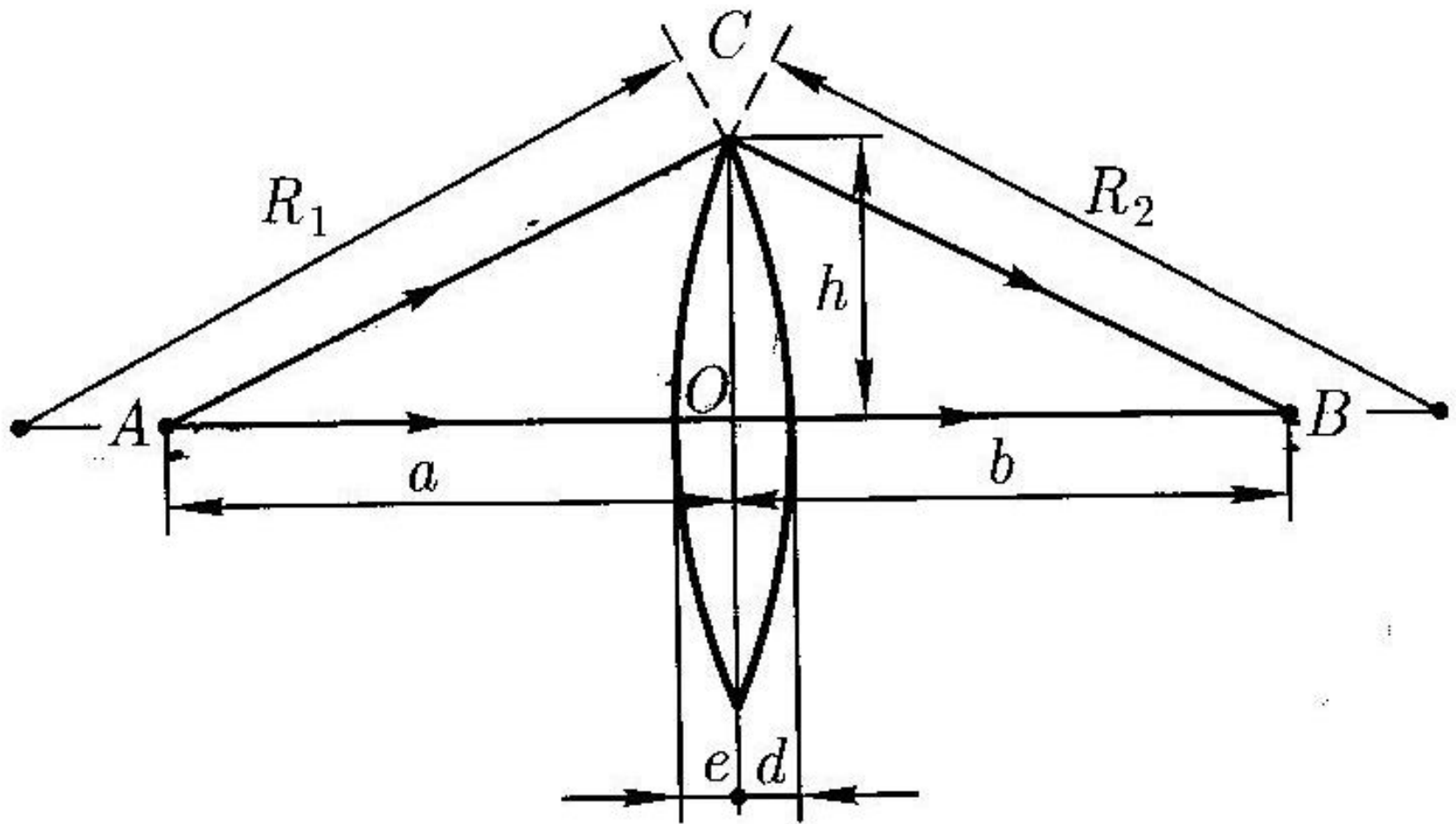
# Тонкая линза

**Линза называется тонкой**, если её толщина (расстояние между ограничивающими поверхностями) значительно меньше радиусов поверхностей, ограничивающих линзу.

Прямая, проходящая через центры кривизны поверхностей линзы, называется **главной оптической осью**.

**Оптический центр линзы  $O$**  – точка, лежащая на главной оптической оси и обладающая тем свойством, что лучи проходят через неё не преломляясь.

# Изображение тонкой линзы



# Формула тонкой линзы

$$\left( \frac{n_l}{n_{cp}} - 1 \right) \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right),$$

$n_l$  – абсолютный показатель преломления **линзы**;

$n_{cp}$  – абсолютный показатель преломления **среды**;

$R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны поверхностей линзы;

$a$  – расстояние от линзы до предмета;

$b$  – расстояние от линзы до изображения.

# Формула тонкой линзы в другой форме:

$$\frac{1}{a} \pm \frac{1}{b} = \pm \frac{1}{f},$$

Для  
рассеивающей линзы  
расстояния  
*f* и *b* считать  
отрицательными.

где  $f$  – фокусное расстояние.

**Фокус** – это точка, в которой после преломления собираются все лучи, падающие на линзу **параллельно** главной оптической оси.

**Фокусное расстояние**  $f$  – расстояние от точки  $O$  до фокуса.

**Оптическая сила линзы** – величина, обратная фокусному расстоянию.

$$D_{\text{опт}} = \frac{1}{f}; \quad [D] = \frac{1}{\text{м}} = 1$$

**Собирающие линзы** – линзы с положительной оптической силой.

**Рассеивающие линзы** – линзы с отрицательной оптической силой.

**Фокальная плоскость** – плоскости, проходящие через фокусы линзы перпендикулярно её главной оптической оси.

# Построение изображения предмета в линзах осуществляется с помощью следующих лучей:

- луча, проходящего через оптический центр линзы и не изменяющего своего направления;
- луча, идущего параллельно главной оптической оси; после преломления в линзе этот луч (или его продолжение) проходит через второй фокус линзы;
- луча (или его продолжения), проходящего через первый фокус линзы после преломления в ней он выходит из линзы параллельно её главной оптической оси.

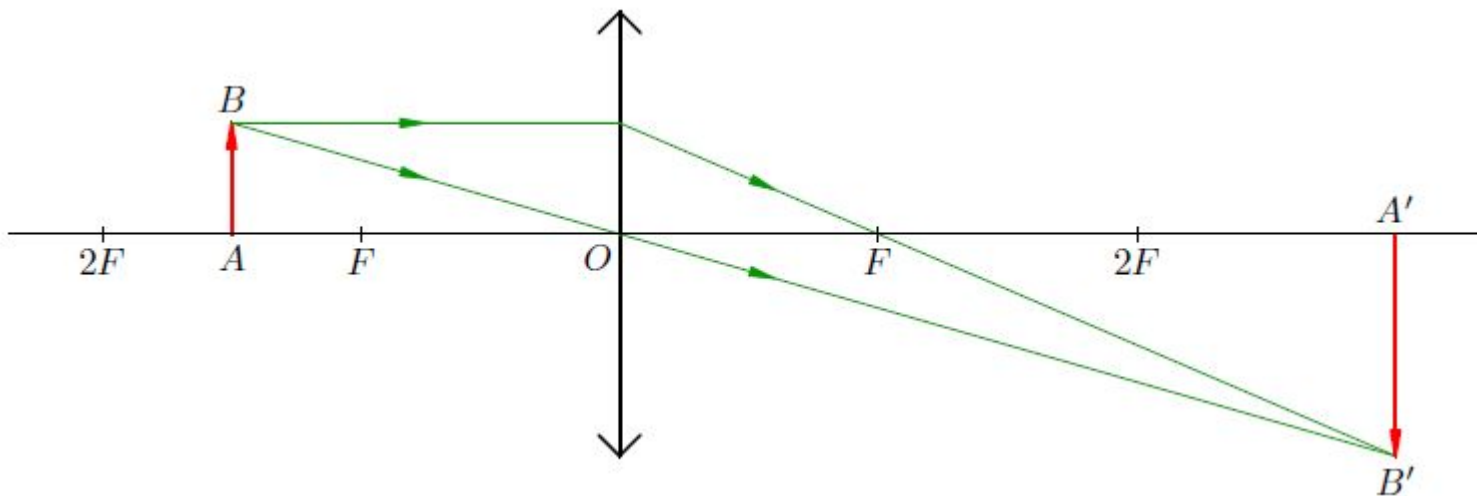


**Линейное увеличение линзы  $\Gamma$**  – отношение линейных размеров изображения и предмета.

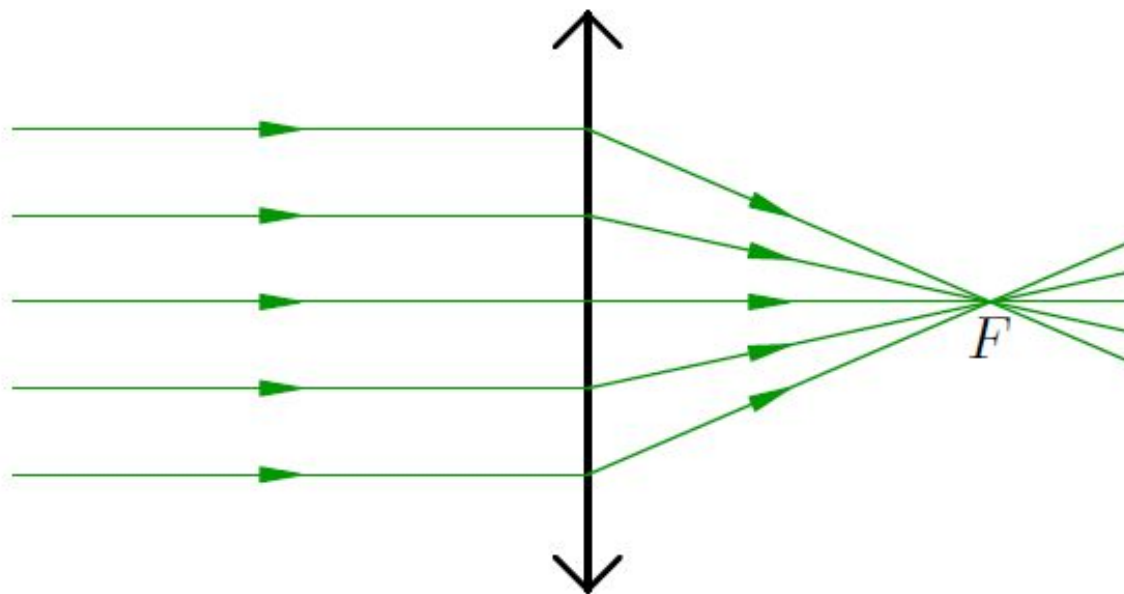
$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{A'B'}{AB} = \frac{b}{a},$$

**$H$**  – размер изображения,  
 **$h$**  – размер предмета.

Отрицательным значениям линейного увеличения соответствует **действительное изображение**, (оно перевернутое),  
положительным – **мнимое изображение** (оно прямое).

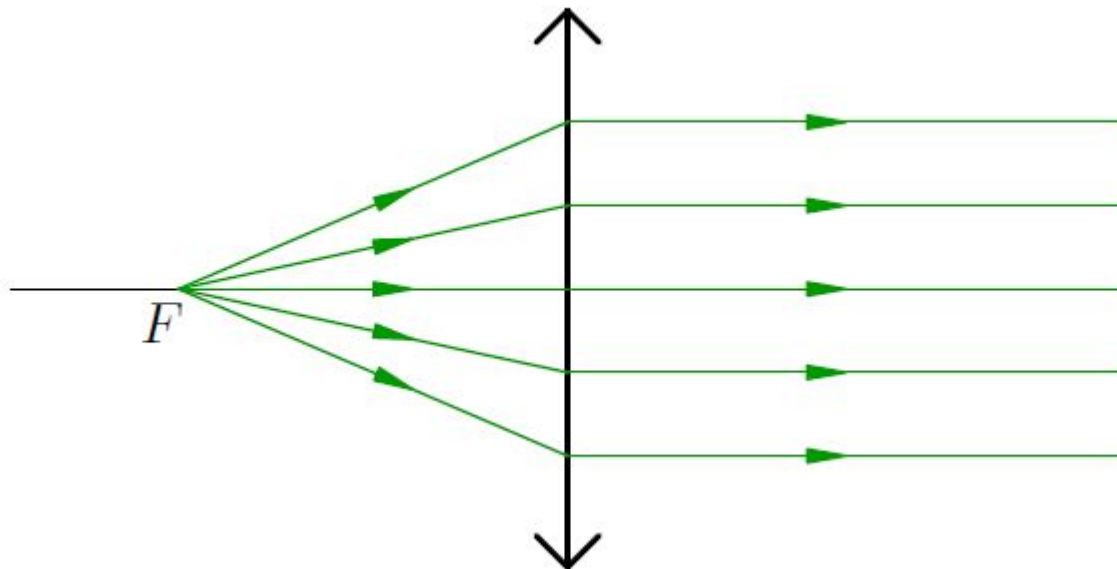


**Пучок параллельных лучей,  
падающих на собирающую линзу,  
параллельно главной оптической оси**

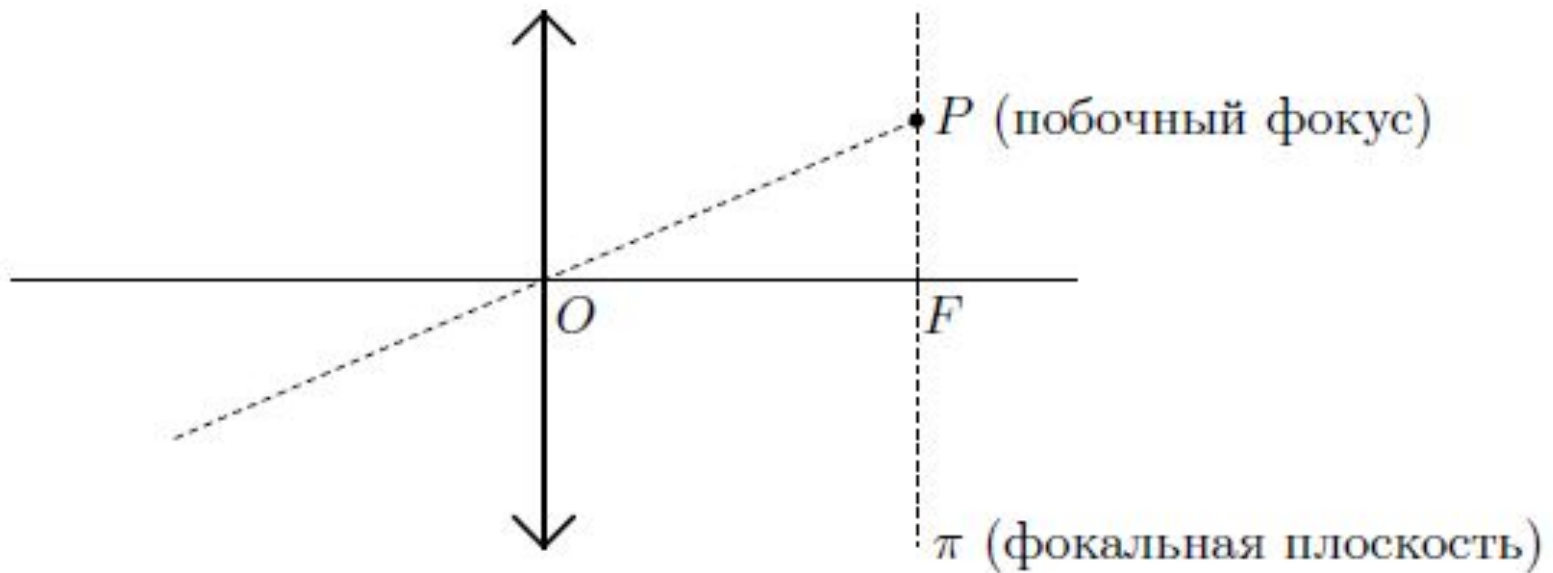


Параллельный пучок собирается в **главном фокусе.**

Если в главном фокусе **собирающей линзы** находится точечный источник света, то на выходе из линзы получится световой пучок, **параллельный** главной оптической оси



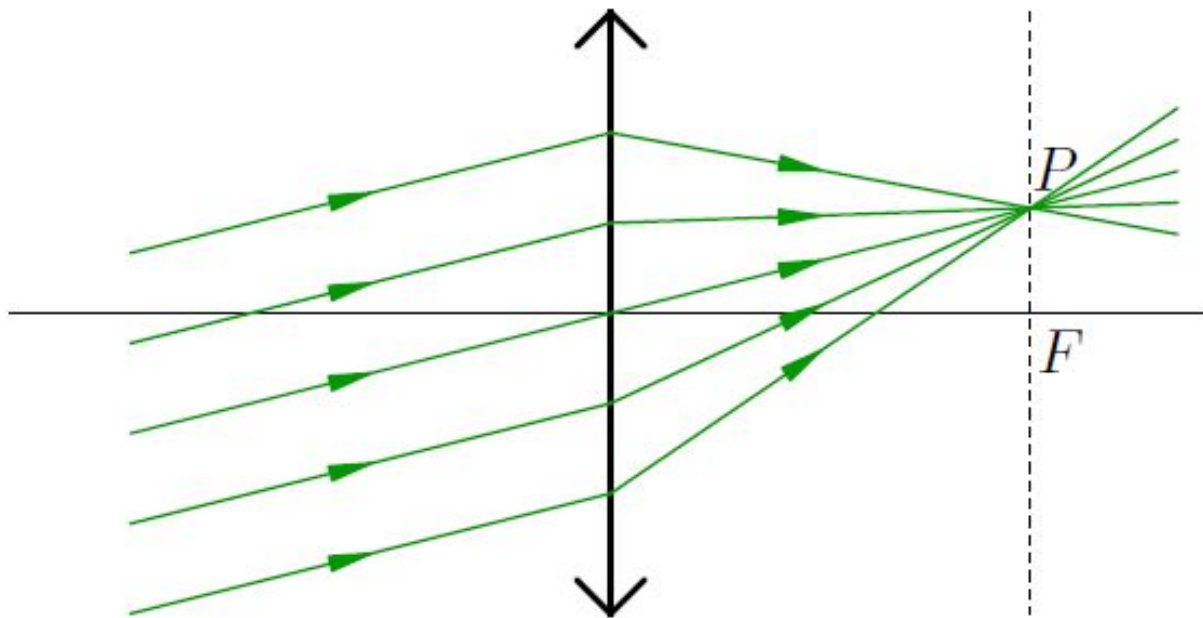
**Преломление** пучка, идущего из **главного фокуса**.



**Побочная оптическая ось  $OP$**  – прямая, проходящая через **оптический центр линзы** и отличная от главной оптической оси.

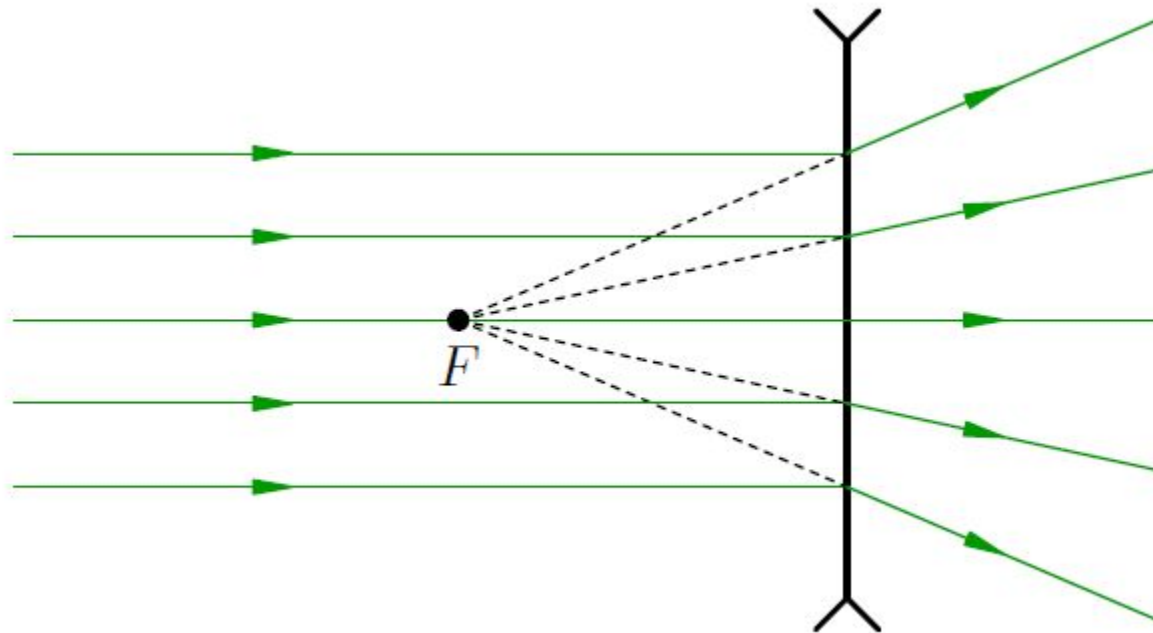
**Побочный фокус  $P$**  – точка, в которой побочная оптическая ось пересекает фокальную плоскость.

## Пучок параллельных лучей, падающих на собирающую линзу наклонно



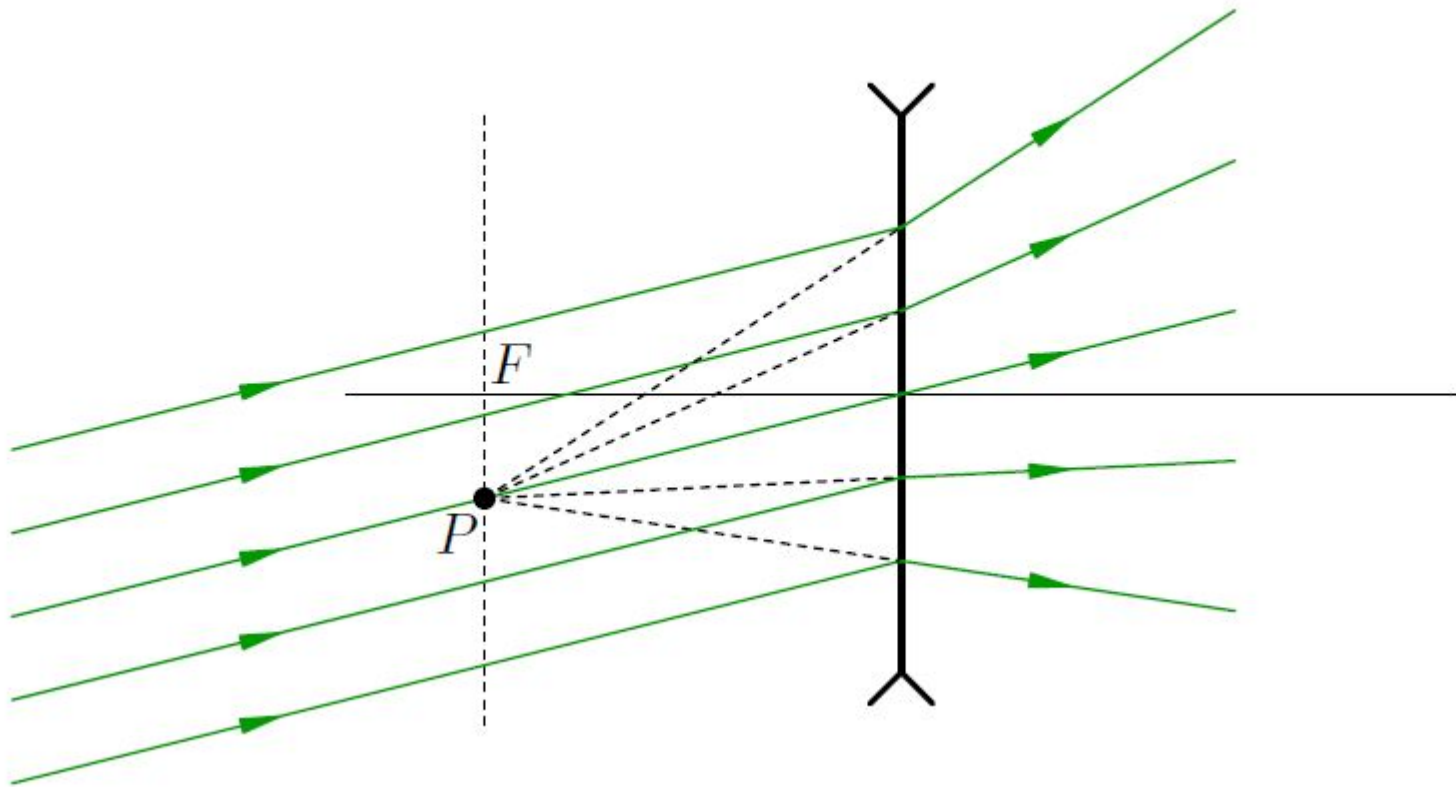
Параллельный пучок собирается в **побочном фокусе.**

# Пучок параллельных лучей, падающих на рассеивающую линзу, параллельно главной оптической оси



Образуется **расходящийся** пучок, как бы выходящий из **главного фокуса**.

# Пучок параллельных лучей, падающих на рассеивающую линзу наклонно



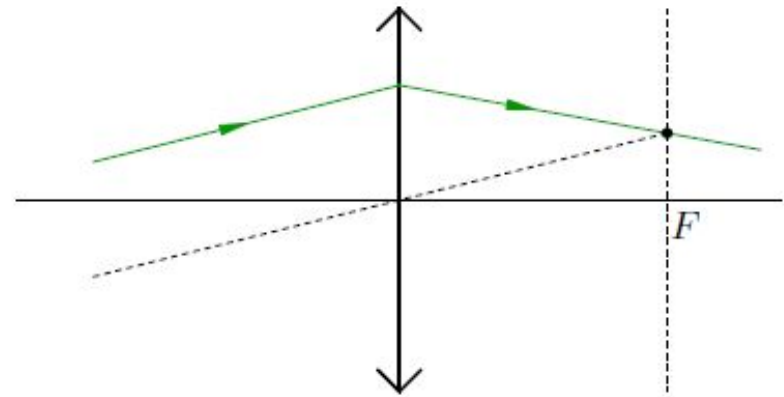
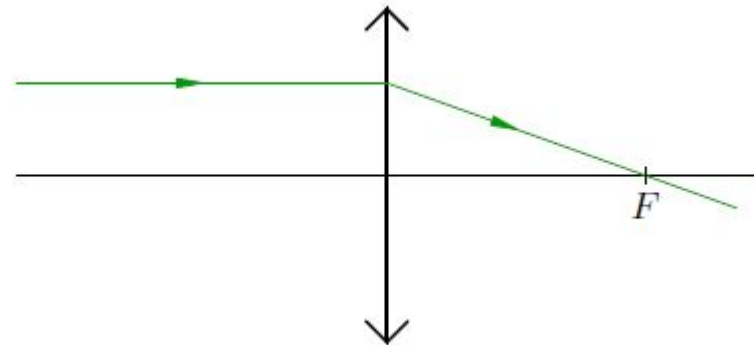
Продолжения лучей расходящегося пучка соберутся в **побочном фокусе  $P$** .

# Правила построения изображений в собирающей линзе

1. Луч, идущий через оптический центр линзы, не преломляется.

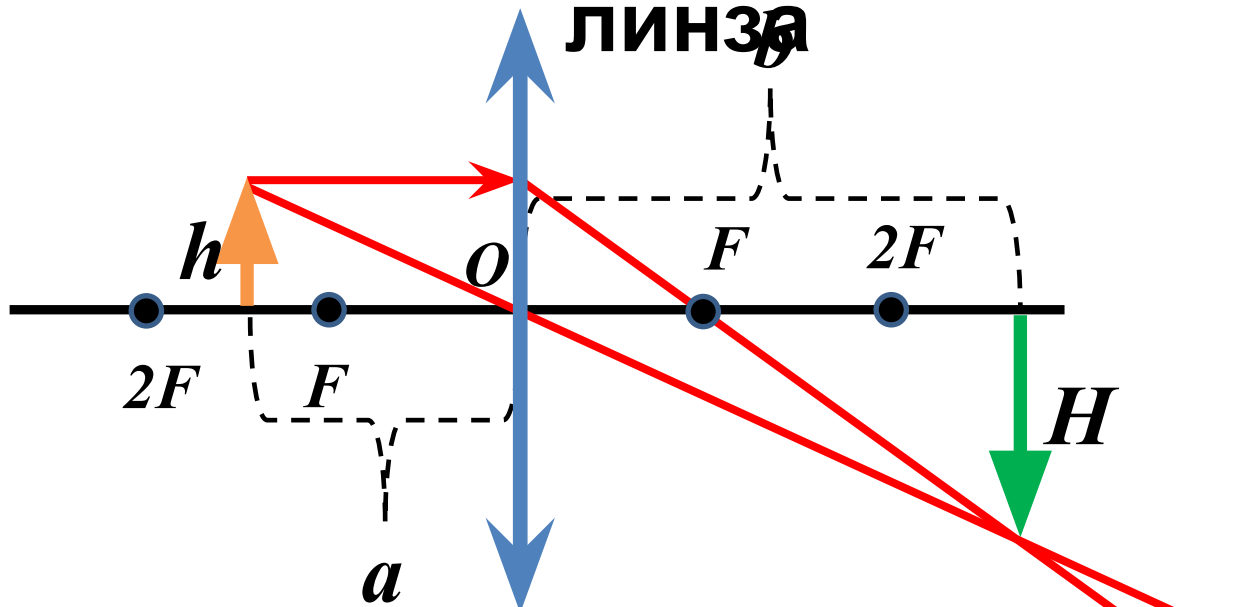
2. Луч, идущий параллельно главной оптической оси линзы, после преломления пойдёт через главный фокус.

3. Если луч падает на линзу наклонно, то для построения его дальнейшего хода мы проводим побочную оптическую ось, параллельную этому лучу, и находим соответствующий побочный фокус. Вот через этот побочный фокус и пойдёт преломлённый луч.





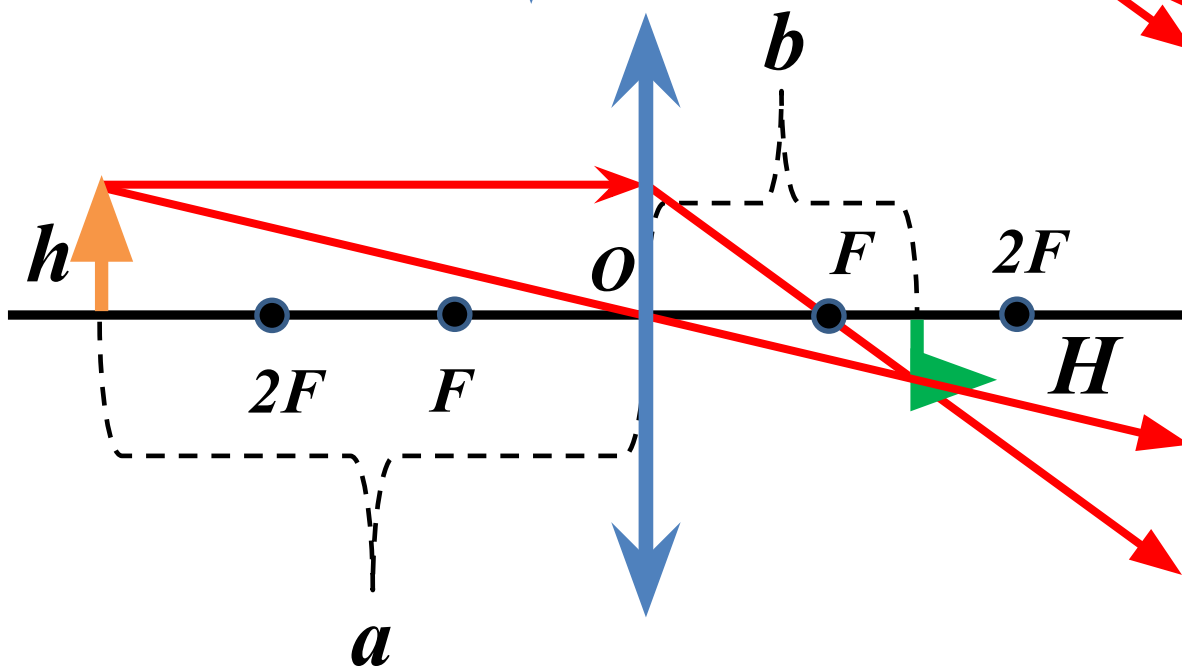
# Собирающая линза



Изображение:

- Увеличенное;
- Действительно
- Перевернутое.

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f},$$

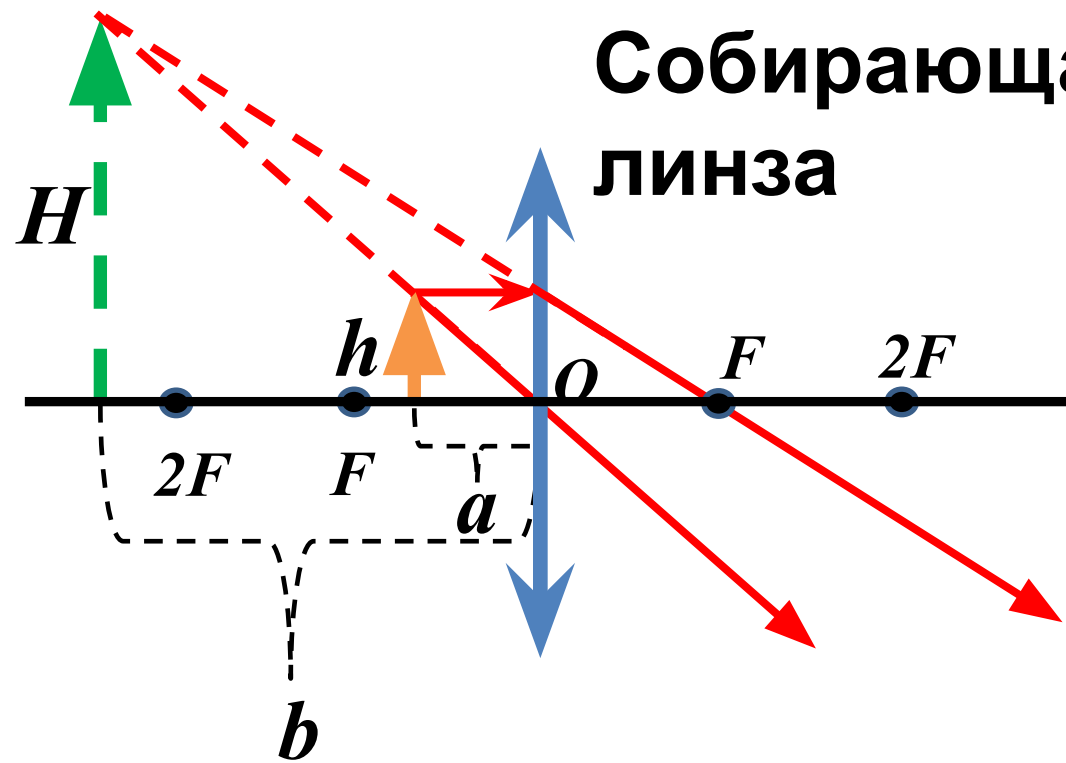


Изображение:

- Уменьшенное;
- Действительно
- Перевернутое.

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f},$$

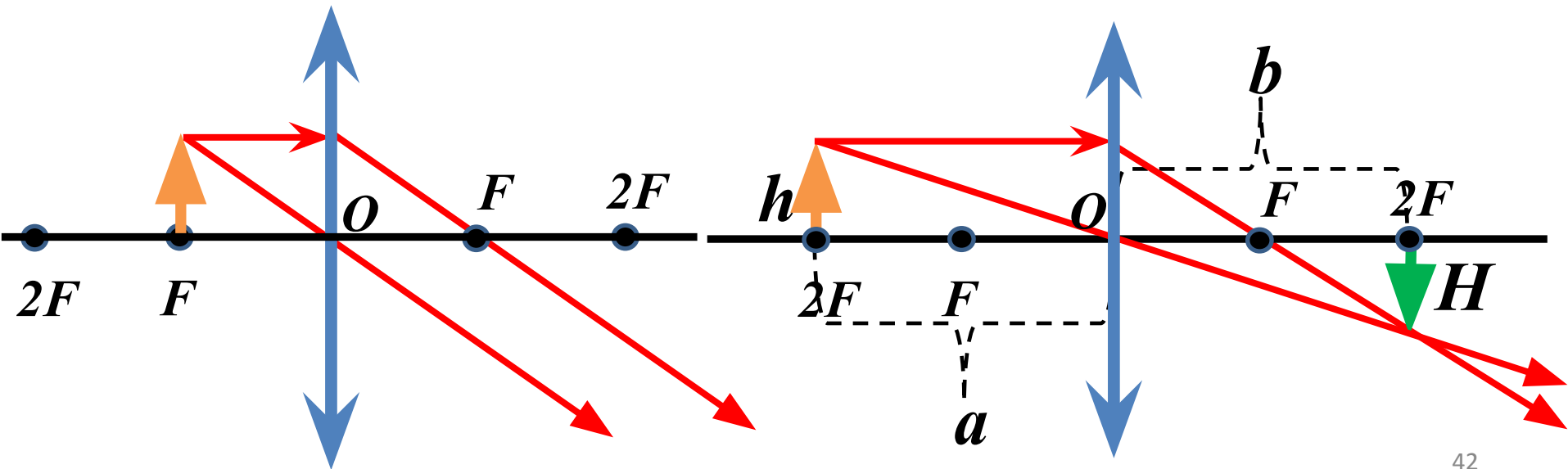
# Собирающая линза



Изображение:

- Увеличенное;
- Мнимое;
- Неперевернуто е.

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = \frac{1}{f'}$$

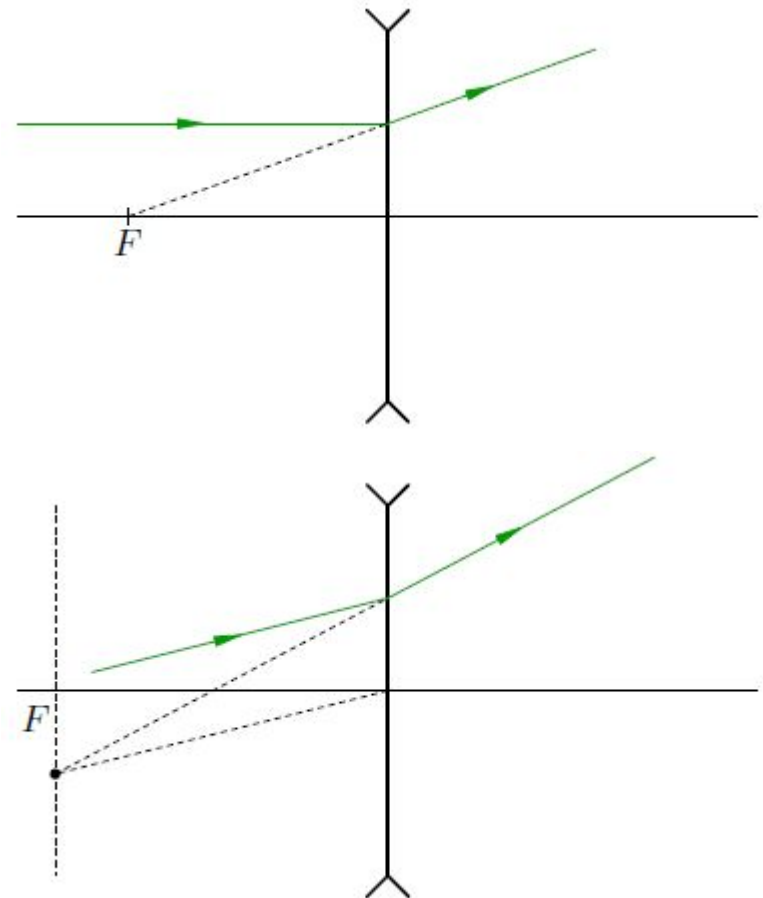


# Правила построения изображений в рассеивающей линзе

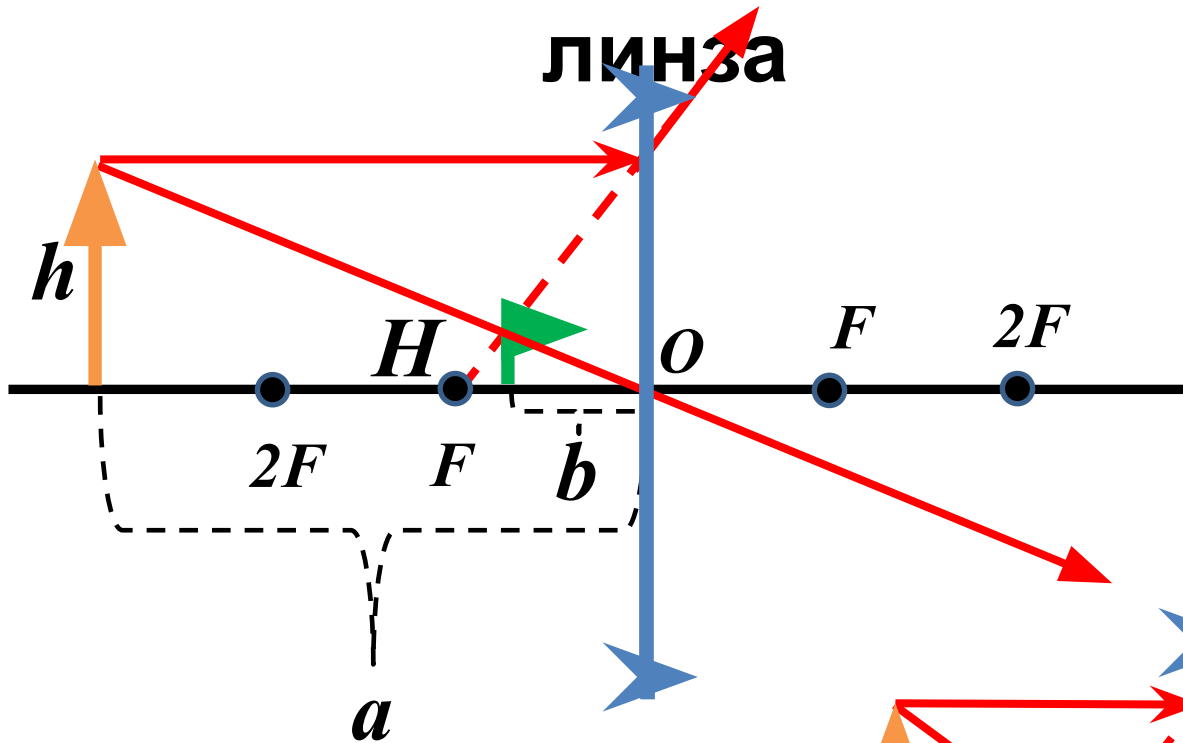
1. Луч, идущий через оптический центр линзы, не преломляется.

2. Луч, идущий параллельно главной оптической оси линзы, после преломления начнёт удаляться от главной оптической оси; при этом продолжение преломлённого луча пройдёт через главный фокус.

3. Если луч падает на линзу наклонно, то мы проводим побочную оптическую ось, параллельную этому лучу, и находим соответствующий побочный фокус. Преломлённый луч пойдёт так, словно он исходит из этого побочного фокуса.



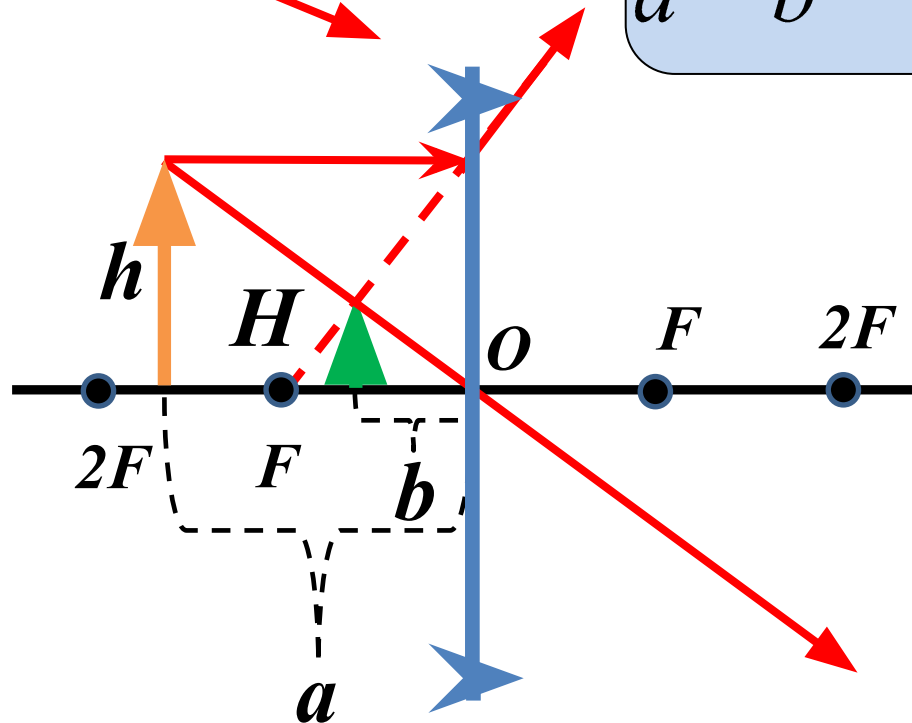
# Рассеивающая линза



Изображение:

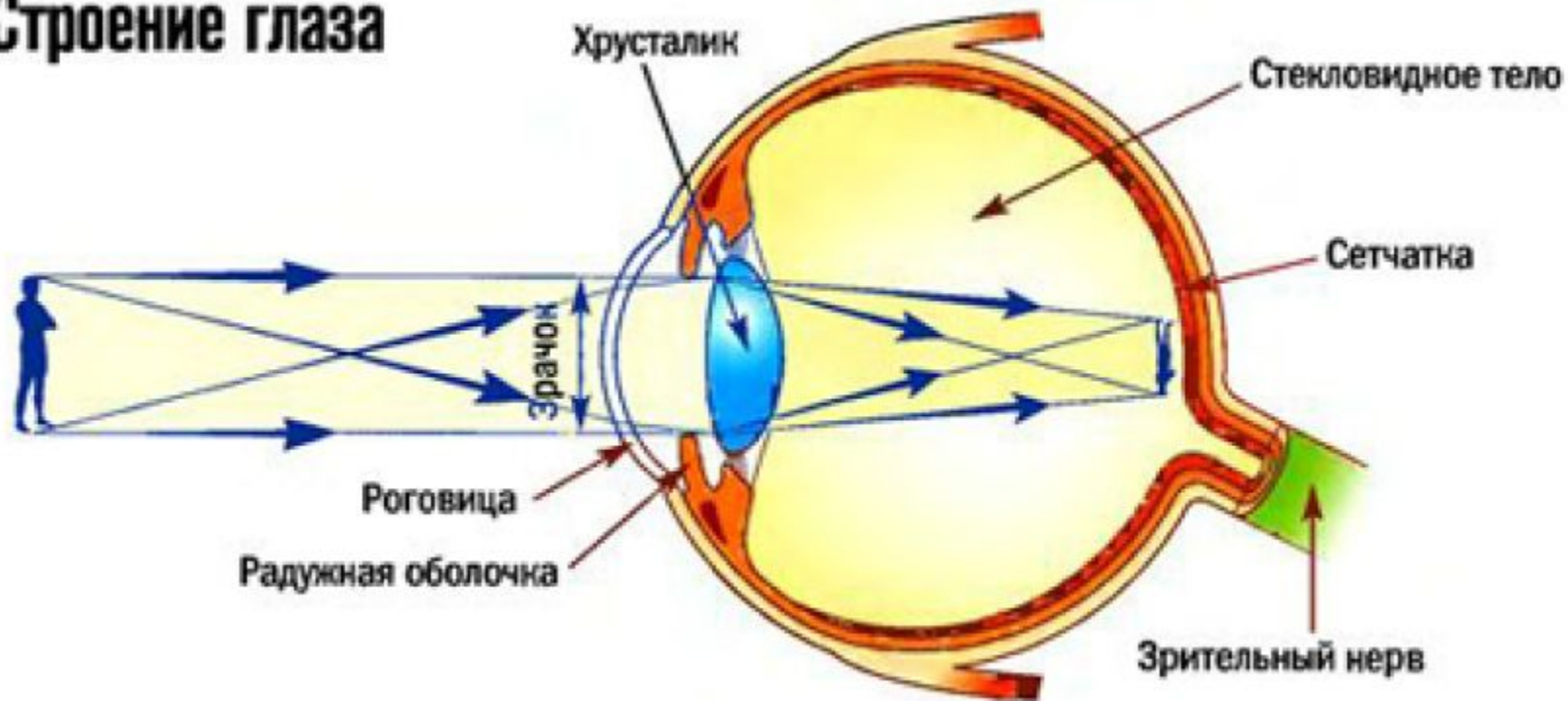
- Уменьшенное;
- Мнимое;
- Неперевёрнуто

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = -\frac{1}{f},$$

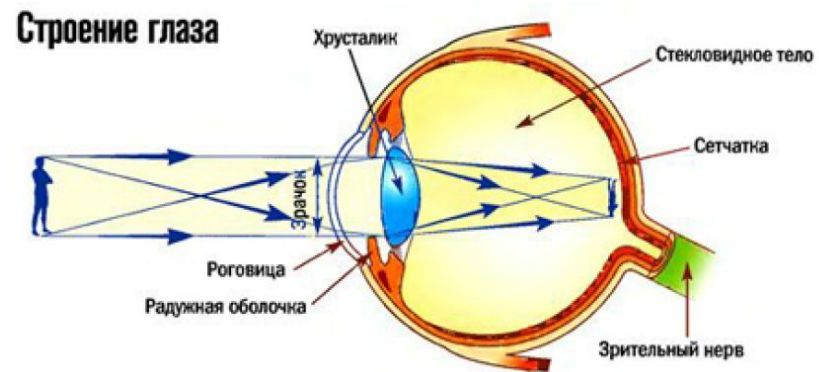


# Строение глаза человека

## Строение глаза



Лучи, идущие от предмета (в данном случае предметом является фигура человека), попадают на **роговицу** - переднюю прозрачную часть защитной оболочки глаза. Преломляясь в роговице и проходя сквозь **зрачок** (отверстие в **радужной оболочке** глаза), лучи испытывают вторичное преломление в **хрусталике**.



**Изображение разглядываемого предмета на сетчатке - действительное, перевёрнутое и уменьшенное.**

**Хрусталик** является собирающей линзой с переменным фокусным расстоянием; он может менять свою кривизну (и тем самым фокусное расстояние) под действием специальной глазной мышцы.

Преломляющая система роговицы и хрусталика формирует на **сетчатке** изображение предмета. Сетчатка состоит из светочувствительных палочек и колбочек - нервных окончаний **зрительного нерва**. Падающий свет вызывает раздражение этих нервных окончаний, и зрительный нерв передаёт соответствующие сигналы в мозг. Так в нашем сознании формируются образы предметов - мы *видим* окружающий мир.

# АККОМОДАЦИЯ

Представьте себе, что вы смотрите на приближающегося к вам человека. Вы всё время чётко его видите.

Каким образом глазу удаётся это обеспечивать?

Вспомним формулу линзы:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f},$$

- $a$  — это расстояние от глаза до предмета,
- $b$  — расстояние от хрусталика до сетчатки,
- $f$  — фокусное расстояние оптической системы глаза.

Величина  **$b$**  является неизменной, поскольку это геометрическая характеристика глаза.

Чтобы формула линзы оставалась справедливой, вместе с расстоянием  **$a$**  до разглядываемого предмета должно меняться и фокусное расстояние  **$f$** .

Глазная мышца деформирует хрусталик, делая его более выпуклым и уменьшая тем самым фокусное расстояние нужной величины. При удалении предмета, наоборот, кривизна хрусталика уменьшается, а фокусное расстояние возрастает. Описанный механизм самонастройки глаза называется **аккомодацией**.

**Аккомодация** — это способность глаза отчётливо видеть предметы на различных расстояниях. В процессе аккомодации кривизна хрусталика меняется так, что изображение предмета всегда оказывается на сетчатке.

Аккомодация глаза совершается бессознательно и очень быстро.

Эластичный хрусталик может легко менять свою кривизну в определённых пределах.

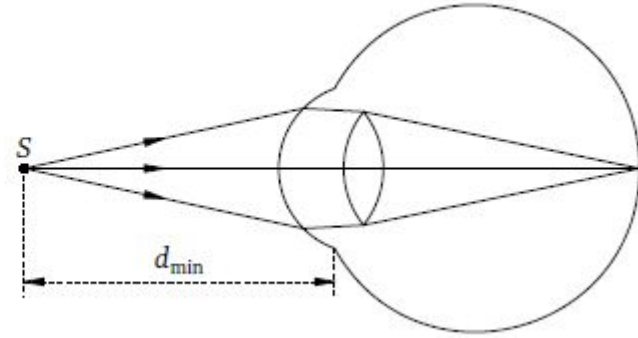
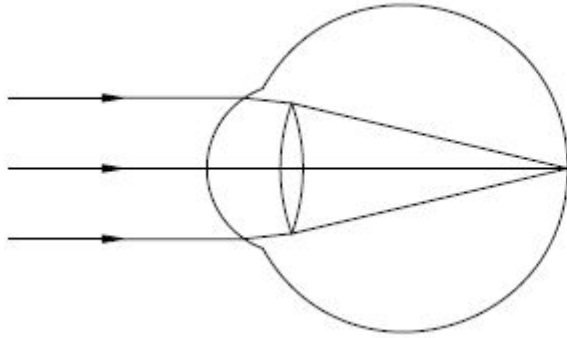
Этим естественным пределам деформации хрусталика отвечает область аккомодации — диапазон расстояний, на которых глаз способен чётко видеть предметы.

### Границы аккомодации:

- **Дальняя точка аккомодации** — это точка нахождения предмета, изображение которого на сетчатке получается при расслабленной глазной мышце, т. е. когда хрусталик не деформирован.
- **Ближняя точка аккомодации** — это точка нахождения предмета, изображение которого на сетчатке получается при наибольшем напряжении глазной мышцы, т. е. при максимально возможной деформации хрусталика.

Дальняя точка аккомодации нормального глаза находится на бесконечности: в ненапряжённом состоянии глаз фокусирует параллельные лучи на сетчатке. Иными словами, фокусное расстояние оптической системы нормального глаза при недеформированном хрусталике равно расстоянию от хрусталика до





Ближняя точка аккомодации нормального глаза расположена на некотором расстоянии  $d_{\min}$  от него.

Это расстояние с возрастом увеличивается.

У десятилетнего ребёнка  $d_{\min} \approx 7$  см;

в возрасте 30 лет  $d_{\min} \approx 15$  см;

к 45 годам ближняя точка аккомодации находится уже на расстоянии 20–25 см от глаза.

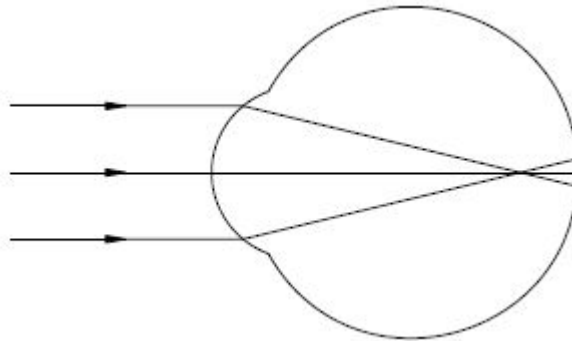
# Близорукос

## ТЬ

Напомним, что фокусное расстояние нормального глаза в расслабленном состоянии равно расстоянию от оптического центра до сетчатки. Нормальный глаз фокусирует параллельные лучи на сетчатке и поэтому может чётко видеть удалённые предметы, не испытывая напряжения.

**Близорукость** — это дефект зрения, при котором фокусное расстояние расслабленного глаза меньше расстояния от оптического центра до сетчатки.

Близорукий глаз фокусирует параллельные лучи перед сетчаткой, и от этого изображения удалённых объектов оказываются размытыми.



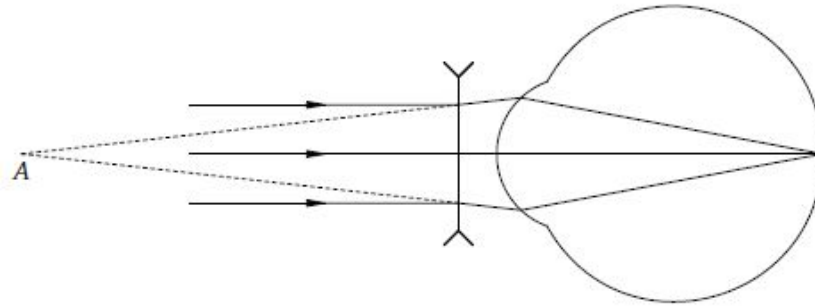
Если у человека с нормальным зрением дальняя точка аккомодации находится на бесконечности, то у близорукого человека дальняя точка аккомодации расположена на конечном расстоянии перед ним.

Соответственно, ближняя точка аккомодации у близорукого глаза находится ближе, чем у нормального.

Расстояние наилучшего зрения для близорукого человека меньше 25 см.

Близорукость корректируется с помощью очков с рассеивающими линзами.

Проходя через рассеивающую линзу, параллельный пучок света становится расходящимся, в результате чего изображение бесконечно удалённой точки отодвигается на сетчатку. Если при этом мысленно продолжить расходящиеся лучи, попадающие в глаз, то они соберутся в дальней точке аккомодации А.

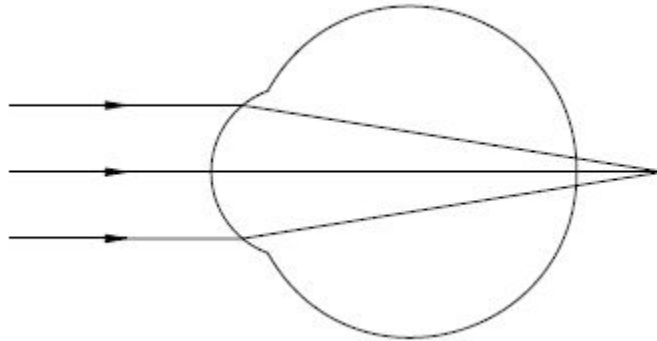


Таким образом, близорукий глаз, вооружённый подходящими очками, воспринимает параллельный пучок света как исходящий из дальней точки аккомодации.

Вот почему близорукий человек в очках может отчётливо рассматривать удалённые предметы без напряжения в глазах. Из рисунка мы видим также, что фокусное расстояние подходящей линзы равно расстоянию от глаза до дальней точки аккомодации.

# Дальнозоркос

**Дальнозоркость** — это дефект зрения, при котором фокусное расстояние расслабленного глаза больше расстояния от оптического центра до сетчатки. Дальнозоркий глаз фокусирует параллельные лучи за сетчаткой, отчего изображения удалённых объектов оказываются размытыми

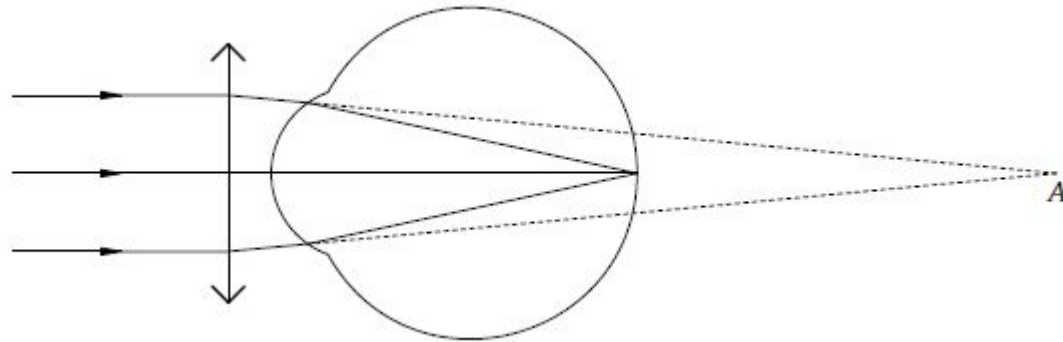


На сетчатке же фокусируется сходящийся пучок лучей. Поэтому дальняя точка аккомодации дальнозоркого глаза оказывается мнимой: в ней пересекаются мысленные продолжения лучей сходящегося пучка, попадающего на глаз.

Ближняя точка аккомодации у дальнозоркого глаза расположена дальше, чем у нормального.

Расстояние наилучшего зрения для дальнозоркого человека больше 25 см.

Дальнозоркость корректируется с помощью очков с собирающими линзами. После прохождения собирающей линзы параллельный пучок



Параллельные лучи после преломления в линзе идут так, что продолжения преломлённых лучей пересекаются в дальней точке аккомодации **A**.

Поэтому дальновзоркий человек, вооружённый подходящими очками, будет отчётливо и без напряжения рассматривать удалённые предметы.

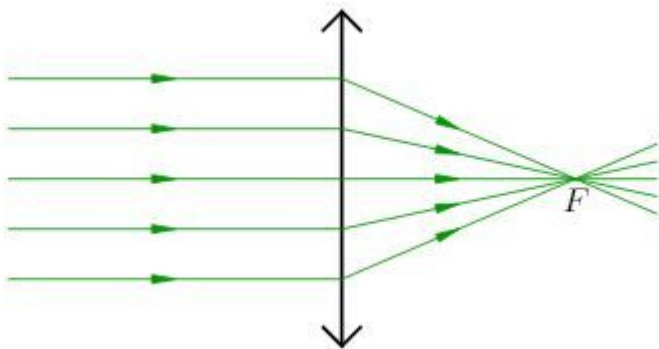
# АБЕРРАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**Аберрация оптической системы** — ошибка или погрешность изображения в оптической системе, вызываемая отклонением луча от того направления, по которому он должен был бы идти в идеальной оптической системе.

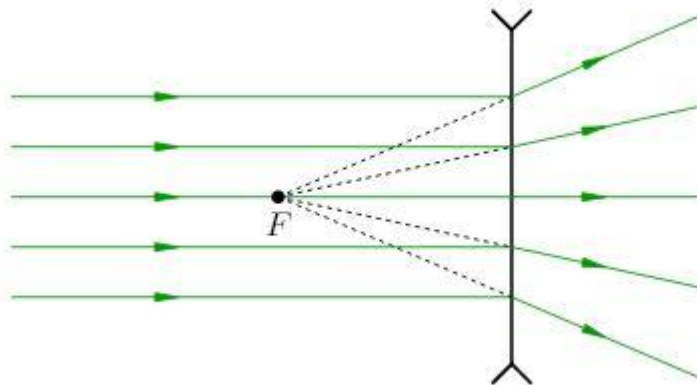
## 1. СФЕРИЧЕСКАЯ АБЕРРАЦИЯ

**Сферическая аберрация** — аберрация оптических систем возникающая из-за несовпадения фокусов для лучей света, проходящих на разных расстояниях от оптической оси.

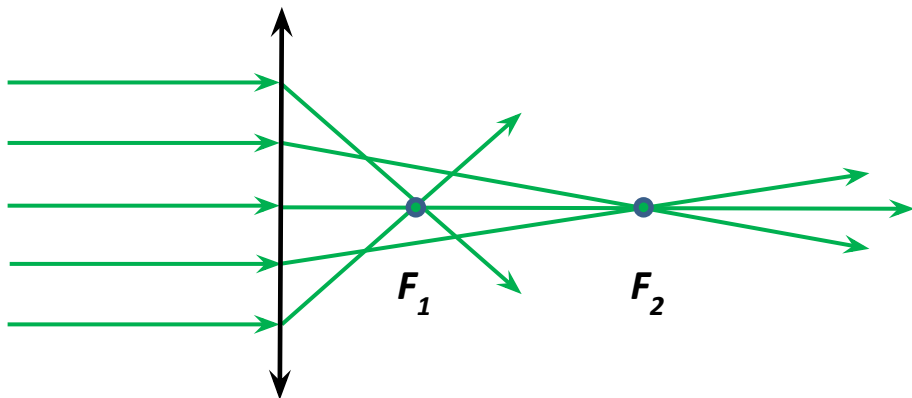
### Ход лучей в тонкой собирающей линзе



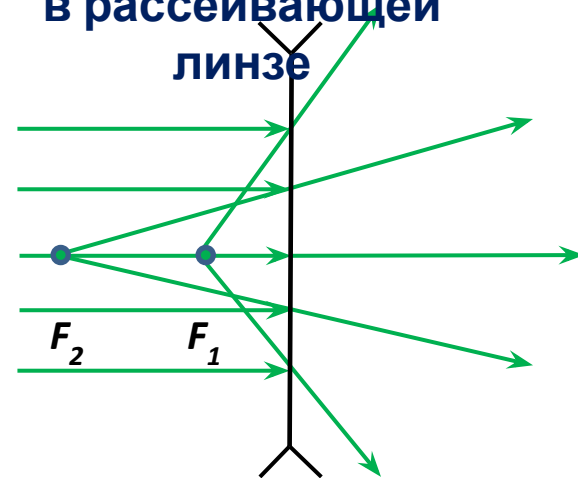
### Ход лучей в тонкой рассеивающей линзе



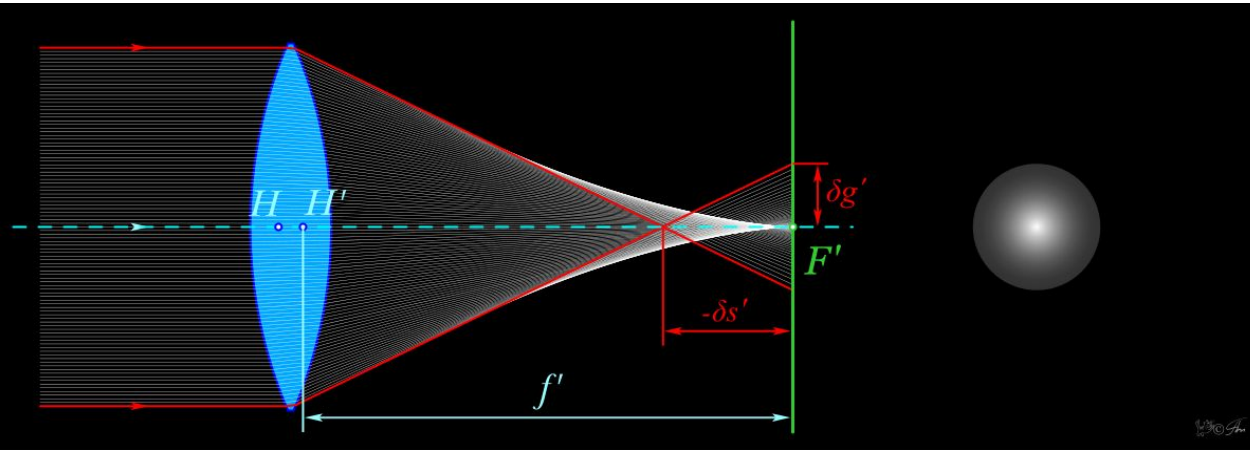
### Сферическая аберрация в собирающей линзе



### Сферическая аберрация в рассеивающей линзе



Сферическая aberrация линзы объясняется тем, что её преломляющие поверхности встречают отдельные лучи **широкого пучка** под различными углами. Вследствие чего, более удалённые от оптической оси лучи преломляются сильнее, нежели параксиальные лучи, и образуют свои точки схода удалённые от фокальной плоскости.



- Величина смещения фокальной точки вдоль оптической оси называется **продольной сферической aberrацией**.
- Радиус кружка рассеяния называется **поперечной сферической aberrацией**.

$H, H'$  — положения главных плоскостей;  
 $F'$  — задняя фокальная плоскость;  
 $f'$  — заднее фокусное расстояние;  
 $\delta s'$  — продольная сферическая aberrация;  
 $\delta g'$  — поперечная сферическая aberrация.

**Сферическая aberrация влияет на всю площадь изображения (от центра до его краев). Получается мягкое низко-контрастное изображение, которое кажется как будто покрытым тонкой вуалью.**

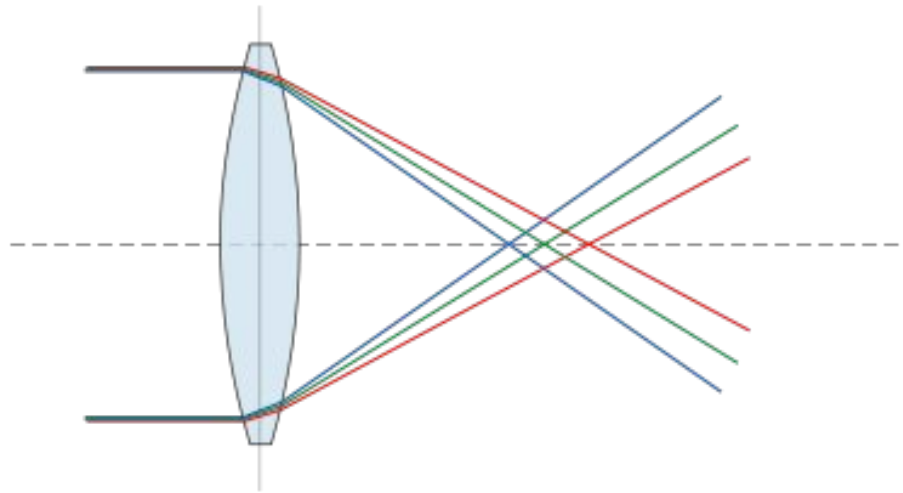


# Уменьшение сферической аберрации

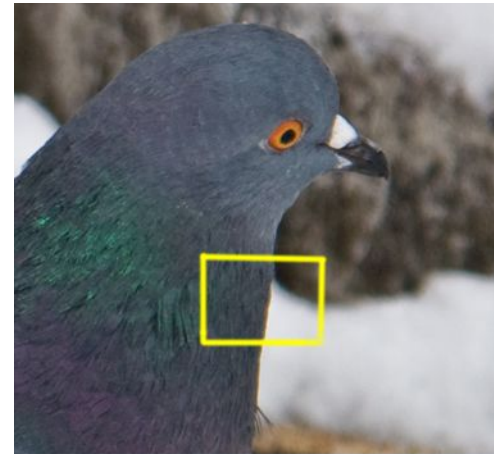
1. Применение оптических стёкол с высокими показателями преломления позволяют уменьшить сферическую аберрацию, посредством **увеличения радиусов поверхностей линзы** при сохранении её оптической силы.
2. **Диафрагмирование оптической системы**, так как при этом отсекаются краевые лучи широкого пучка.
3. **Комбинация положительной и отрицательной линз разной степени симметричности (различия в величине радиуса кривизны двух оптических поверхностей)** Причём, если линзы не склеиваются, то, кроме кривизны поверхностей компонентов, на величину сферической аберрации будет влиять и величина воздушного зазора.
4. Для линз с разной кривизной поверхностей будет **иметь значение ориентация линзы относительно хода светового луча**. Так, например, сферическая аберрация для плоско-выпуклой линзы, обращенной навстречу лучу своей плоской поверхностью, будет иметь величину большую, нежели для той же линзы, но встречающей луч своей выпуклой поверхностью.

## 2. ХРОМАТИЧЕСКАЯ АБЕРРАЦИЯ

**Хроматическая абберация** — абберации оптической системы, обусловленная зависимостью показателя преломления среды от длины волны проходящего через неё излучения (то есть, дисперсией света). Из-за дисперсии фокусные расстояния не совпадают для лучей света с разными длинами волн (лучей разных цветов).

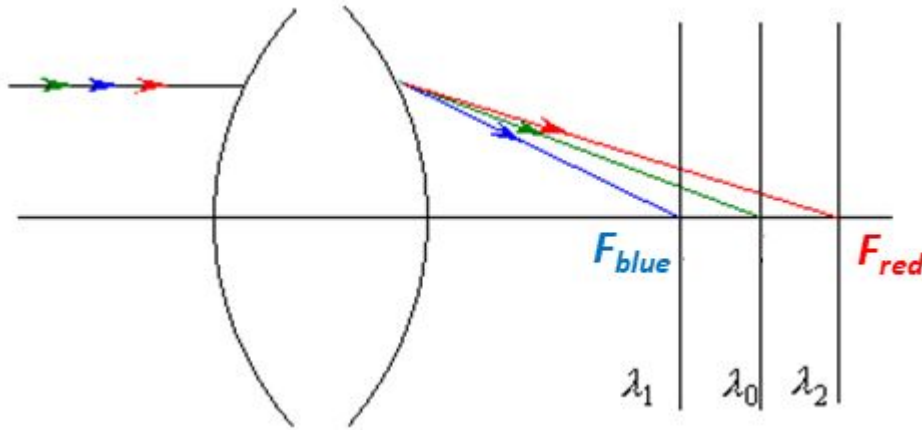


Хроматические абберации приводят к тому, что в изображениях неокрашенных предметов появляется окрашенность.



# Хроматизм положения

**Хроматизм положения** - это аберрация, 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



Численно хроматизм положения определяется разностью положений плоскости изображения для крайних длин волн:

$$\delta = F_b - F_r$$

Показатель преломления синих лучей, как правило, больше, чем красных, поэтому фокус  $F_{blue}$  синих лучей расположен ближе к задней главной точке линзы, чем фокус  $F_{red}$  красных лучей. Отсюда следует, что лучи, полученные разложением белого света, будут иметь различное фокусное расстояние.

**Единого фокусного расстояния у одной линзы не существует, а есть совокупность фокусных расстояний — по одному фокусу на луч каждого цвета.**

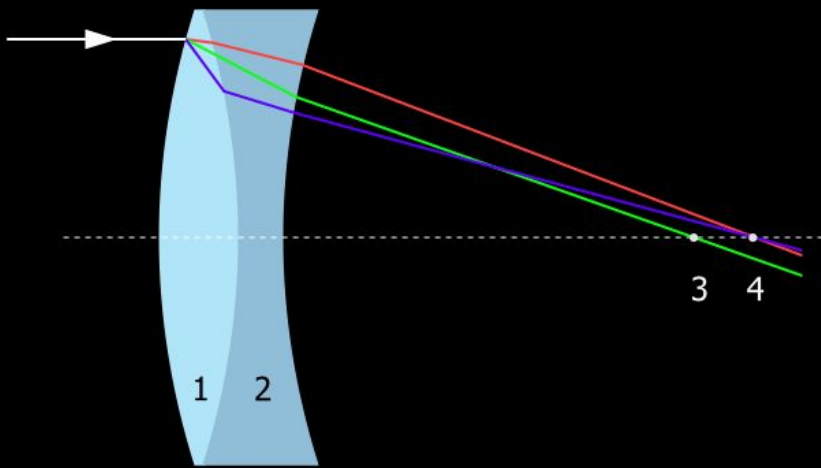


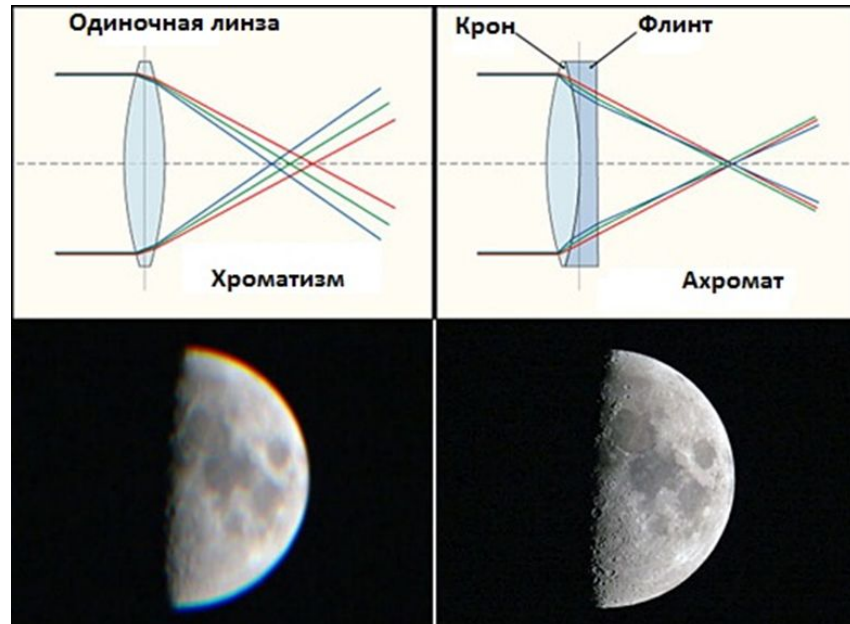
Схема исправления хроматизма положения.

1 — крон (стекло);

2 — флинт;

3 — зелёный луч;

4 — точка сведения синего и красного лучей



- Хроматизм положения может быть исправлен путём комбинирования собирающей и рассеивающей линз.

- Линзы должны состоять из оптических стёкол и обладать различной дисперсией.

- При прохождении через первую линзу луч отклонится к оптической оси и диспергирует.

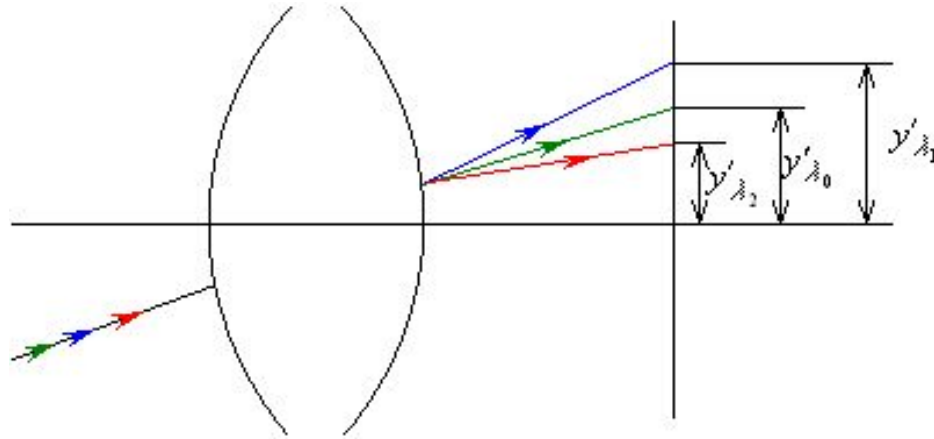
- Войдя во вторую линзу, луч незначительно отклонится в обратную сторону и повторно диспергирует, но в обратном направлении.

- В результате хроматическая aberrация первой линзы компенсируется второй, «отрицательной», линзой, и лучи различных цветов соберутся в одной точке.

- Такие линзы, исправляющие хроматизм

# Хроматизм увеличения

**Хроматизм увеличения** — хроматическая аберрация, при которой изображения одного и того же предмета в лучах разного цвета имеют несколько различный размер. Вследствие этого вместо изображения точки образуется цветная полоска.



Численно **абсолютный хроматизм увеличения** определяется как разность величины изображения для крайних длин волн:

$$\delta = y'_{\lambda_1} - y'_{\lambda_2}$$

# Фотометрические величины и единицы

**Фотометрией** называется раздел оптики, занимающийся измерением световых потоков и величин, связанных с ними. В фотометрии используются следующие величины

- **Энергетические** – характеризуют энергетические параметры оптического излучения безотносительно к его действию на приемники излучения.
- **Световые** – характеризуют физиологическое действие света и оцениваются по воздействию на глаз (исходя из средней чувствительности глаза) или другие приемники излучения.

# Энергетические величины

**1. Поток излучения** – величина, равная отношению энергии излучения ко времени.

$$\Phi_e = \frac{W}{t} \quad [\text{Дж} / \text{с} = \text{Вт}]$$

**2. Сила света** – величина, равная отношению потока излучения точечного источника к телесному углу  $\Omega$ , в пределах которого это излучение распространяется.

$$I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega} \quad \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{ср}} \right]$$

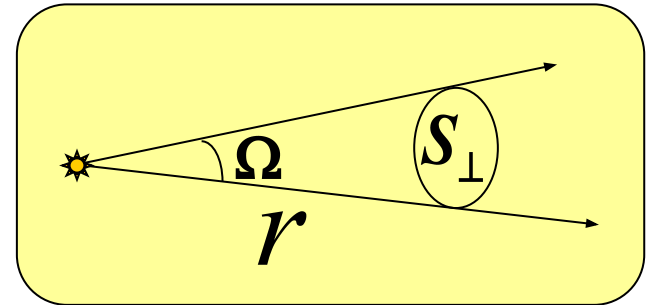
**Точечный источник света** – источник, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием до места наблюдения.

**Телесный угол** - часть пространства, ограниченная одной из двух полостей конической поверхности, направляющая которой представляет собой замкнутую линию, не имеющую самопересечений.

Величина **телесного угла**  $\Omega$  равна площади сферы  $S$ , охватываемой углом, отнесенной к квадрату радиуса сферы  $r^2$  (центр сферы совпадает с вершиной телесного угла)

$$\Omega = \frac{S_{\perp}}{r^2}$$

$$[\Omega] = \text{стерадиан} = \text{ср}$$



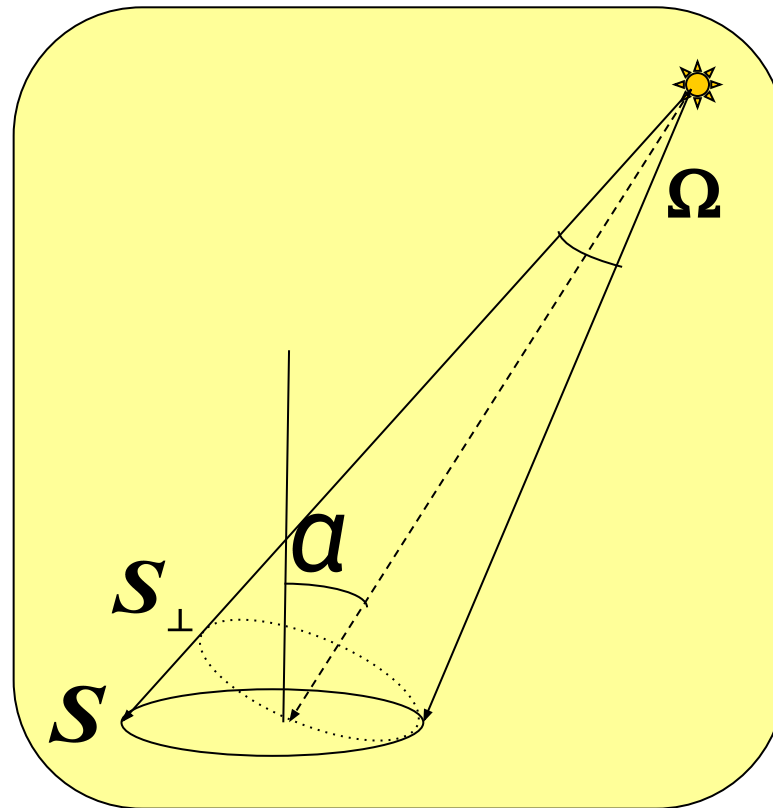
**3. Освещенность** - величина потока излучения, падающего на единицу площади освещаемой поверхности.

$$E_e = \frac{\Phi_e}{S}$$

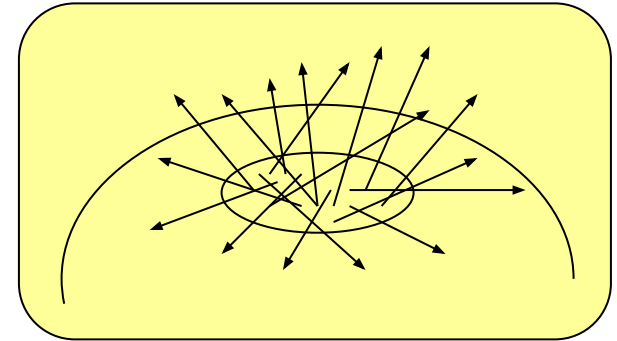
$$[E_e] = \text{Вт} / \text{м}^2$$



$$E_e = \frac{\Phi_e}{S} = \frac{I_e \Omega}{S} = \frac{I_e S_{\perp}}{r^2 S} = \frac{I_e \cos \alpha}{r^2}$$



**4. Светимость** – величина, равная отношению потока излучения, испускаемого поверхностью, к площади этой поверхности.



$$R_e = \frac{\Phi_e}{S} \left[ \frac{Вт}{м^2} \right]$$

**5. Яркость** – величина, равная отношению энергетической силы света элемента излучающей поверхности к площади проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения.

$$L_e = \frac{dI_e}{dS_{\perp}}$$
$$[L_e] = Вт / ср \cdot м^2$$

# Световые величины

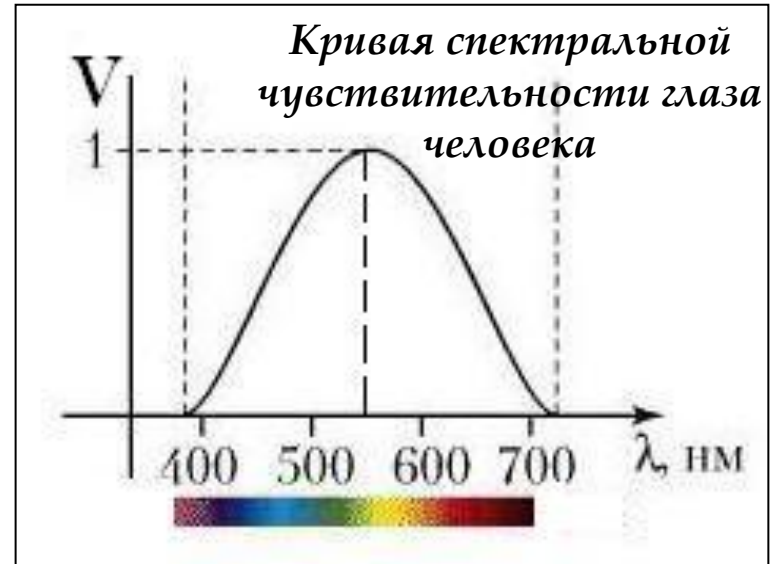
## 1. Световой поток

определяется как мощность оптического излучения по вызываемому им световому ощущению.

$$\Phi = k \cdot V \cdot \Phi_e$$

$$[\text{люмен} = \text{лм} = \text{кд} \cdot \text{ср}]$$

где  $V$  - относительная спектральная чувствительность,  
 $k = 625 \text{ лм/Вт}$  - коэффициент согласования единиц измерения.



**1 лм** – это световой поток, испускаемый точечным источником силой света в 1 кд внутри телесного угла в 1 ср.

**2. Сила света** – поток излучения источника, приходящийся на единицу телесного угла.

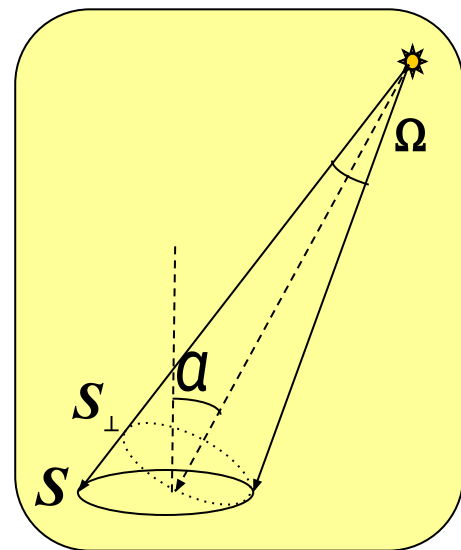
$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$

[ лм / ср = кандела = кд ]

Кандела (кд) – сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср.

**3. Освещенность** – величина, равная отношению светового потока, падающего на поверхность, к площади этой поверхности.

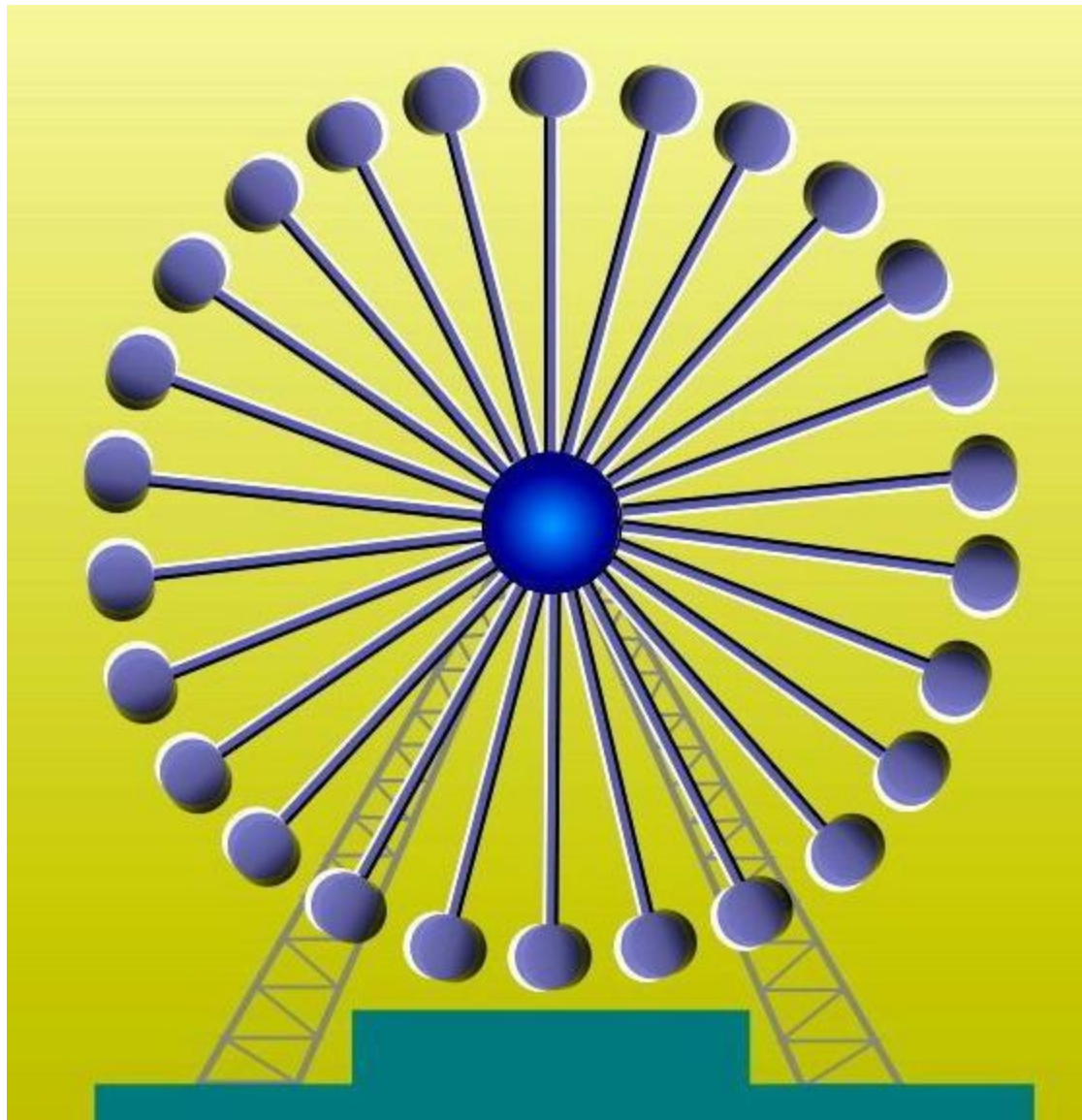
$$E_M = \frac{\Phi}{S} = \frac{I \cos \alpha}{r^2} \quad [ \text{лм} / \text{м}^2 ]$$



4. **Светимость** определяется соотношением:

$$E_v = \frac{\Phi}{S} \quad [ \text{люкс} \cdot \text{м}^2 = ]$$

**1 лк** – освещенность поверхности, на  $1 \text{ м}^2$  которой падает световой поток в **1 лм**



**Иллюзия движения «Чёртово колесо»**



