

# Лекция 8. Геометрическая и волновая оптика.

Лектор Войтик В. В.

# Геометрическая оптика.

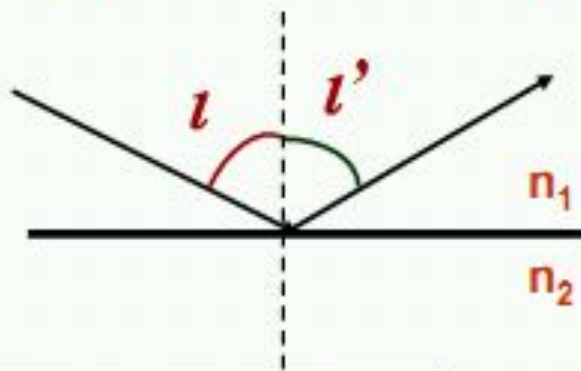
## Линзы. Оптическая система глаза.

**Геометрическая оптика** –раздел оптики, в котором изучают законы распространения света не учитывая его волновые свойства

- **Направление распространения** представляют в виде **световых лучей –линий**, вдоль которых распространяется энергия световой волны
- **Геометрическая оптика** – предельный случай волновой оптики при стремлении длины волны света к нулю.

# I. Законы отражения и преломления света

## Законы отражения света



$n_1, n_2$  – абсолютные показатели преломления сред

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

$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}$  – относительный показатель преломления

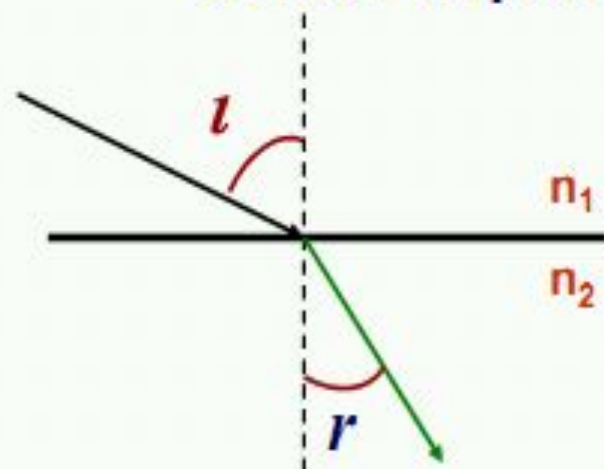


➡ Угол падения равен углу отражения:

$$i = i'$$

➡ Падающий и отраженный лучи, и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точку падения луча, **лежат в одной плоскости**

## Законы преломления света



$$n_1 < n_2$$

$$r < i$$

$$n_1 < n_2$$



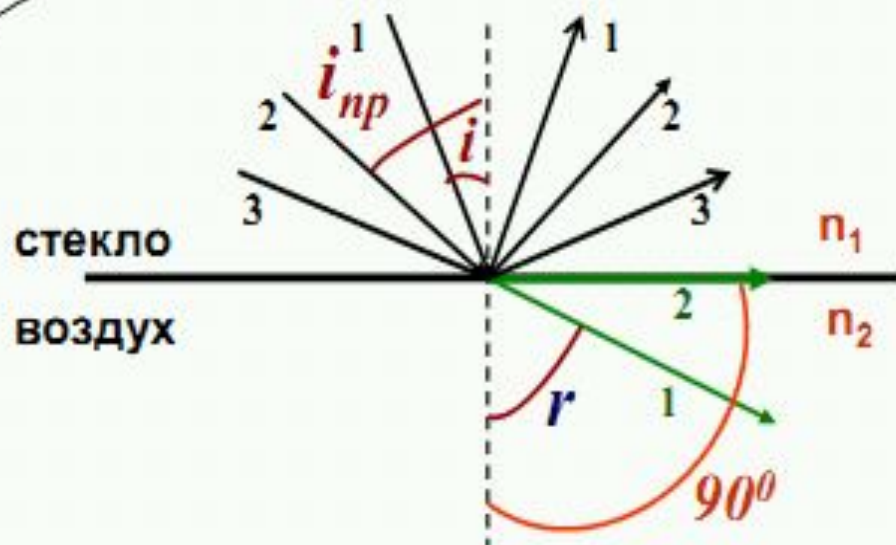
- ➔ Падающий и преломленный лучи, и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точку падения луча, **лежат в одной плоскости**



$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

$n_{21}$  – относительный показатель преломления





$$n_2 < n_1$$

$$r > i$$

➔ Полное внутреннее отражение света – исчезновение преломленных лучей

➔ Возникает при углах падения, превышающих критический угол  $i_{np}$  – предельный угол полного внутреннего отражения



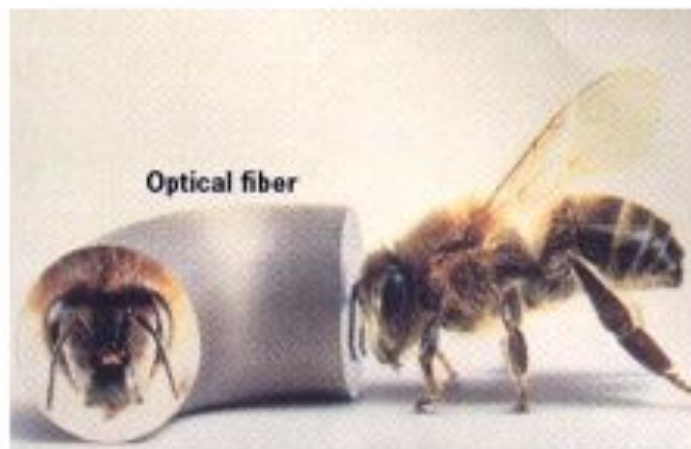
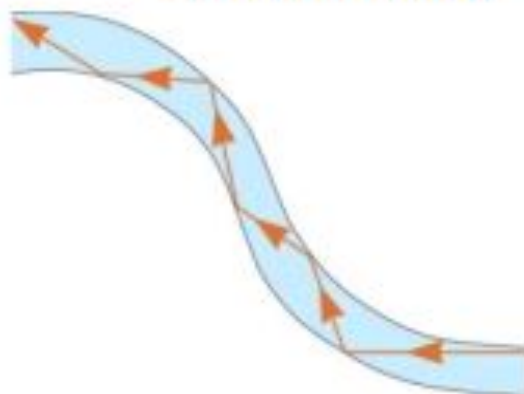
$$\frac{\sin i_{np}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

$$\sin i_{np} = n_{21}$$

➔ **Полное внутреннее отражение** возможно, только если свет падает из оптически более плотной в оптически менее плотную среду, т.е. когда  $n_1 > n_2$

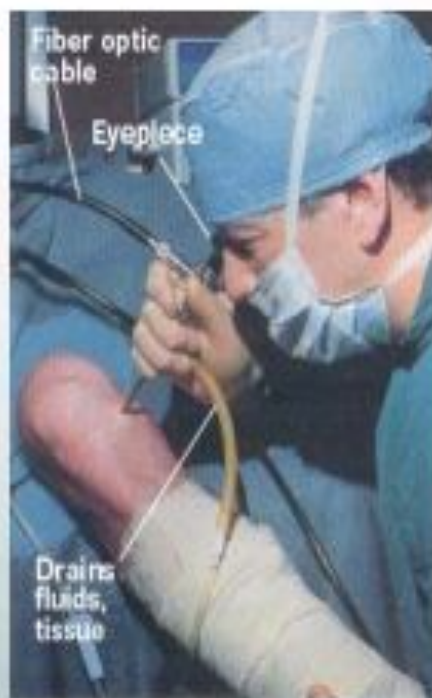
➔ Это явление используют в **волоконной оптике** – изготовление волоконных световодов (тонкие нити из оптически прозрачного материала)

ОПТОВОЛОКНО





# Применение волоконной оптики



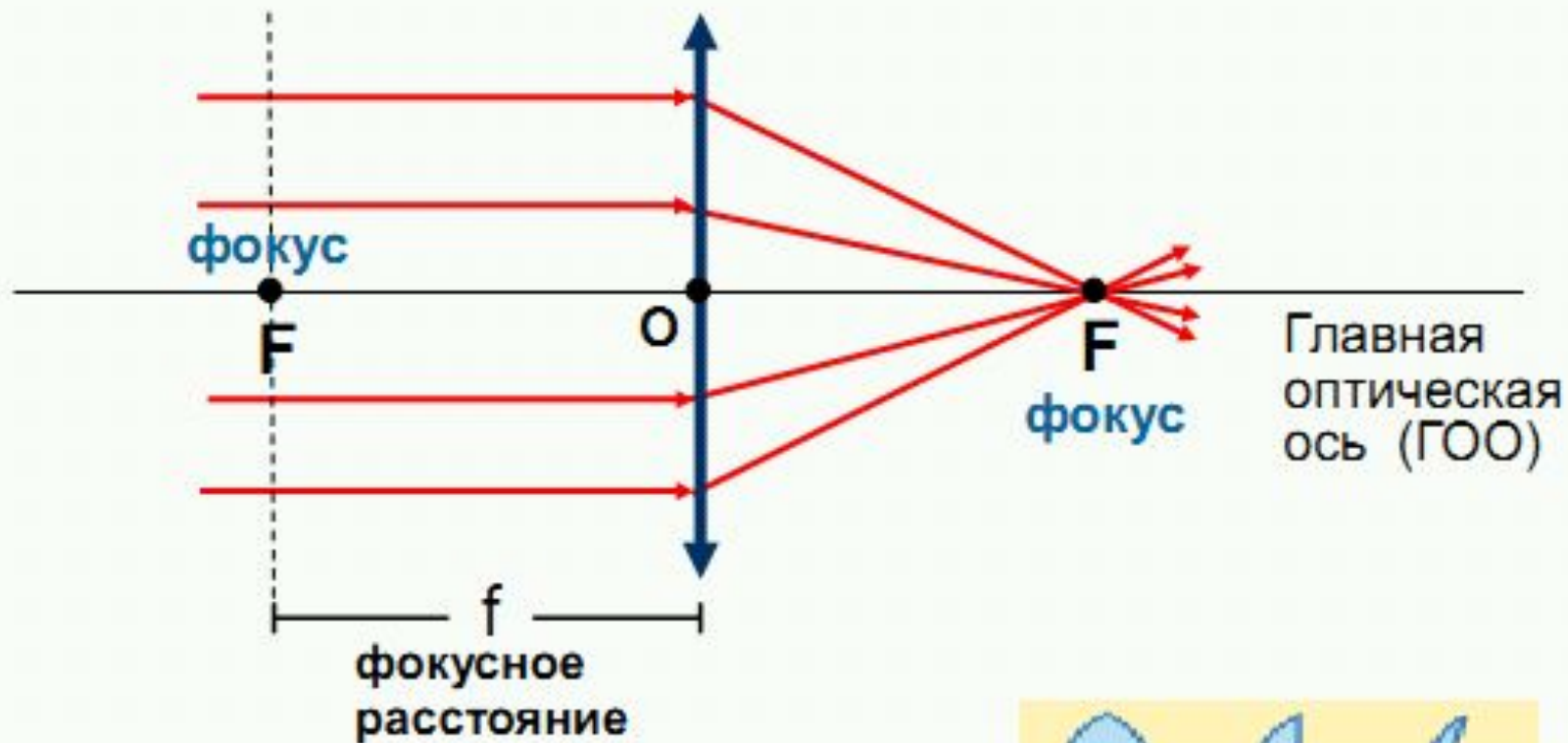
## II. Линзы. Виды изображений в линзах

- ➡ **Линза** – это **прозрачное тело**, ограниченное с двух сторон криволинейными (сферическими) поверхностями
- ➡ **Главная оптическая ось линзы (ГОО)** – прямая, проходящая через центры сферических поверхностей линзы и ее оптический центр
- ➡ **Основное свойство линзы** – способность давать **изображение**

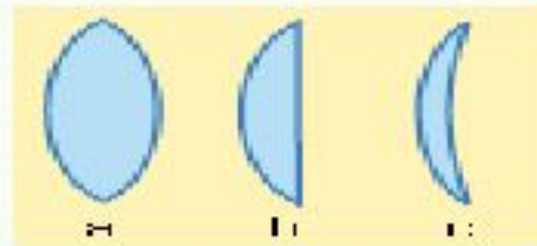


## Виды линз:

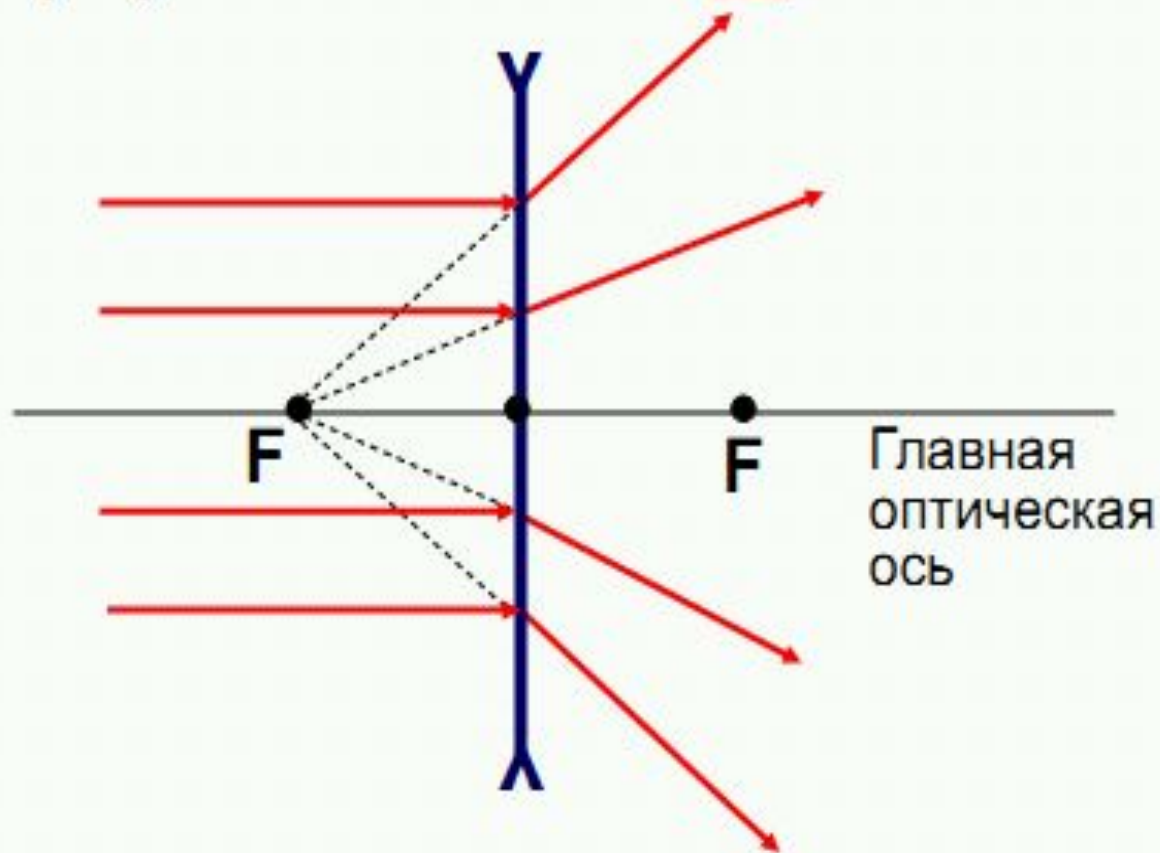
а) **собирающие** – после прохождения через линзу лучи отклоняются в сторону ГОО



Примеры:



б) **рассеивающие** – после прохождения через линзу лучи отклоняются от ГОО

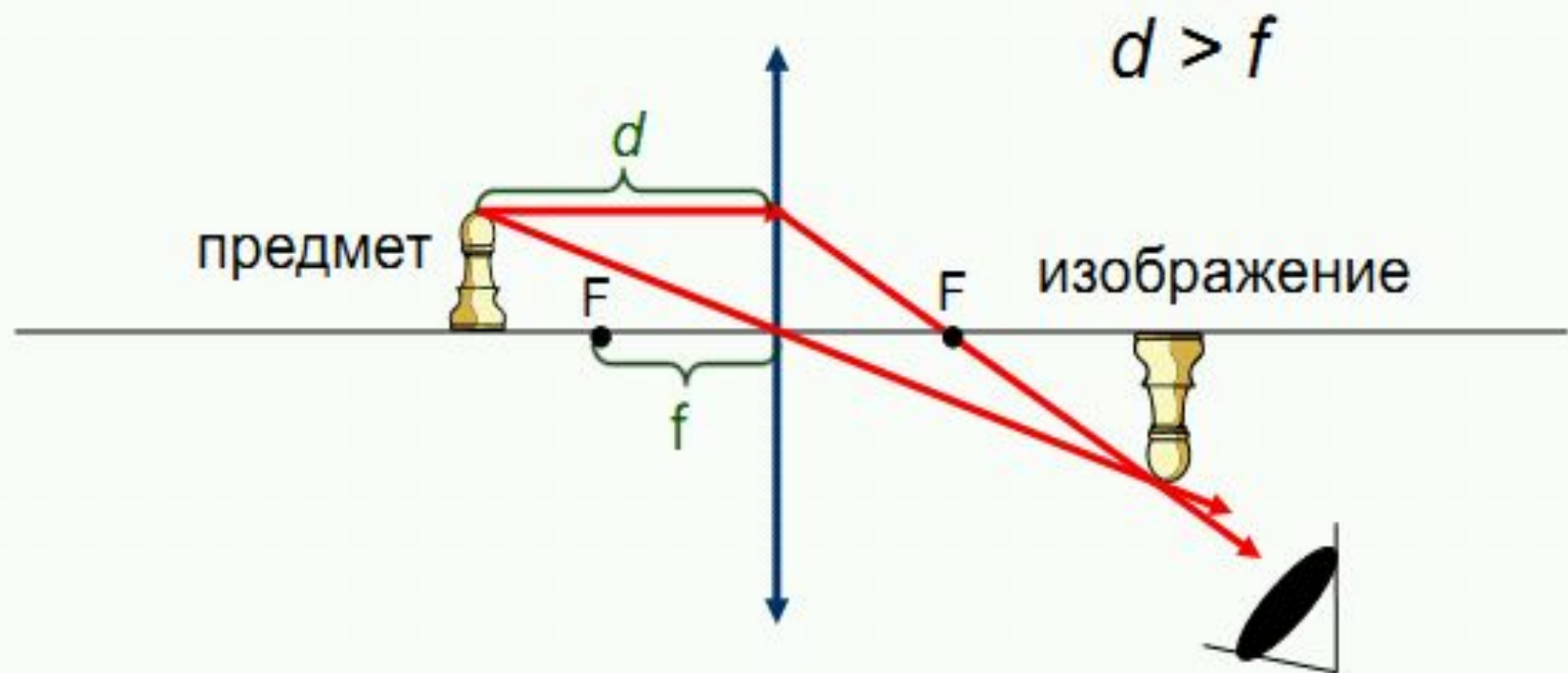


Примеры:



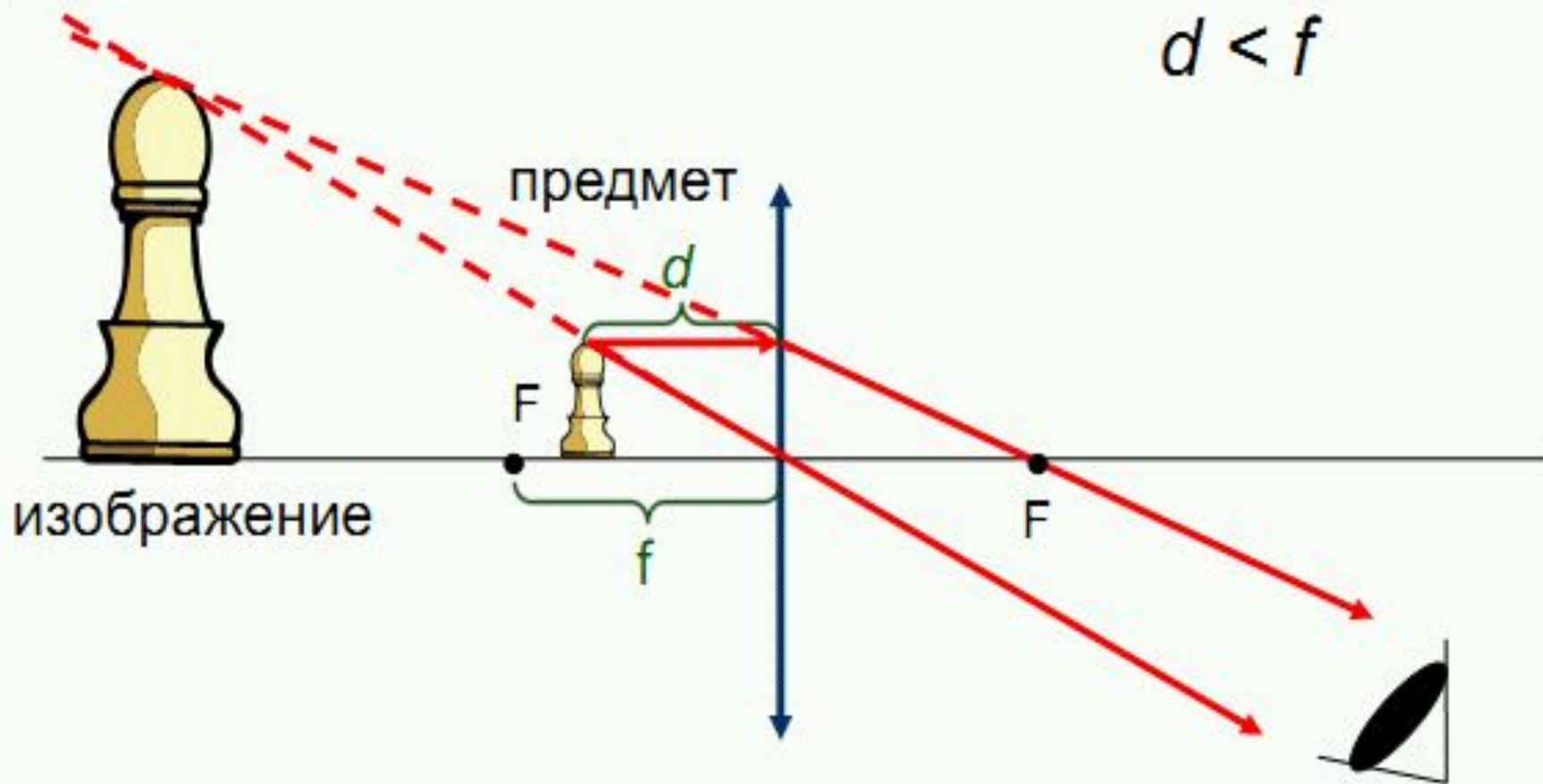
## Виды изображений в линзах:

### 1) Собирающие линзы

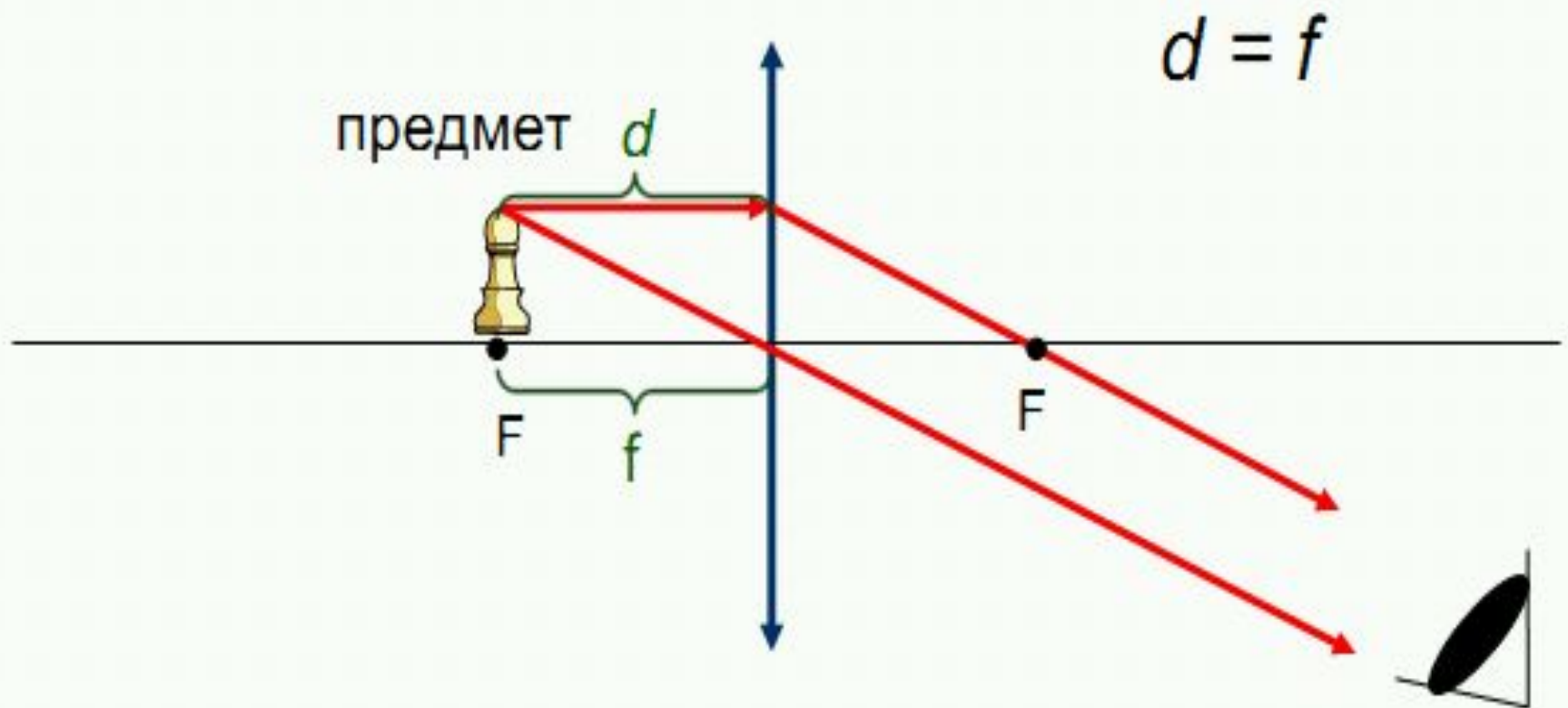


➔ Если  $d$  больше  $f$  и меньше  $2f$ , то изображение предмета увеличенное, действительное, перевернутое



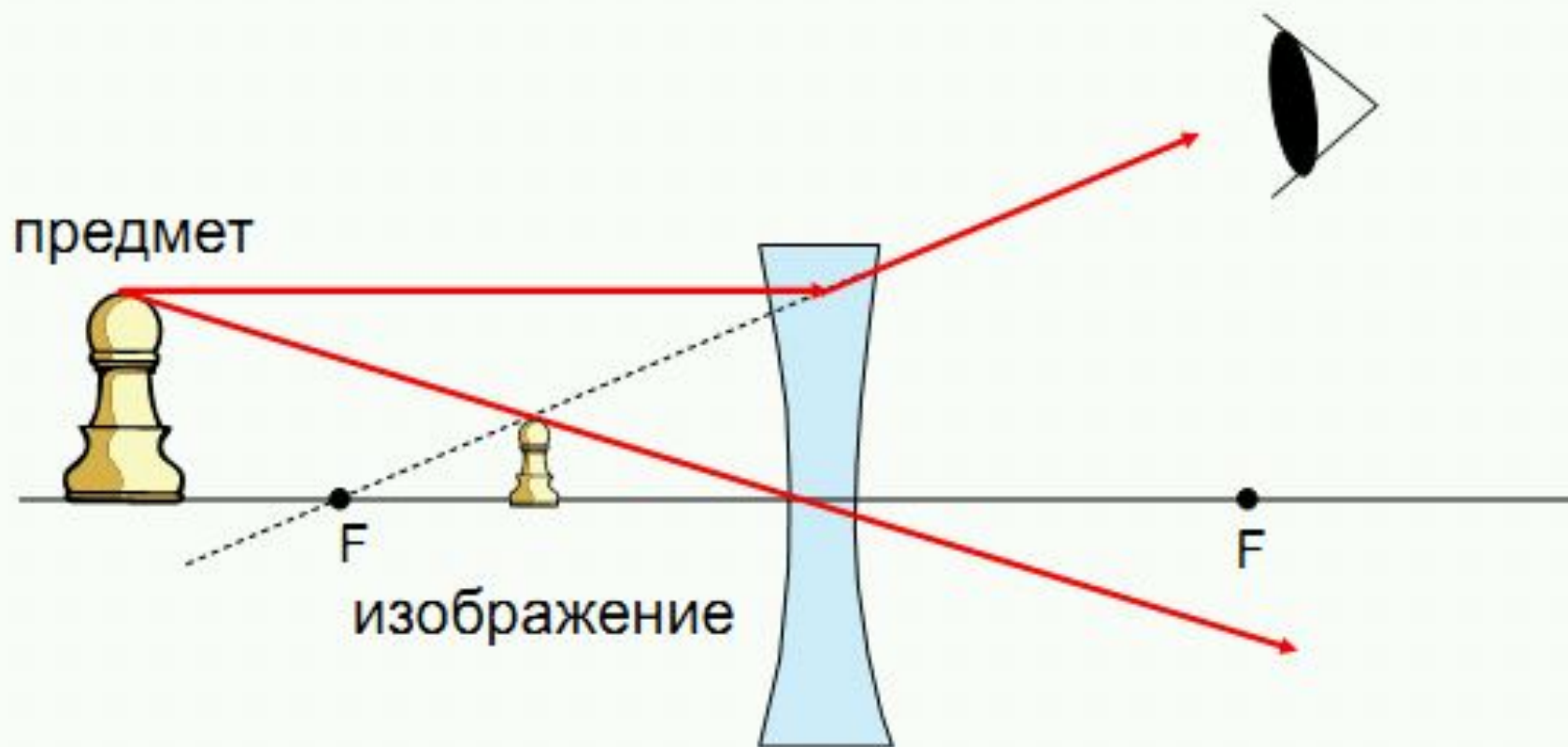


➔ Если  $d$  меньше  $f$ , то изображение предмета увеличенное, мнимое, прямое



➡ Если  $d$  равно  $f$ , то изображение предмета отсутствует

## 2) Рассеивающие линзы



- ➡ Независимо от положения предмета изображение будет мнимым, уменьшенным, прямым



➔ **Тонкая линза** – толщина которой намного меньше, чем радиусы кривизны ее поверхностей

**Формула тонкой линзы:**

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

- $a_1$  – расстояние от предмета до линзы
- $a_2$  – расстояние от изображения до линзы
- $n$  – показатели преломления вещества линзы

$R_1, R_2$  – радиусы кривизны поверхностей линзы

$$\pm \frac{1}{f} = \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}$$

**Оптическая сила линзы:**

$$\pm \frac{1}{f} = D$$

[ дптр ] = м<sup>-1</sup>

$$\pm \frac{1}{f} = D$$

➔ **Собирающие линзы:**

$f$  "+"

$D > 0$

➔ **Рассеивающие линзы:**

$f$  "-"

$D < 0$

➔ **Линейное увеличение линзы:**

$$k = \frac{H'}{H}$$

## Формула **ТОНКОЙ** **ЛИНЗЫ** справедлива если:

- ➡ изображение формируется тонкими приосевыми (**параксиальными**) лучами, составляющими небольшие углы с главной оптической осью линзы
- ➡ показатель преломления для всех длин волн света одинаков
- ➡ если эти условия выполняются, то создается **точечное изображение** (т.е. каждая точка предмета дает одну точку изображения)



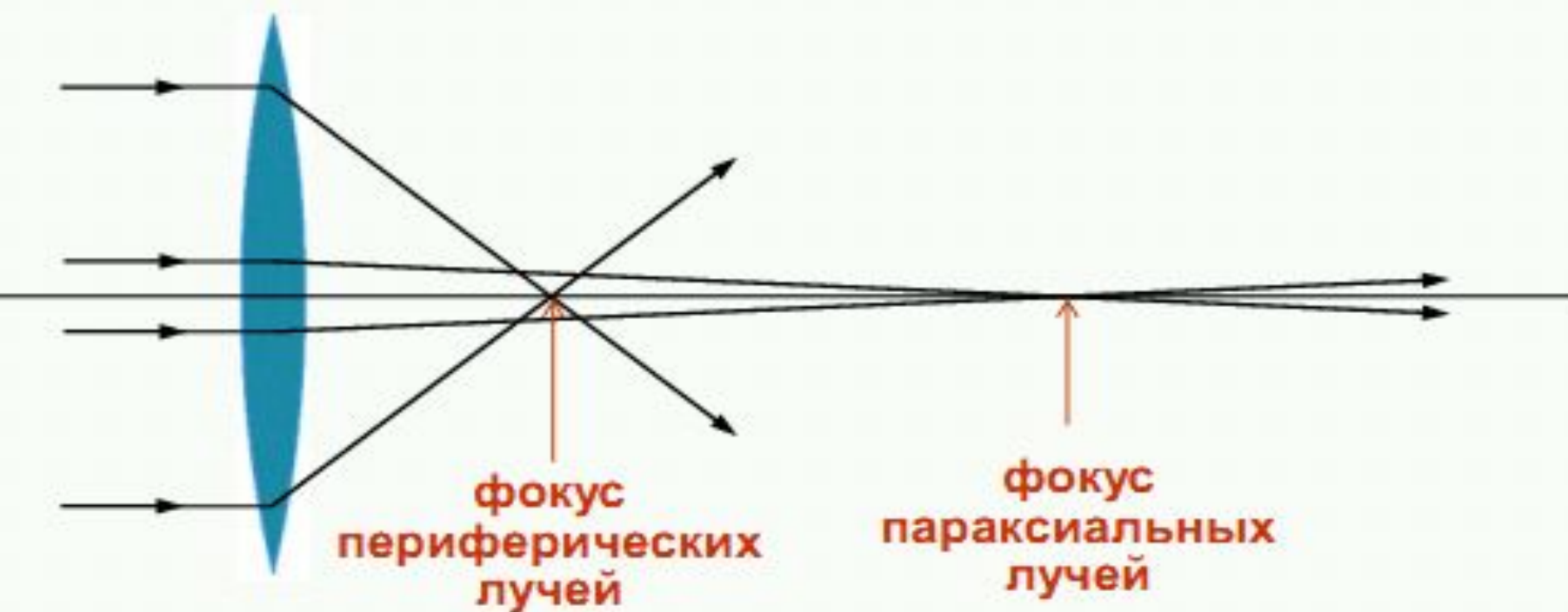
### III. Аберрации линз

➡ **Аберрации** – это **погрешности изображений**, даваемых оптическими системами (линзами)

- ➡ Проявляются в том, что **изображения** могут быть:
- ✓ не вполне отчетливы,
  - ✓ не точно соответствуют предмету
  - ✓ оказываются окрашенными

## а) Сферическая абберация:

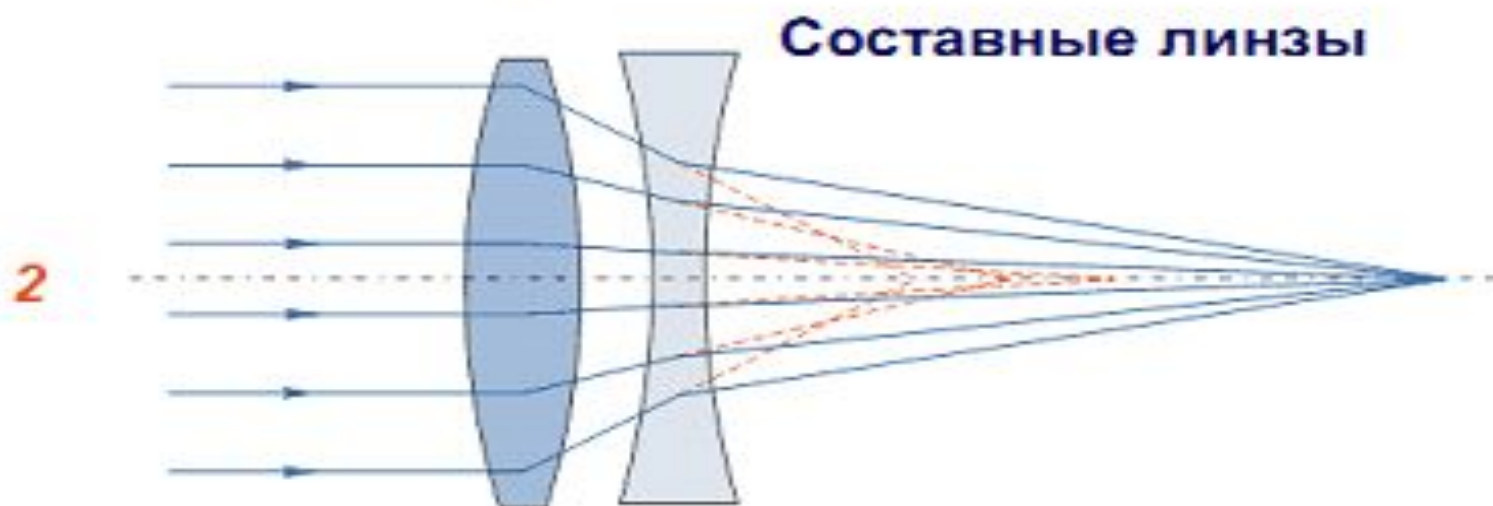
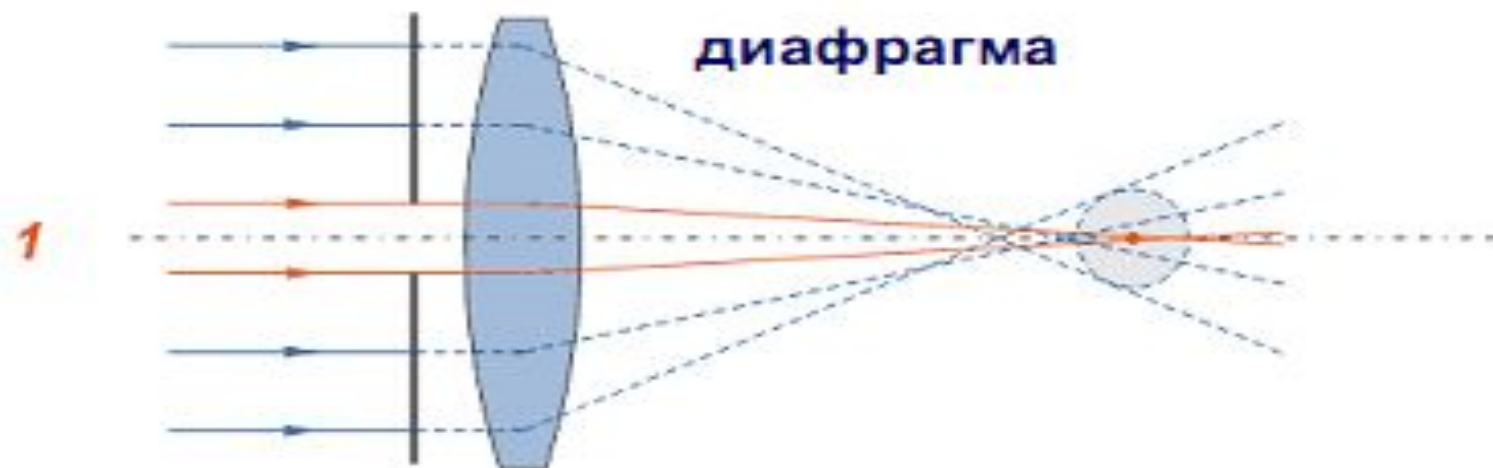
- заключается в том, что периферические части линзы **сильнее отклоняют лучи**, чем центральные
- фокусы для лучей света, проходящих через линзу на разных расстояниях от ГОО, **не** совпадают



- ➡ Фокус **периферических** лучей находится **ближе** к линзе, чем **параксиальных** (центральных) лучей

➡ Сферическую aberrацию **устраняют:**

- ✓ путем **диафрагмирования**
- ✓ при помощи составных линз (симметричные дублеты)





– при хроматической aberrации положения фокусов для лучей разных длин волн **не** совпадают

- Лучи **синего** света отклоняются линзой сильнее, чем лучи **красного** света

(т.к.  $n_{\text{син}} > n_{\text{крас}}$ )

фокус для  
красного света

фокус для  
синего света

Естественный  
свет

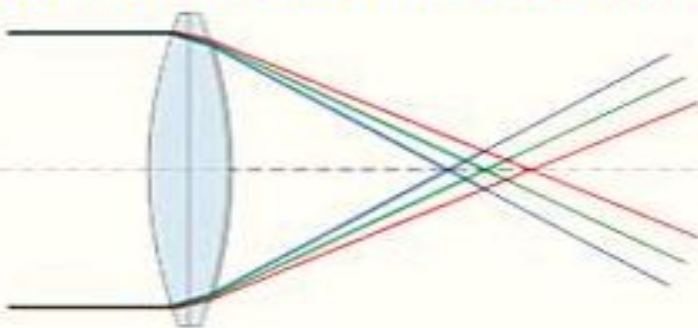


➡ Изображение окрашено в радужные кольца

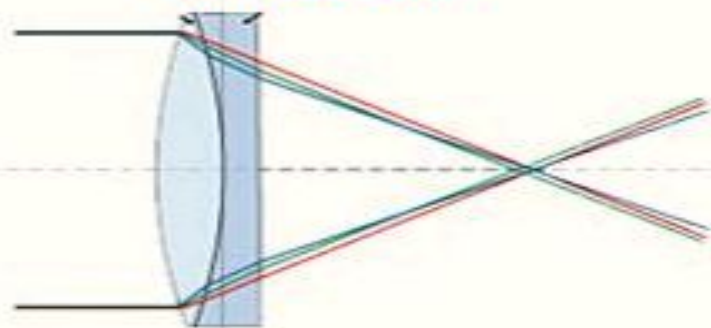
➔ хроматическую aberrацию **устраняют:**

- ✓ при помощи системы линз из стекол с **разной дисперсией** (ахроматические дублеты)

**Хроматическая aberrация**



**Коррекция**



**ахроматические дублеты**





## В) АСТИГМАТИЗМ:

– заключается в том, что **изображение точки** имеет вид **пятна** эллиптической формы, которое при некоторых положениях плоскости изображения вырождается в отрезок



- Происходит если **лучи**, исходящие из точки, составляют **большие углы с оптической осью**
- Происходит за счет **асимметрии оптической системы**
- Наиболее характерна для глаза человека
- Устраняют при помощи подбора системы линз с разной кривизной

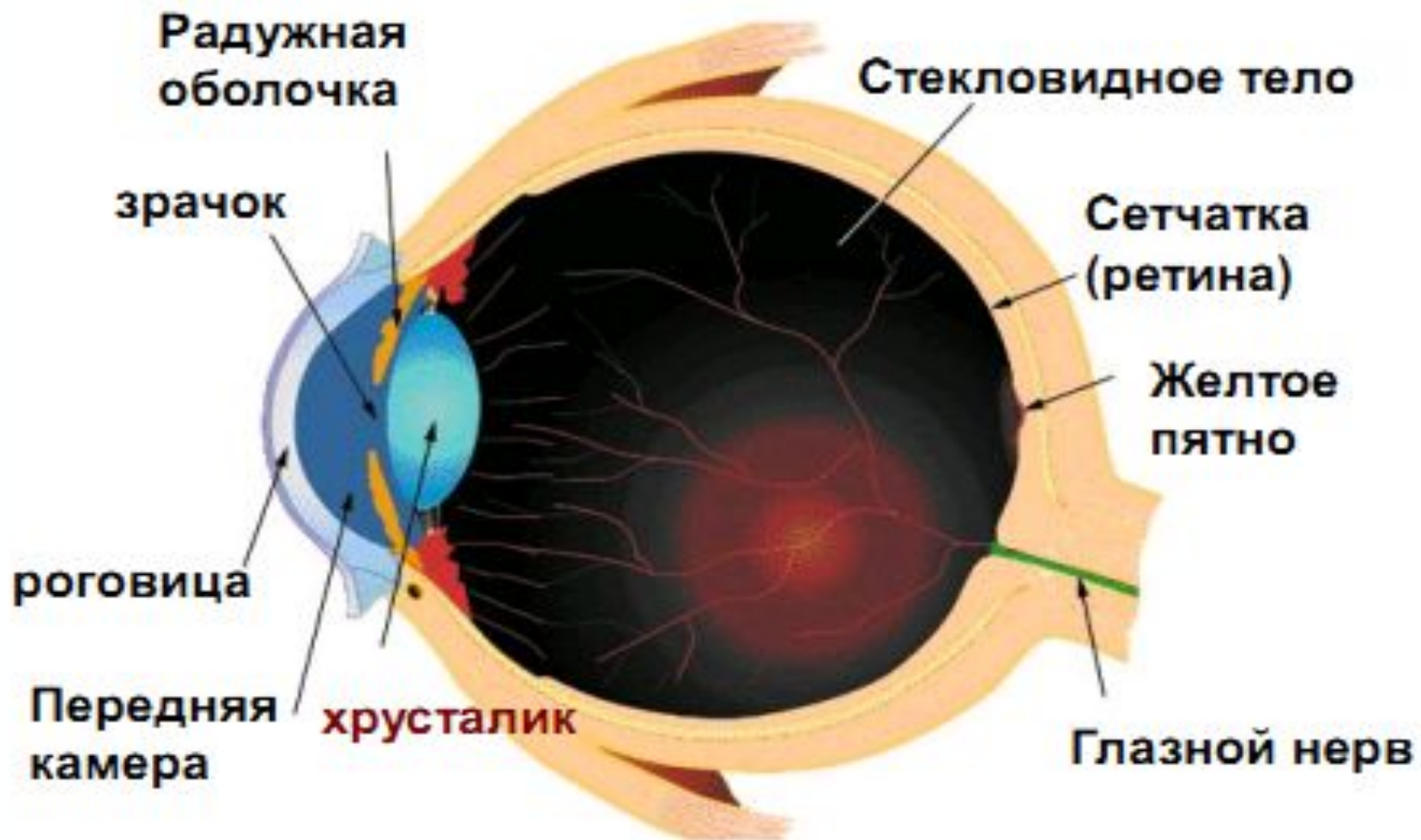
## г) дисторсия:

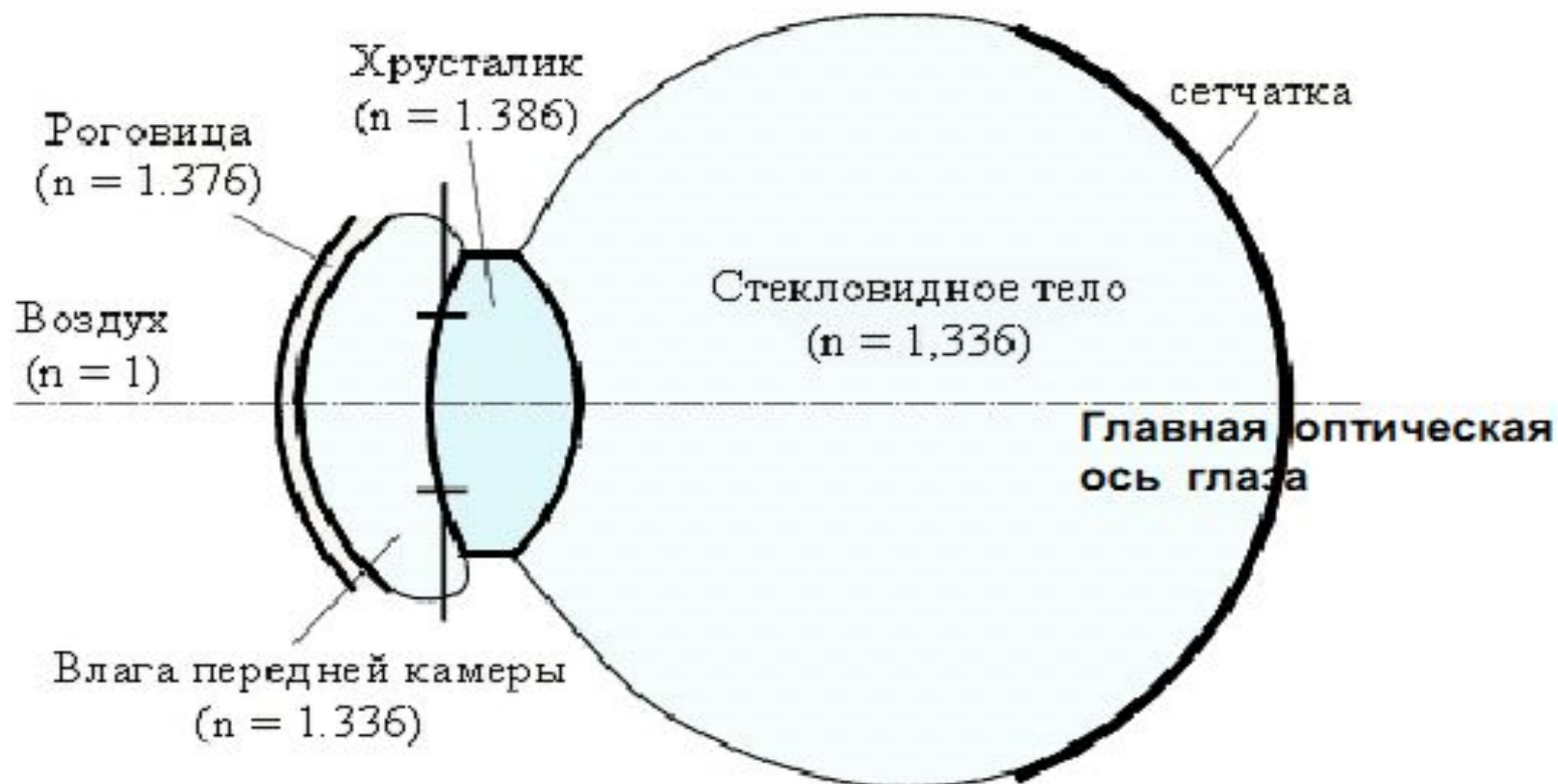
- искажение масштабов (геометрии) изображения
- возникает если лучи, исходящие от предмета, составляют **большие углы с ГОО** линзы





## IV. Оптическая система глаза



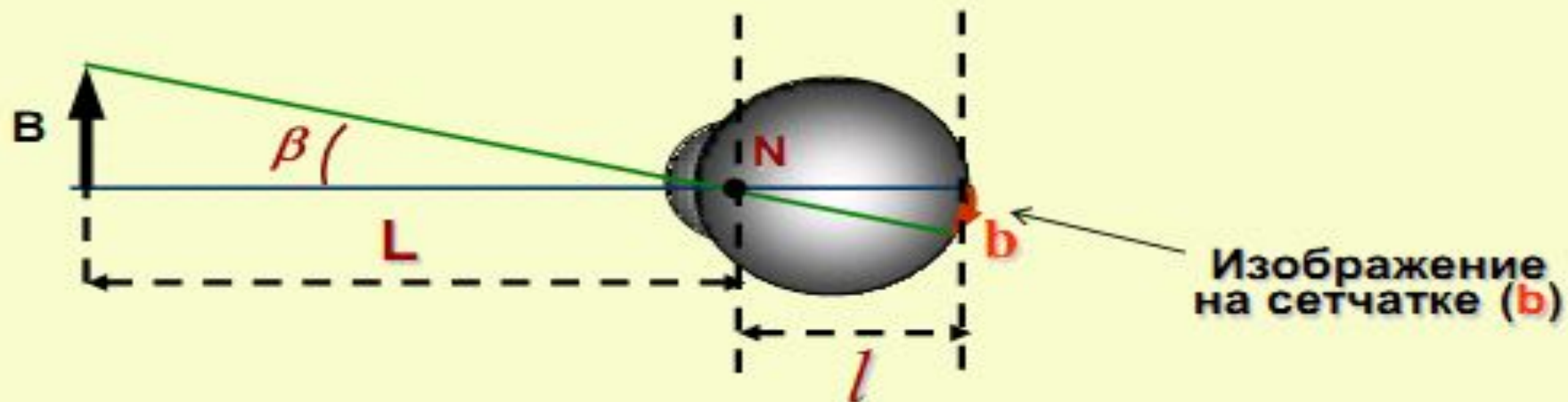


➔ **Световоспринимающий аппарат** : сетчатка (состоит из светочувствительных клеток – палочек и колбочек)

**Палочки** (125 млн/глаз) отвечают за сумеречное и периферическое зрение

**Колбочки** (6-7 млн/глаз) отвечают за цветное зрение

**Желтое пятно** - скопление колбочек на сетчатке (самое светочувствительное место на сетчатке)



$N$  - единая узловая точка (оптический центр глаза)

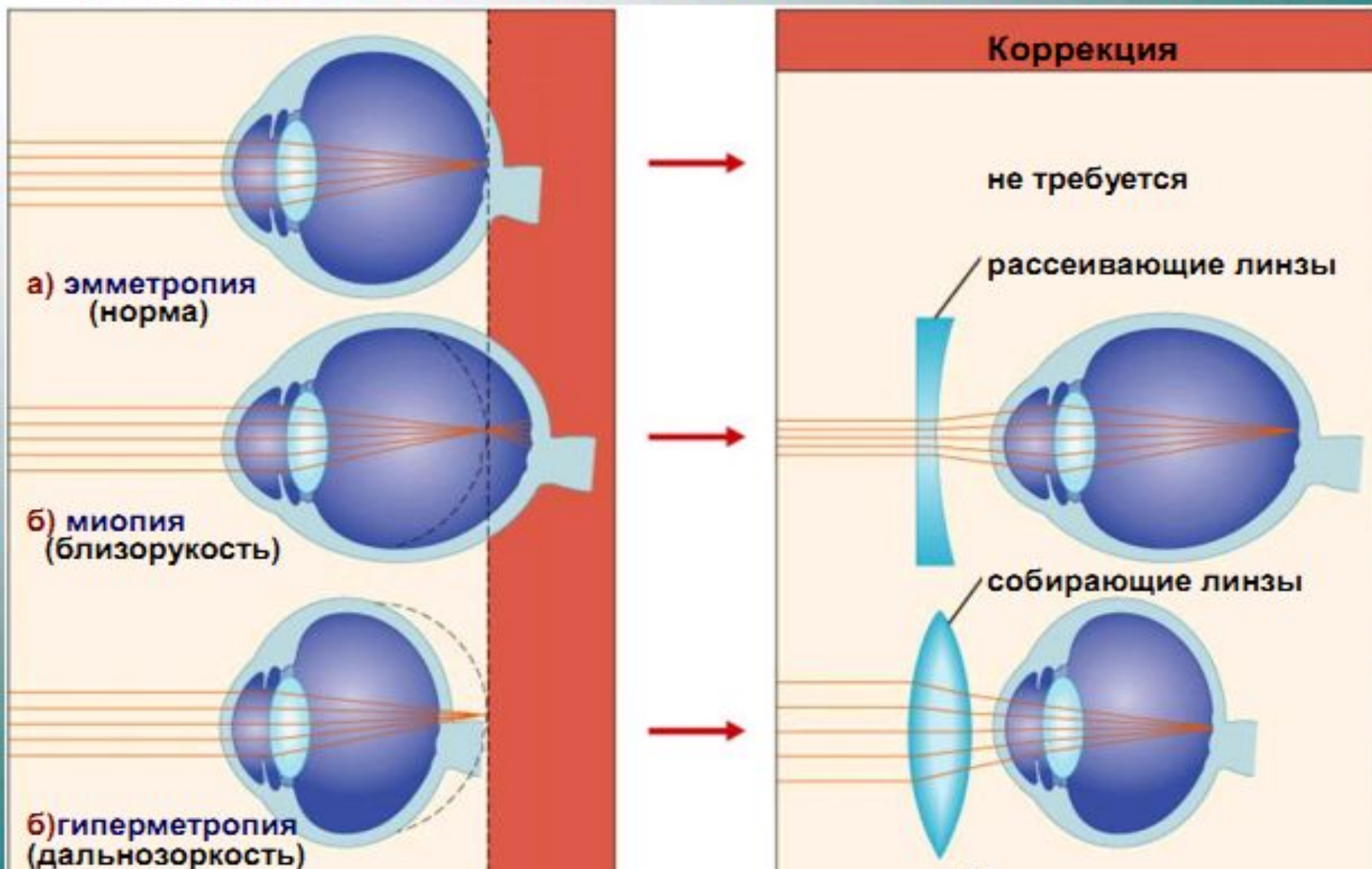
$\beta$  - угол зрения (угол между лучами, идущими от крайних точек предмета через оптический центр глаза)

➔ Размер изображения зависит только от **угла зрения**:

$$b = l \cdot \operatorname{tg} \beta$$



# V. Недостатки оптической системы глаза

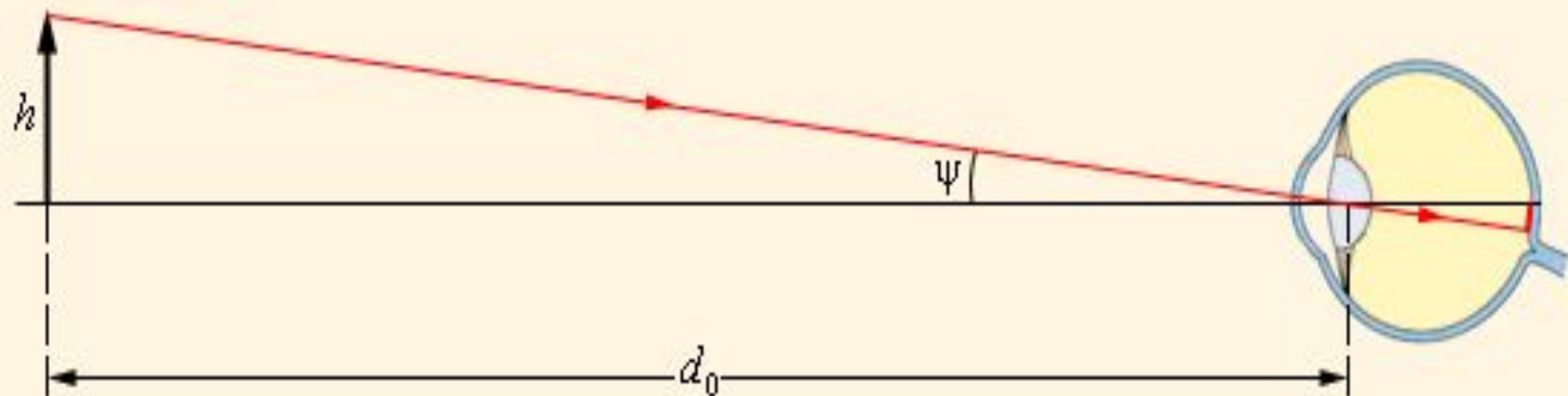


➡ В результате нарушения сферичности роговицы **при астигматизме**, в разных плоскостях возникает **разная преломляющая сила** и изображение предмета при прохождении световых лучей получается не в виде точки, а в виде отрезка прямой

- Человек при этом видит предметы искаженными, в которых одни линии четкие, другие – размытые

➡ Коррекция – при помощи комбинации разных видов линз или лазерной хирургии

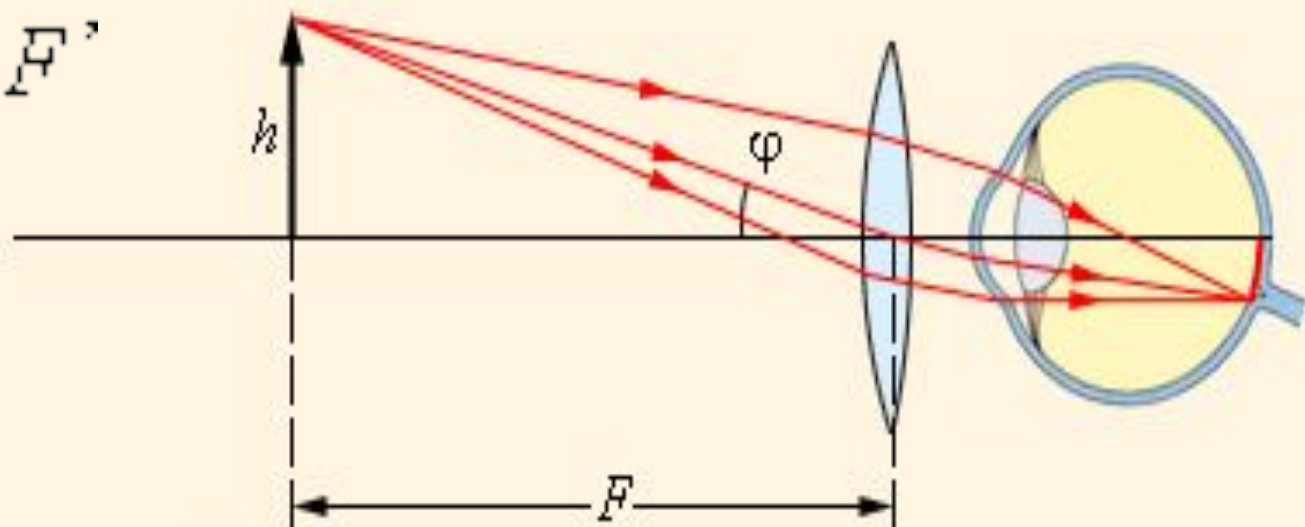
# Действие лупы



$$\psi = \frac{h}{d_0} \quad \varphi = \frac{h}{F_1}$$

(a)

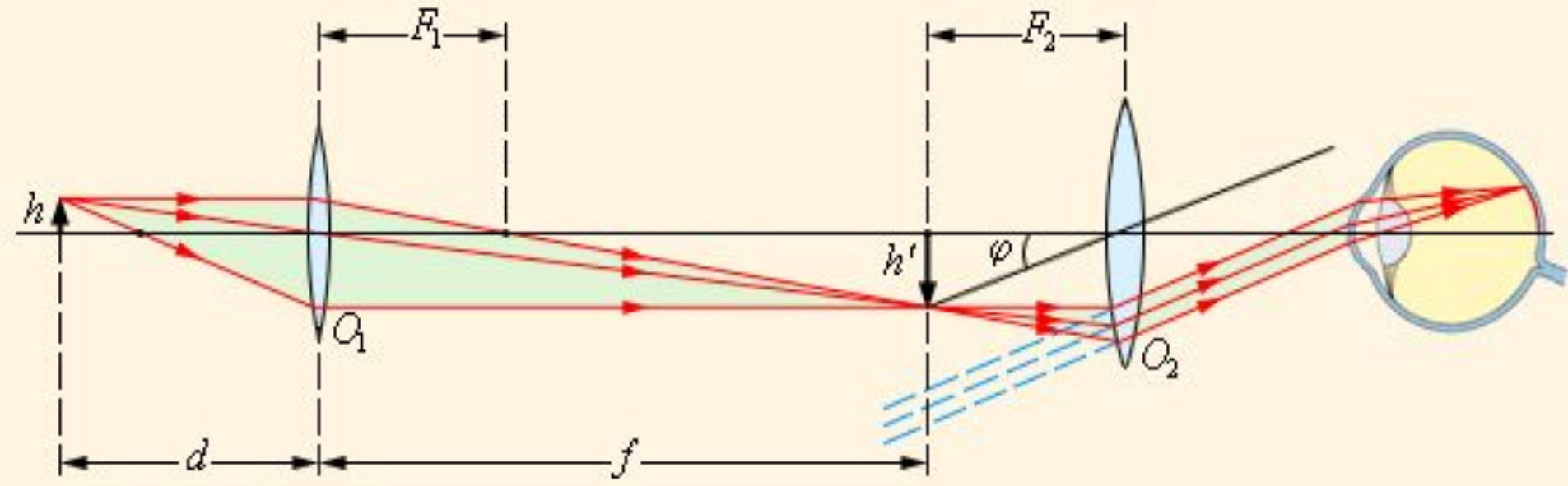
$$\gamma = \frac{\varphi}{\psi} = \frac{d_0}{F_1}$$



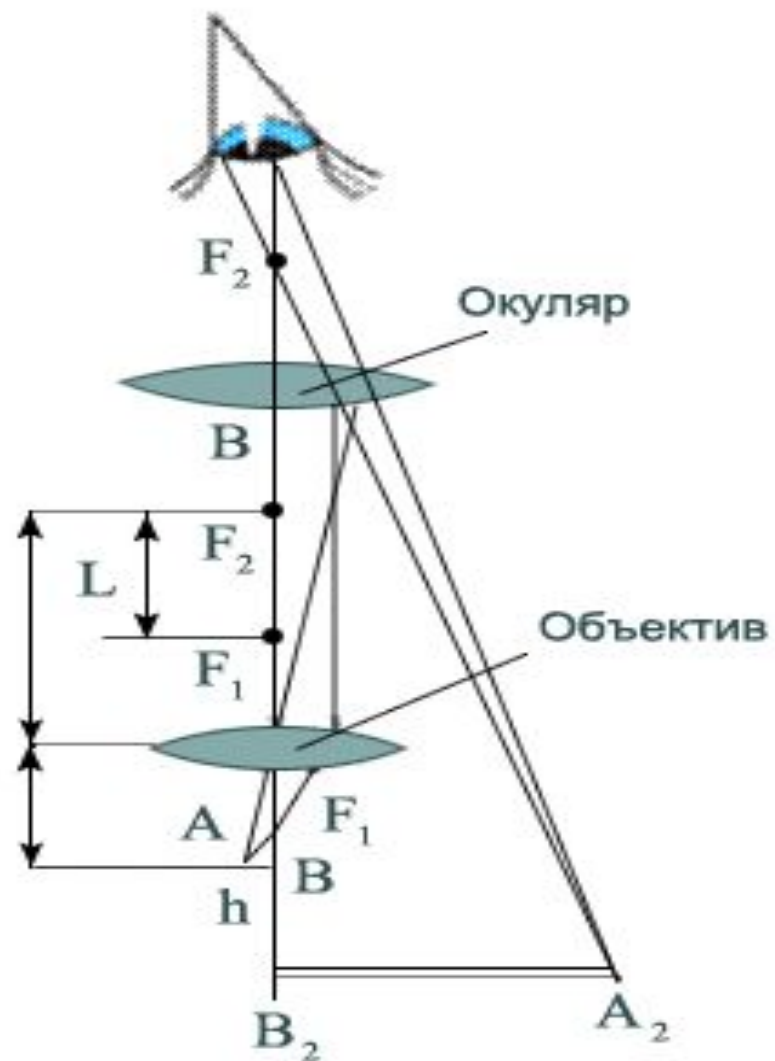
(b)



# Ход лучей в микроскопе



$$\varphi = \frac{h'}{F_2} = \frac{f \cdot h}{d \cdot F_2} \quad \psi = \frac{h}{d_0} \quad \gamma = \frac{\varphi}{\psi} = \frac{l \cdot d_0}{F_1 \cdot F_2}$$



# Разрешающая способность микроскопа

Одной из важнейших характеристик микроскопа является его разрешающая способность.

Согласно дифракционной теории Аббе, линейный предел разрешения микроскопа  $A$ , то есть минимальное расстояние между точками предмета, которые изображаются как отдельные, зависит от длины волны и числовой апертуры микроскопа  $\sigma$ .

$$\sigma = \frac{\lambda}{2A}$$



- Предельно достижимую разрешающую способность оптического микроскопа можно сосчитать, исходя из выражения для апертуры микроскопа ( $A = n \cdot \sin \alpha$ ). Если учесть, что максимально возможное значение синуса угла – единичное, то для средней длины волны  $\lambda = 0.5$  мкм можно вычислить разрешающую способность микроскопа:

$$\sigma = \frac{\lambda}{2A} = \frac{0.5}{2 \cdot 1} = 0.25 \text{ мкм}$$

# Иммерсия

• Для того чтобы увеличить апертуру объектива, пространство между рассматриваемым предметом и объективом заполняется так называемой **иммерсионной жидкостью** – прозрачным веществом с показателем преломления больше единицы. В качестве такой жидкости используют воду, кедровое масло, раствор глицерина и другие вещества. Апертуры иммерсионных объективов большого увеличения достигают величины, тогда предельно достижимая разрешающая способность иммерсионного оптического микроскопа составит

$$\sigma = \frac{\lambda}{2A} = \frac{0.5}{2 \cdot 1.5} = 0.15 \text{ мкм}$$

## • Применение ультрафиолетовых лучей

Для увеличения разрешающей способности микроскопа вторым способом применяются **ультрафиолетовые лучи**, длина волны которых меньше, чем у видимых лучей. При этом должна быть использована специальная оптика, прозрачная для ультрафиолетового света. Поскольку человеческий глаз не воспринимает ультрафиолетовое излучение, необходимо либо прибегнуть к средствам, преобразующим невидимое ультрафиолетовое изображение в видимое, либо фотографировать изображение в ультрафиолетовых лучах:  $\lambda = 0.2 \text{ мкм}$  и способность микроскопа составит

$$\sigma = \frac{\lambda}{2A} = \frac{0.2}{2 \cdot 1} = 0.1 \text{ мкм}$$

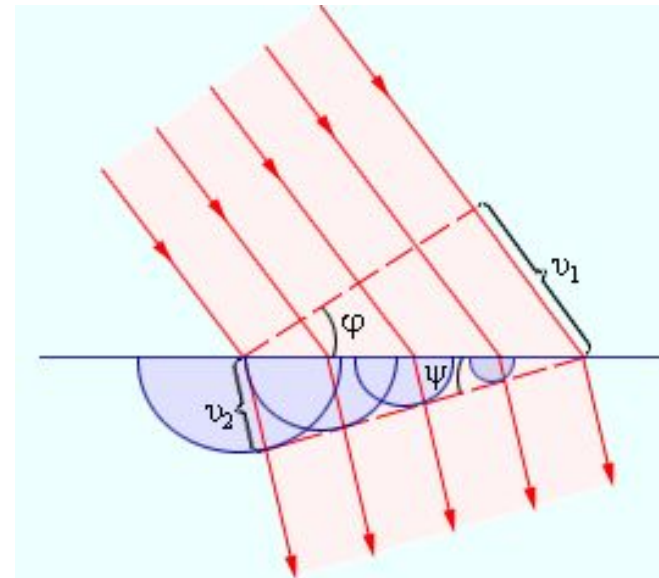
- **Полезное увеличение** – это видимое увеличение, при котором глаз наблюдателя будет полностью использовать разрешающую способность микроскопа, то есть разрешающая способность микроскопа будет такая же, как и разрешающая способность глаза.
- Поскольку обычно диаметр выходного зрачка около 0.5 – 1 мм, угловой предел разрешения глаза 2' – 4' и если берем среднюю длину волны в видимой области спектра (0.5 мкм), то для полезного увеличения микроскопа можно вывести зависимость:

$$500 \cdot \lambda < \bar{\Gamma}_{\text{п}} < 1000 \cdot \lambda$$



# Волновые свойства света

$$\frac{\sin \psi}{\sin \varphi} = \frac{c}{v} = n,$$



- Тот факт, что свет в одних опытах обнаруживает **волновые свойства**, а в других – **корпускулярные**, означает, что свет имеет сложную **двойственную природу**, которую принято характеризовать термином **корпускулярно-волновой дуализм**.
- **Квантовые свойства света:**
- излучение черного тела, фотоэффект, эффект Комптона
- **Волновые свойства света:**
- Интерференция,
- дифракция,
- поляризация света

# Интерференция света

- **Условие максимума:** максимальная

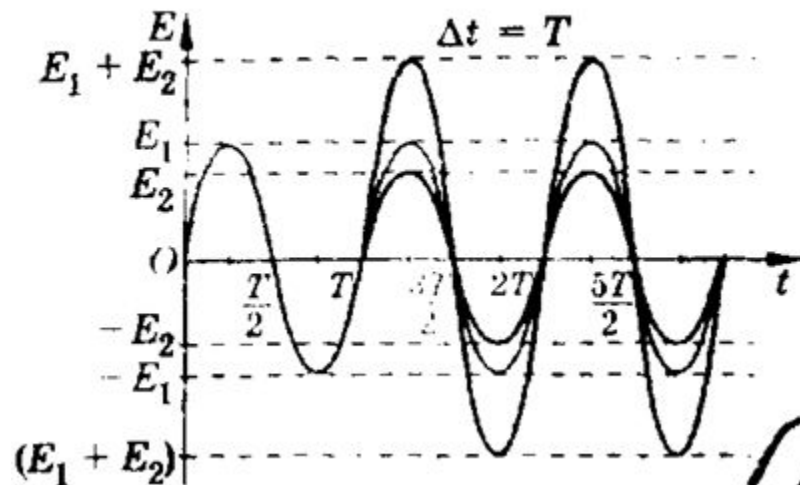
При одинаковом законе колебаний двух источников

**интерференционные максимумы** наблюдаются в точках пространства, для которых **геометрическая разность хода интерферирующих волн равна целому числу длин волн:**

При одинаковом законе колебаний двух источников

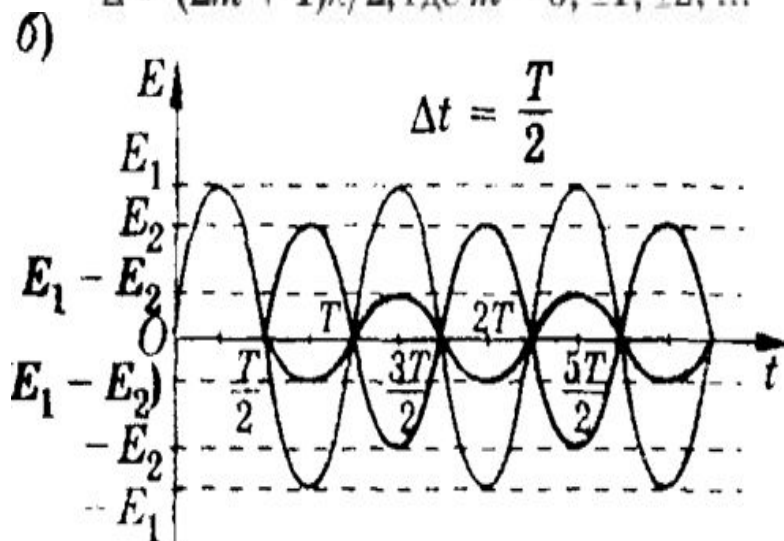
**интерференционные минимумы** наблюдаются в тех точках пространства, для которых **геометрическая разность хода интерферирующих волн равна нечетному числу полуволен**

$$\Delta t = m \cdot T$$



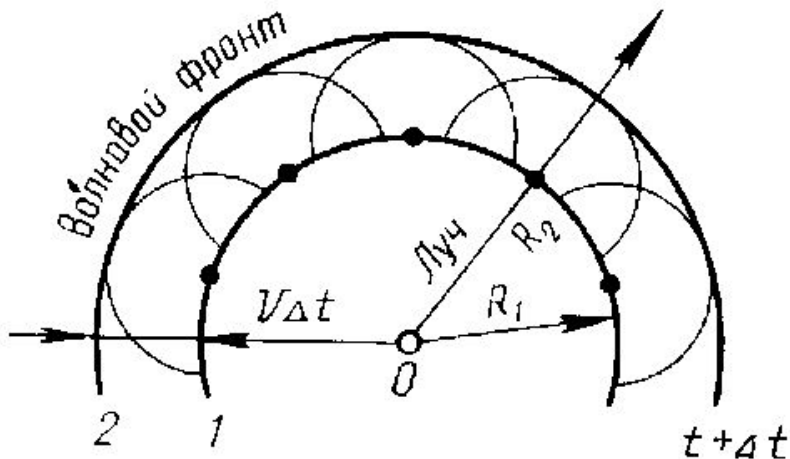
$$\Delta = m\lambda, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$\Delta = (2m + 1)\lambda/2, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$



# Принцип Гюйгенса

- Сформулирован в 1660 году:  
Каждая точка среды, до которой дошло возмущение, является источником вторичных сферических волн, огибающая которых показывает новое положение волнового фронта



Христиан Гюйгенс (1629 – 1695)

# Принцип Ферма (принцип минимального времени)

- В пространстве между двумя точками свет распространяется по тому пути, вдоль которого время его прохождения минимально
- *Для оптики можно сформулировать так: из одной точки в другую свет распространяется по линии с наименьшей оптической длиной пути*

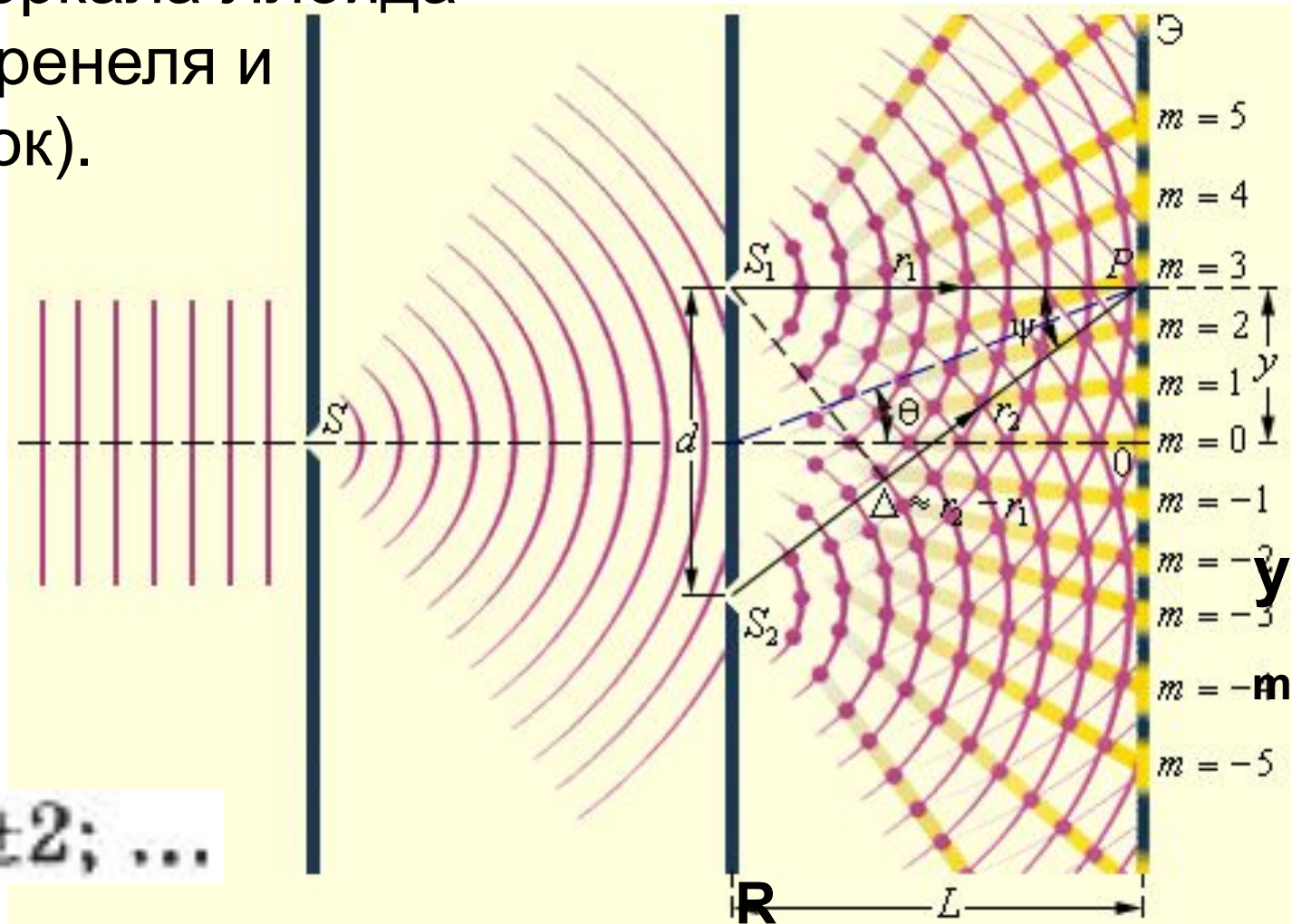


Пьер Ферма (1601 – 1665)



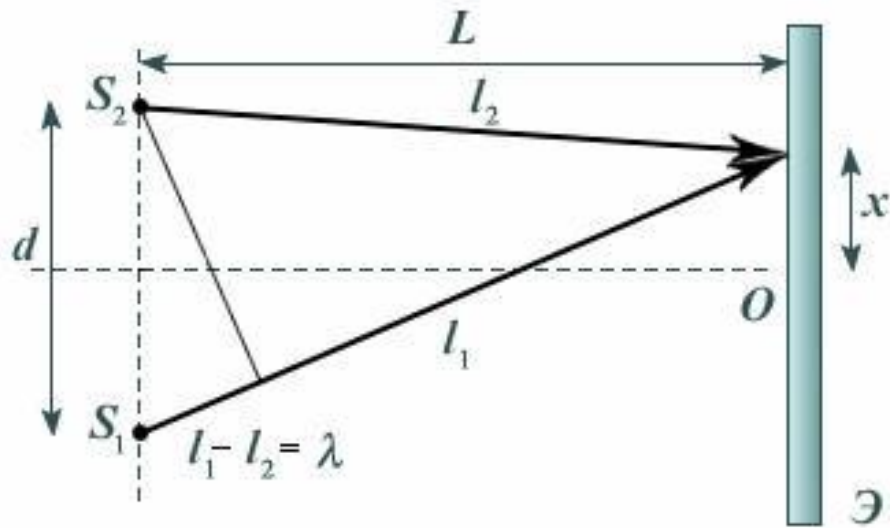
**Когерентные источники**  
можно получить с  
помощью: Зеркала Ллойда  
Бипризмы Френеля и  
Тонких пленок).

# Интерференция света



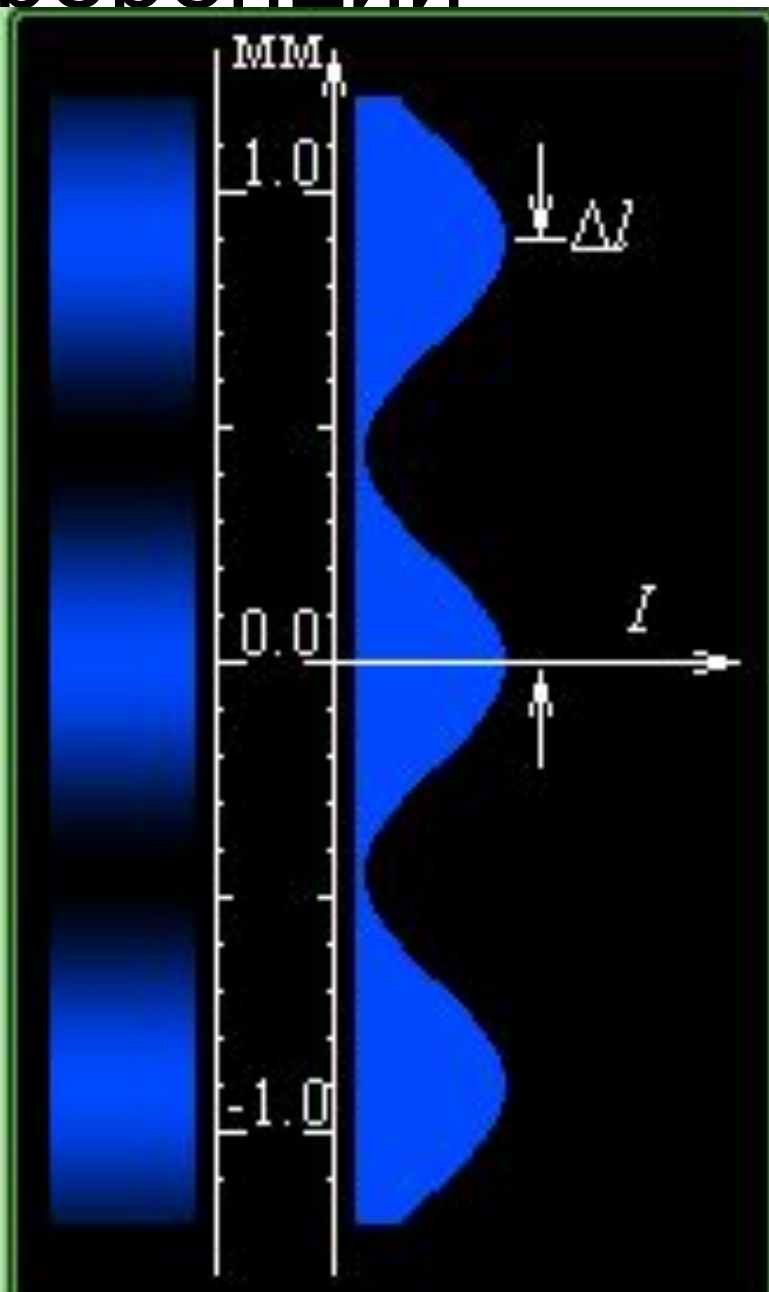
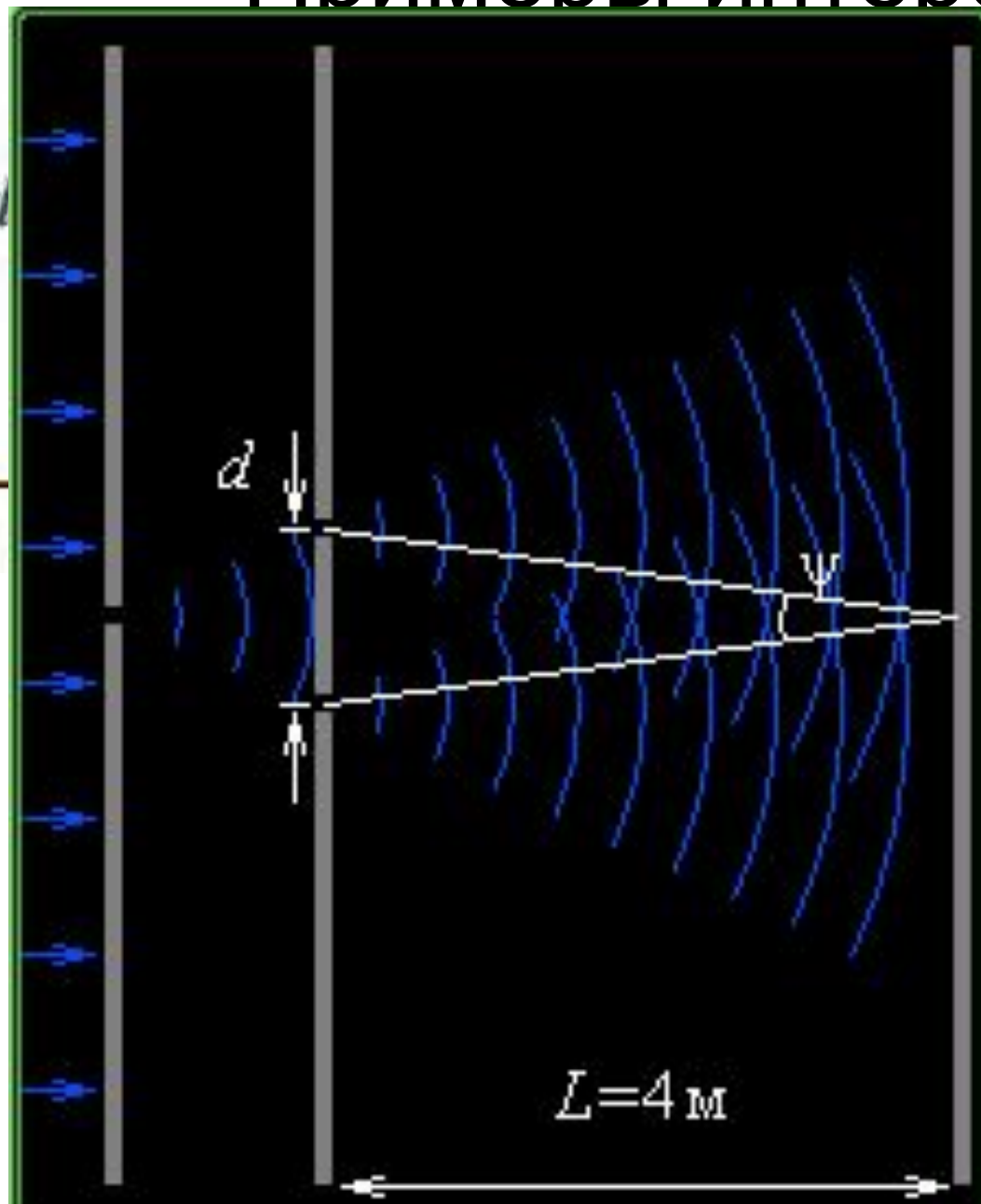
$$m = \pm 1; \pm 2; \dots$$

# Схема опыта Юнга



$$\lambda = \frac{d}{R} \cdot \frac{ym}{m}$$

# Примеры интерференции

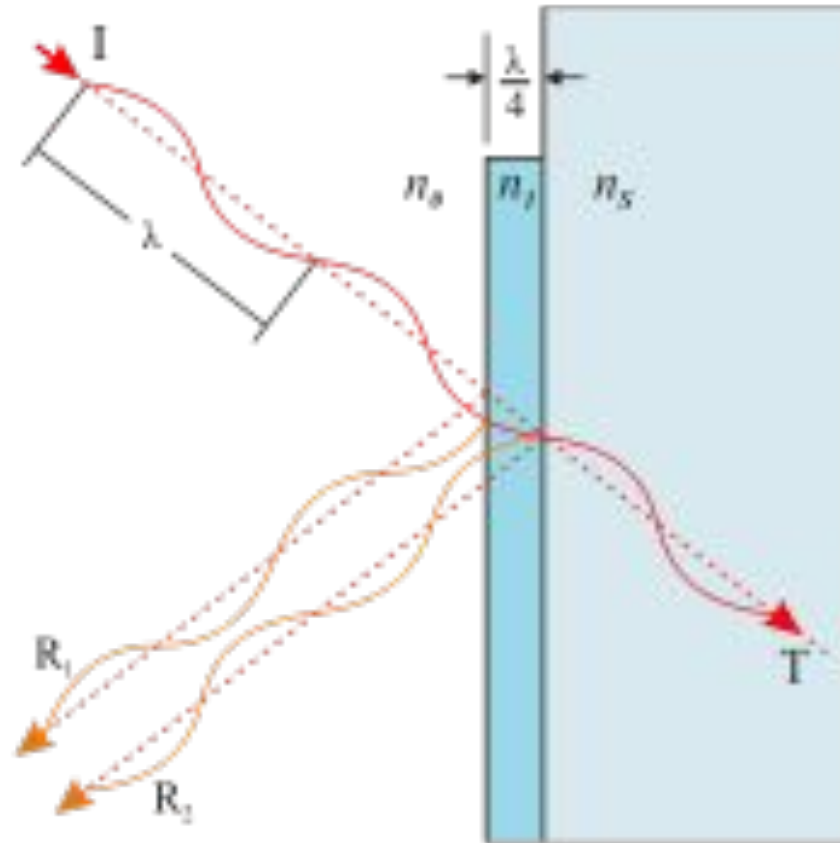


# Просветление

## ОПТИКИ

- **Просветление оптики** — уменьшение отражения света от поверхности линзы в результате **нанесения** на нее специальной **пленки**
- Требуемая **толщина покрытия**
- Просветляющие плёнки уменьшают светорассеяние и отражение падающего света от поверхности оптического элемента, соответственно улучшая светопропускание системы и контраст оптического изображения.

$$d = \frac{1}{4} \cdot v_1 \cdot T = \frac{\lambda_1}{4}$$





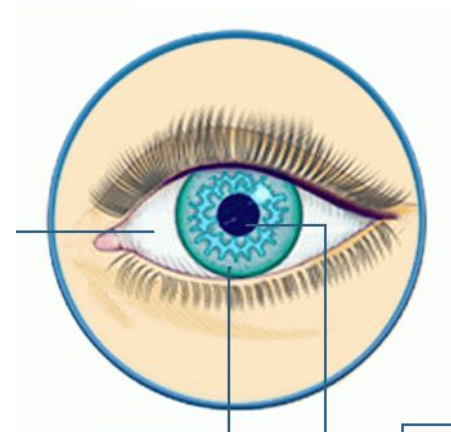
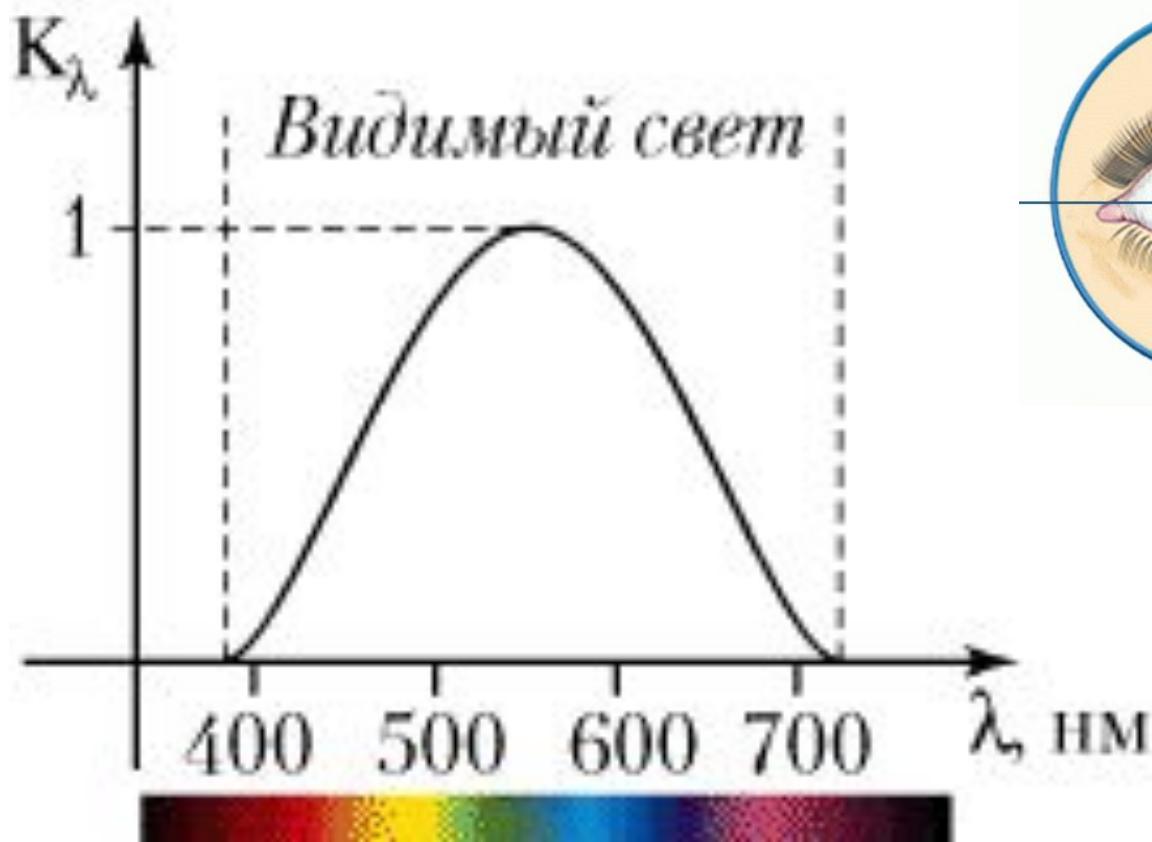
# Дисперсия света

- **Дисперсия света** (разложение света) — это явление **зависимости абсолютного показателя преломления вещества от длины волны** (или частоты) света (частотная дисперсия), или, что то же самое, зависимость фазовой скорости света в веществе от длины волны (или частоты).



**Разложение света в спектр вследствие дисперсии при прохождении через призму (опыт Ньютона)**

# Спектральная чувствительность глаза человека



# Дифракционная решетка

- **Решетки** представляют собой **периодические структуры**, выгравированные специальной делительной машиной на поверхности стеклянной или металлической пластинки;
- Дифракционная решетка **предпочтительнее** в спектральных экспериментах, чем применение щели из-за **слабой видимости дифракционной картины**

и значительной **ширины**

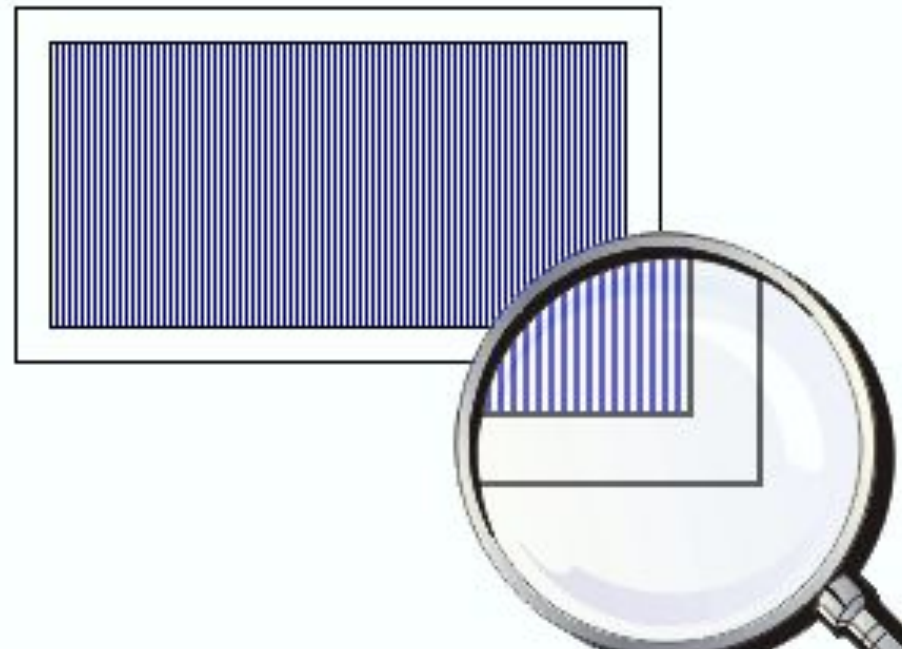
**дифракционных**

**максимумов** на одной

щели. **Увеличение числа щелей** приводит к

**увеличению яркости**

**дифракционной картины**

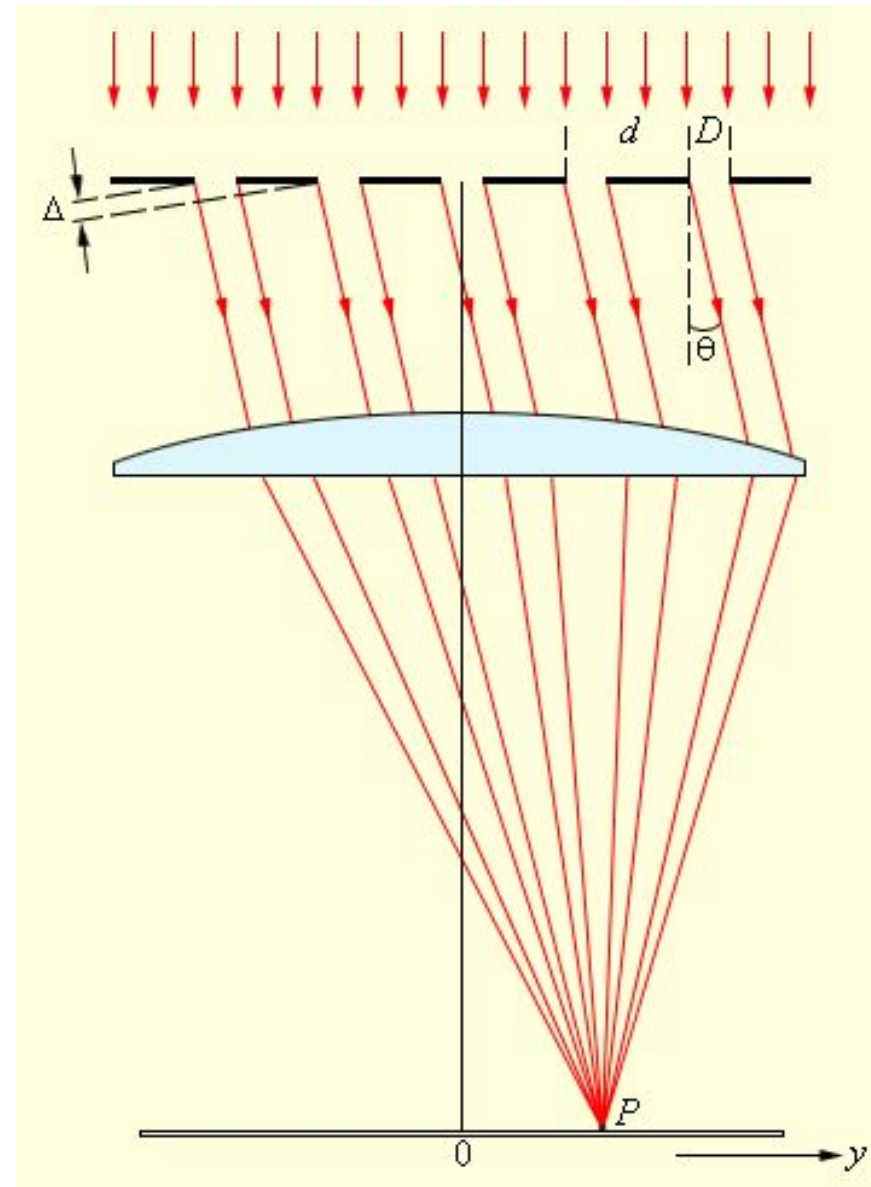




**Условие главных максимумов при дифракции света на решетке:** главные максимумы наблюдаются под углом  $\alpha$ , определяемым условием

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

$$d \cdot \sin \alpha_m = m \cdot \lambda$$



- **Интенсивность света** в главном дифракционном максимуме пропорциональна **квадрату полного числа щелей** дифракционной решетки

$$I = N^2 \cdot I_0$$

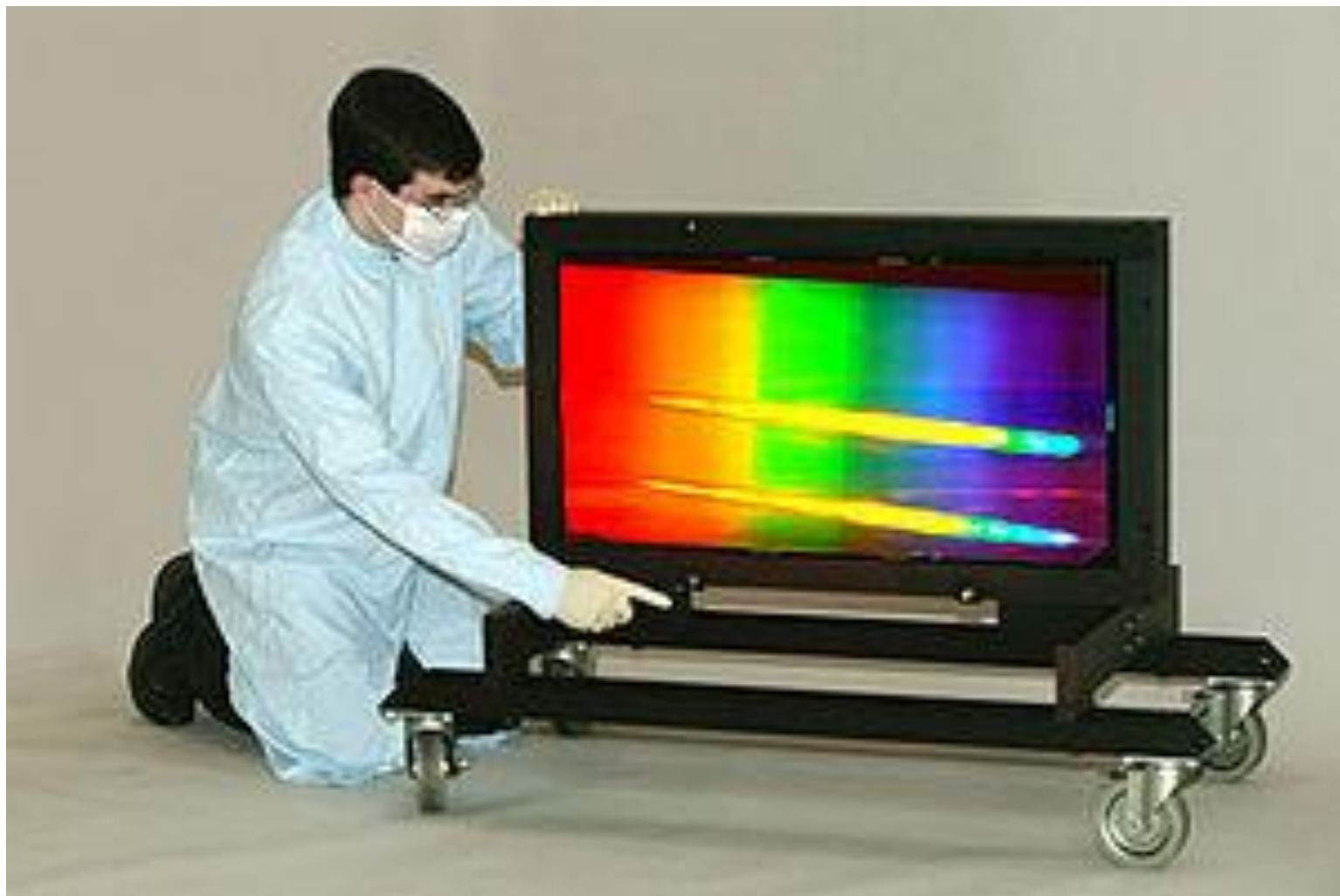
- где  $I_0$  — интенсивность света, излучаемого одной щелью

- **Разрешающая способность** дифракционной решетки

$$A = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = N \cdot m$$

- **Период решётки**

$$d = 1 / N \text{ мм}$$



**Очень большая отражательная дифракционная решётка**