

Лекция 8. Геометрическая и волновая оптика.

Лектор Войтик В. В.

Геометрическая оптика.

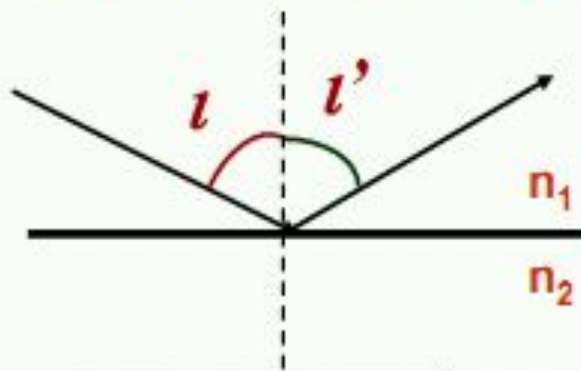
Линзы. Оптическая система глаза.

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 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

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

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

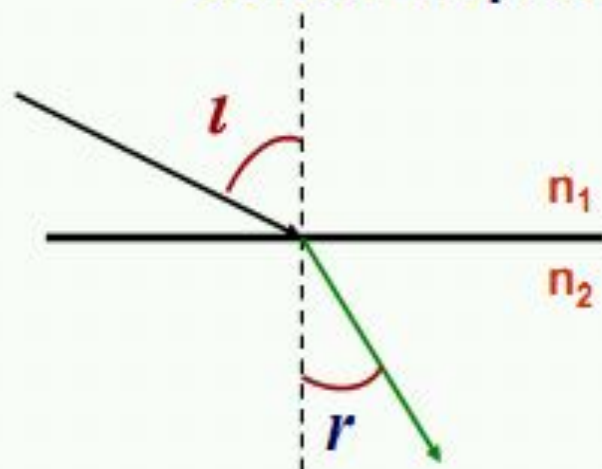


➡ Угол падения равен углу отражения:

$$i = i'$$

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

Законы преломления света



$$n_1 < n_2$$

$$r < i$$

$$n_1 < n_2$$

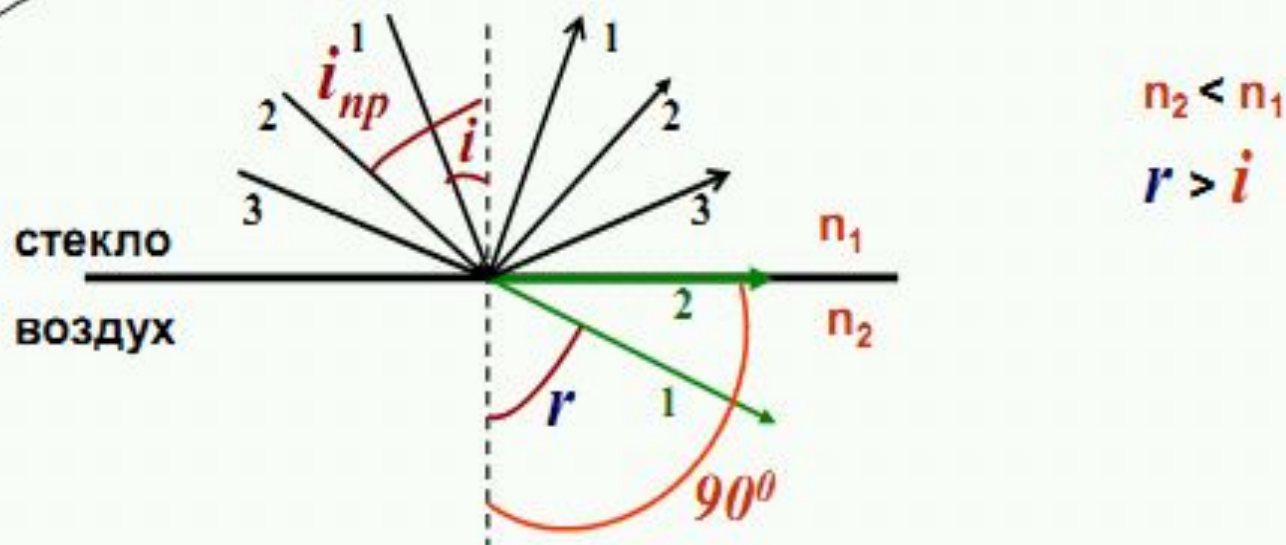


- ➡ Падающий и преломленный лучи, и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точку падения луча, **лежат в одной плоскости**



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

n_{21} – относительный показатель преломления



➡ **Полное внутреннее отражение света** – исчезновение преломленных лучей

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

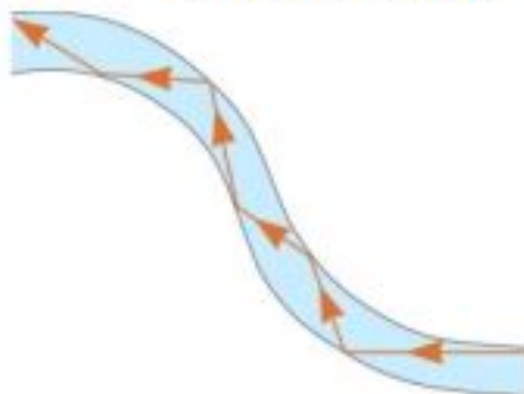
➡
$$\frac{\sin i_{np}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

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

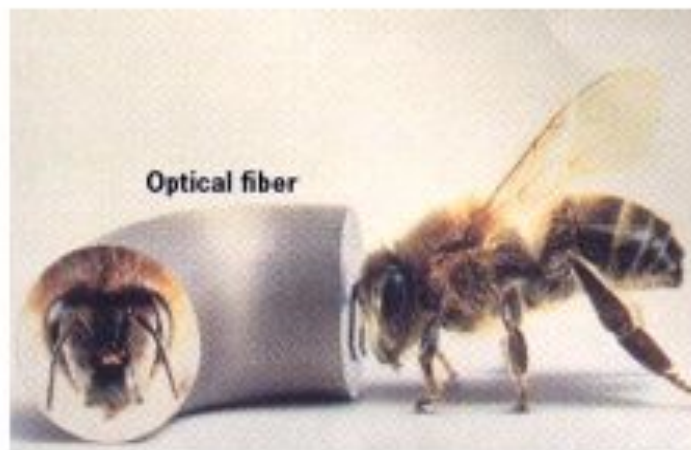
➡ **Полное внутреннее отражение** возможно, только если свет падает из оптически более плотной в оптически менее плотную среду, т.е. когда $n_1 > n_2$

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

ОПТОВОЛОКНО

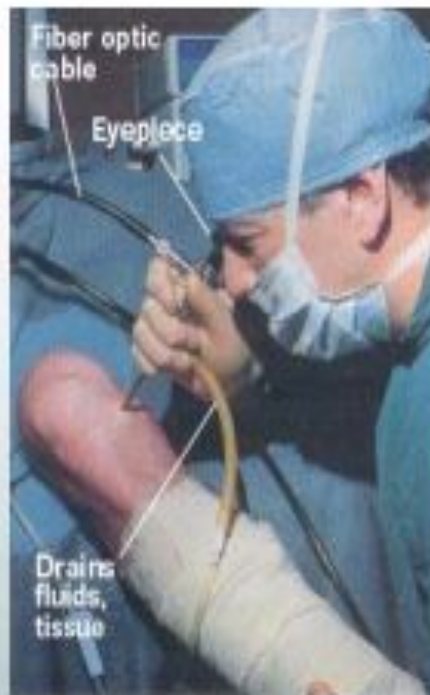
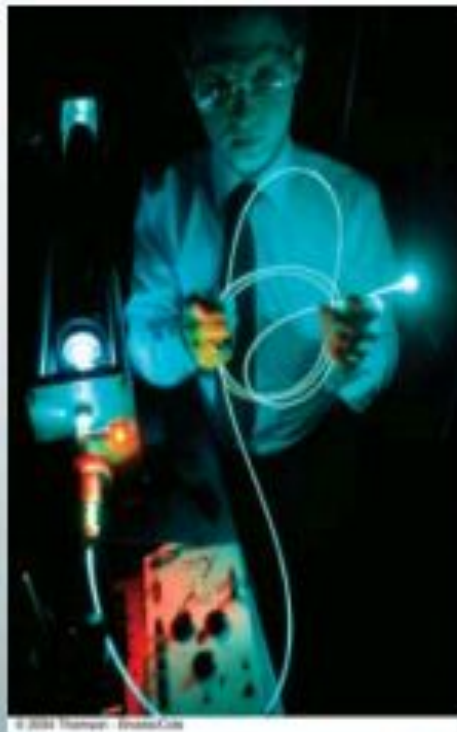


©2004 Thomson - Brooks/Cole



©2004 Thomson - Brooks/Cole

Применение волоконной оптики

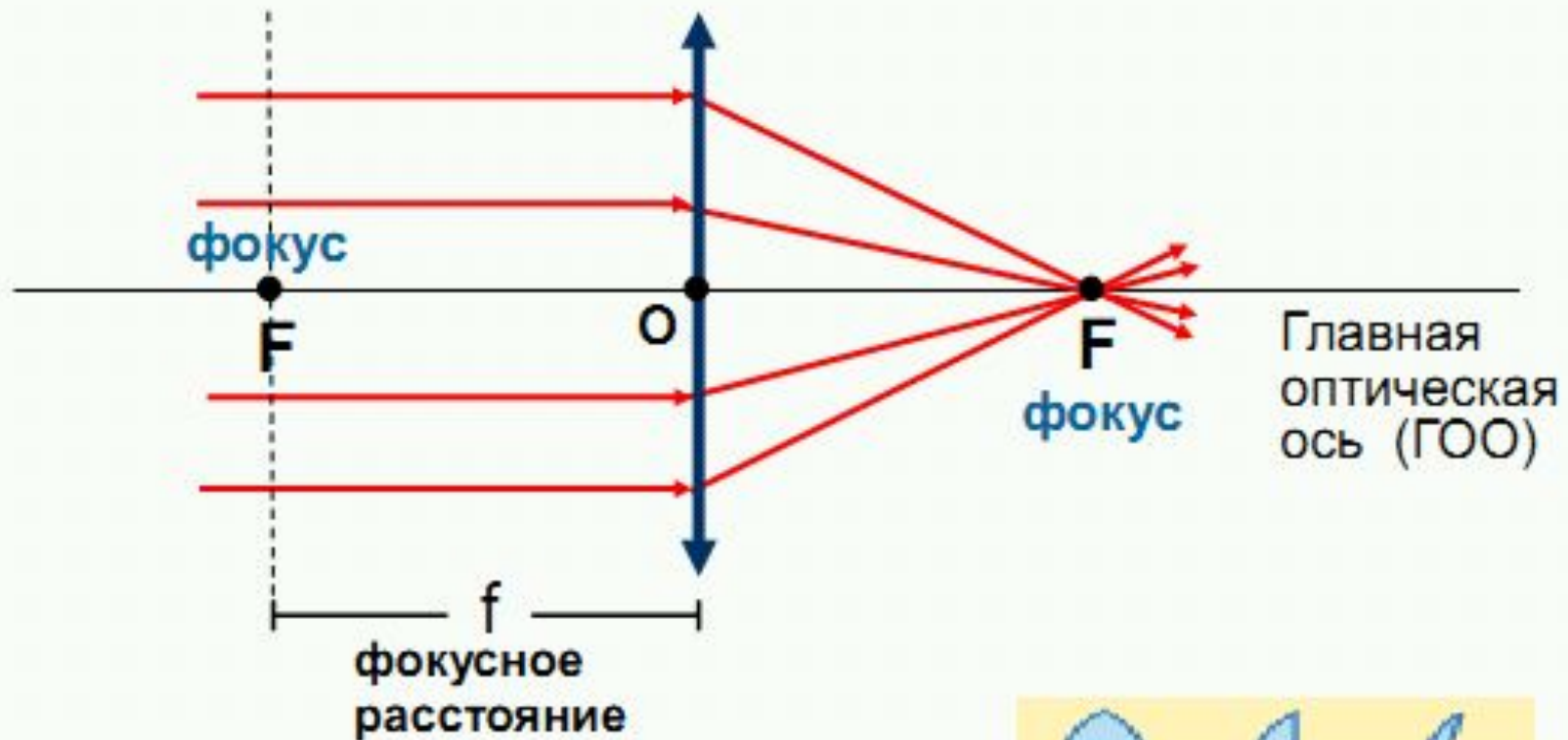


II. Линзы. Виды изображений в линзах

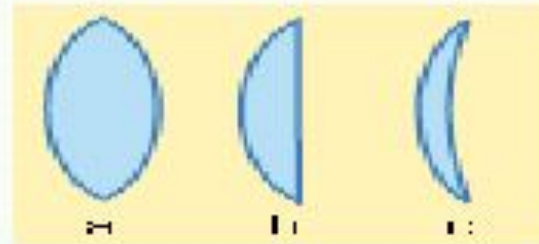
- ➡ **Линза** – это **прозрачное тело**, ограниченное с двух сторон криволинейными (сферическими) поверхностями
- ➡ **Главная оптическая ось линзы (ГОО)** – прямая, проходящая через центры сферических поверхностей линзы и ее оптический центр
- ➡ **Основное свойство линзы** – способность давать **изображение**

Виды линз:

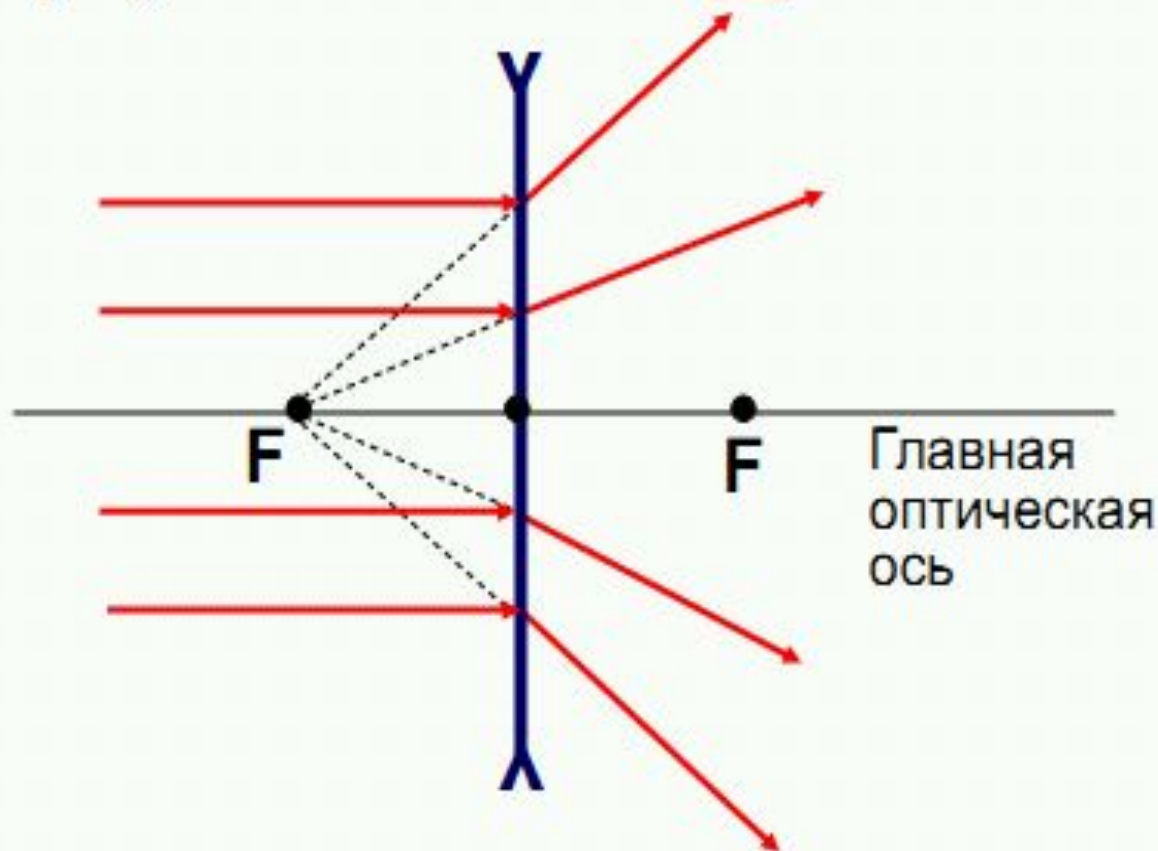
а) **собирающие** – после прохождения через линзу лучи отклоняются в сторону ГОО



Примеры:



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

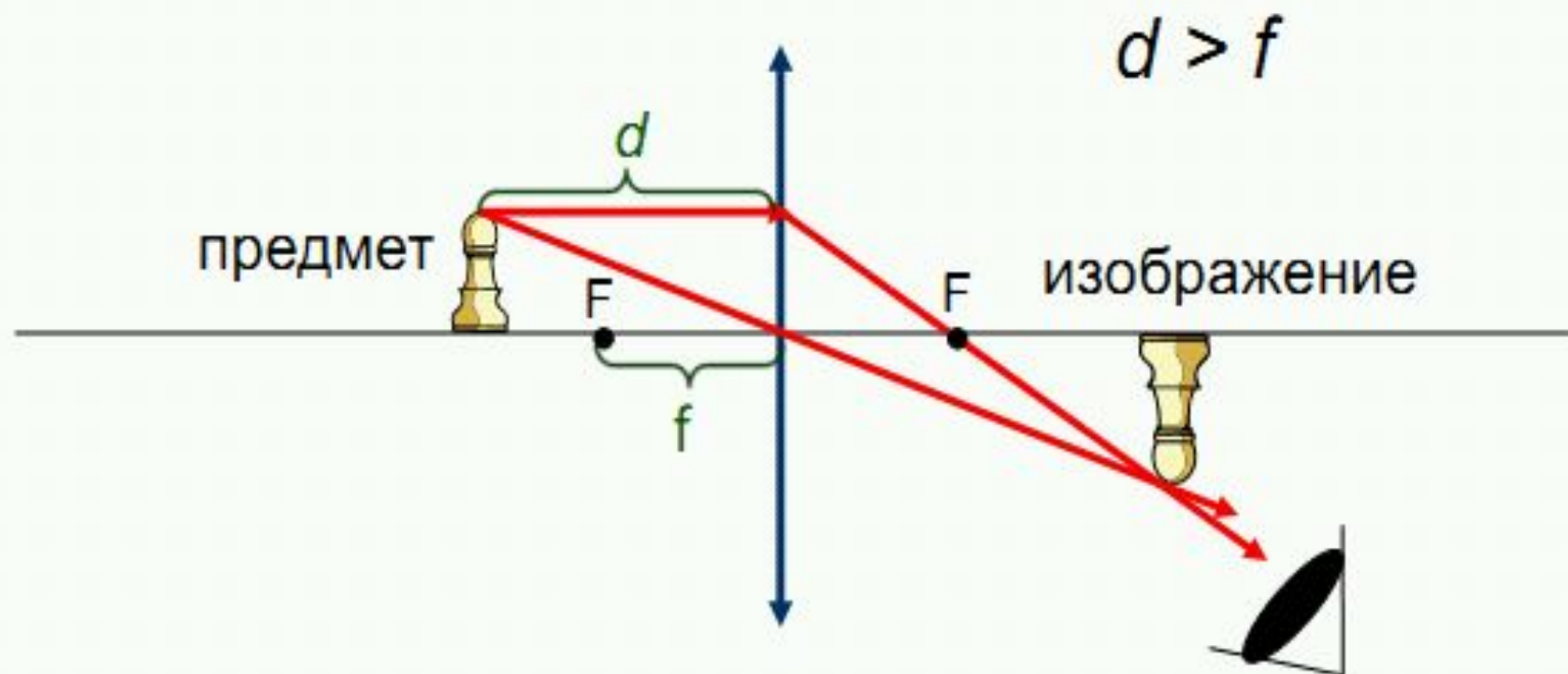


Примеры:

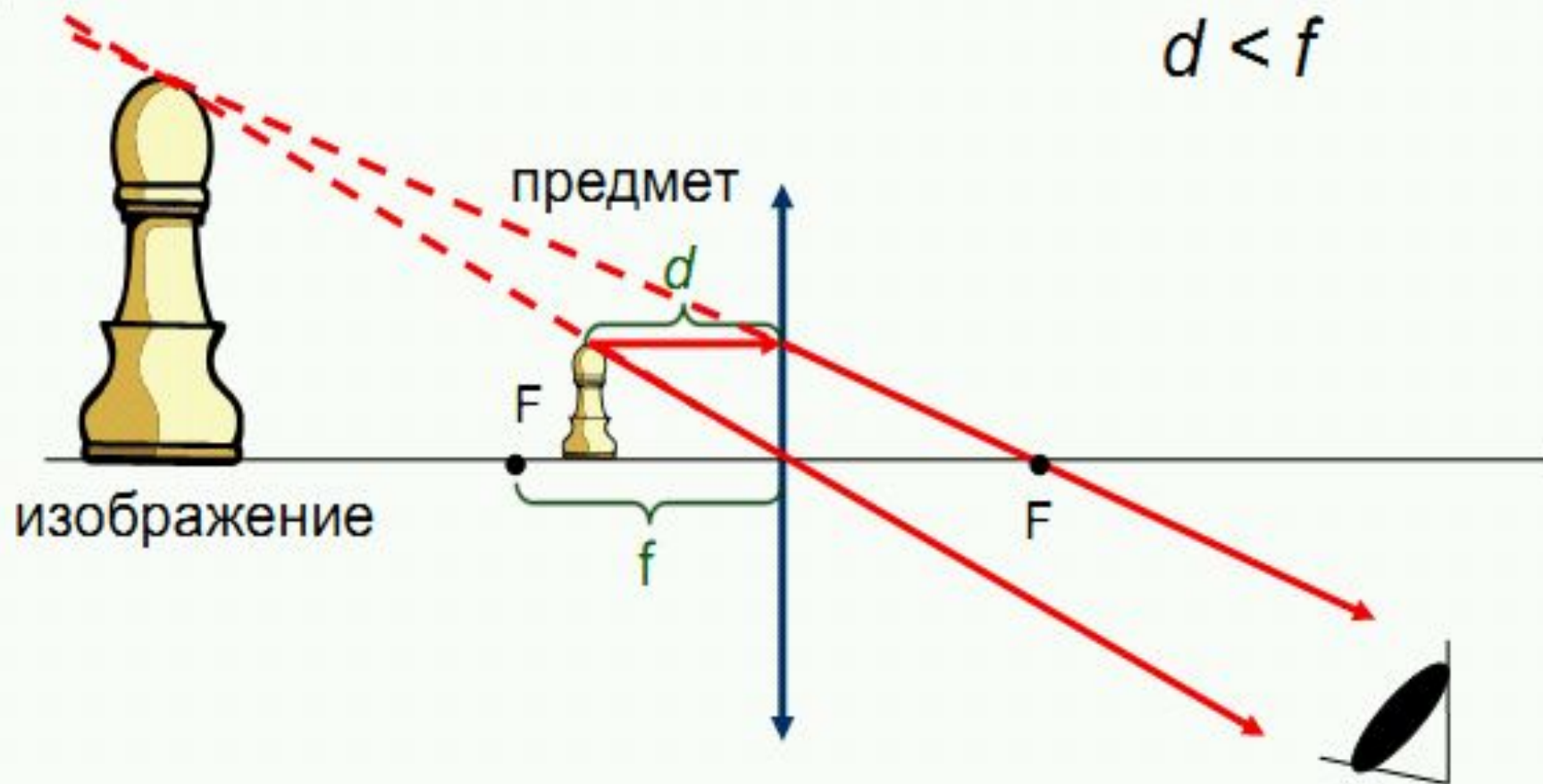


Виды изображений в линзах:

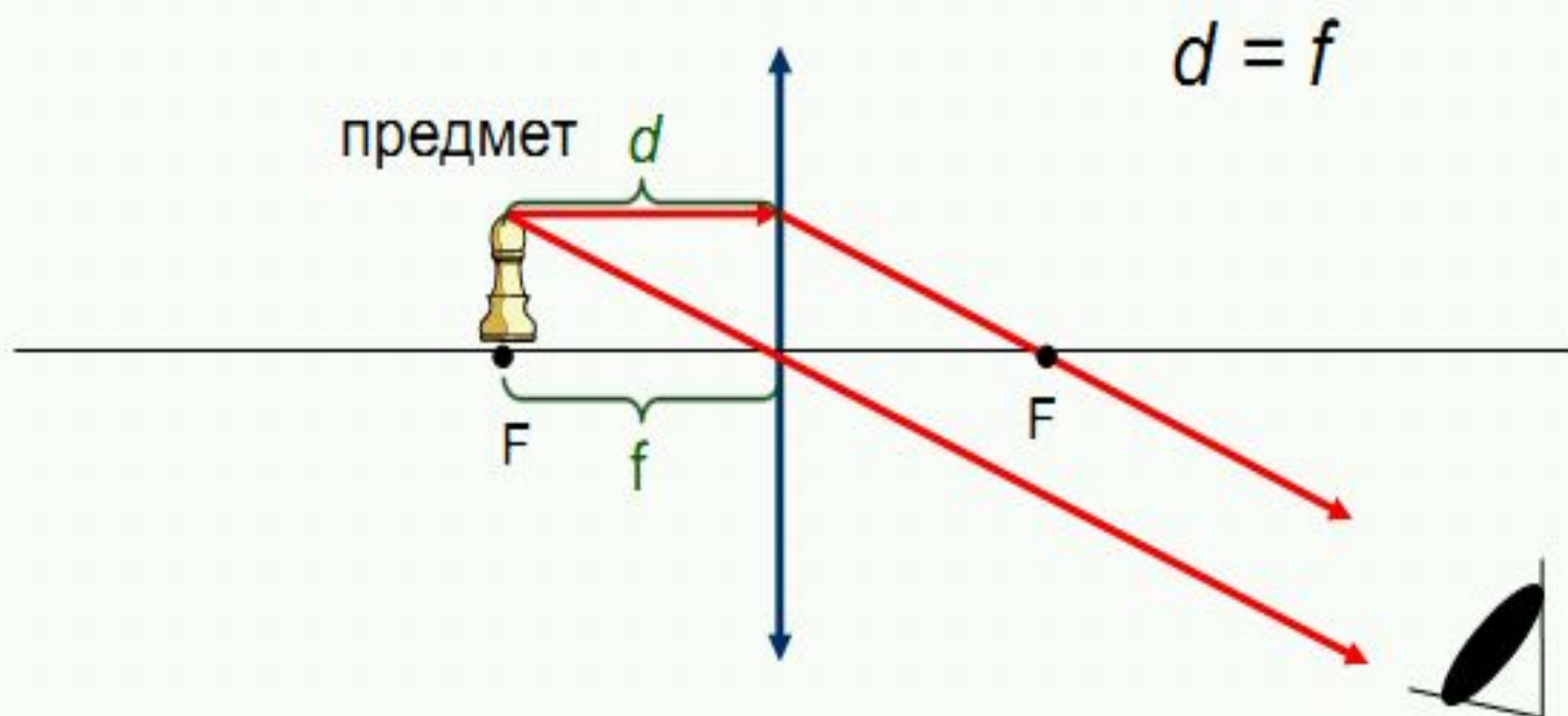
1) Собирающие линзы



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

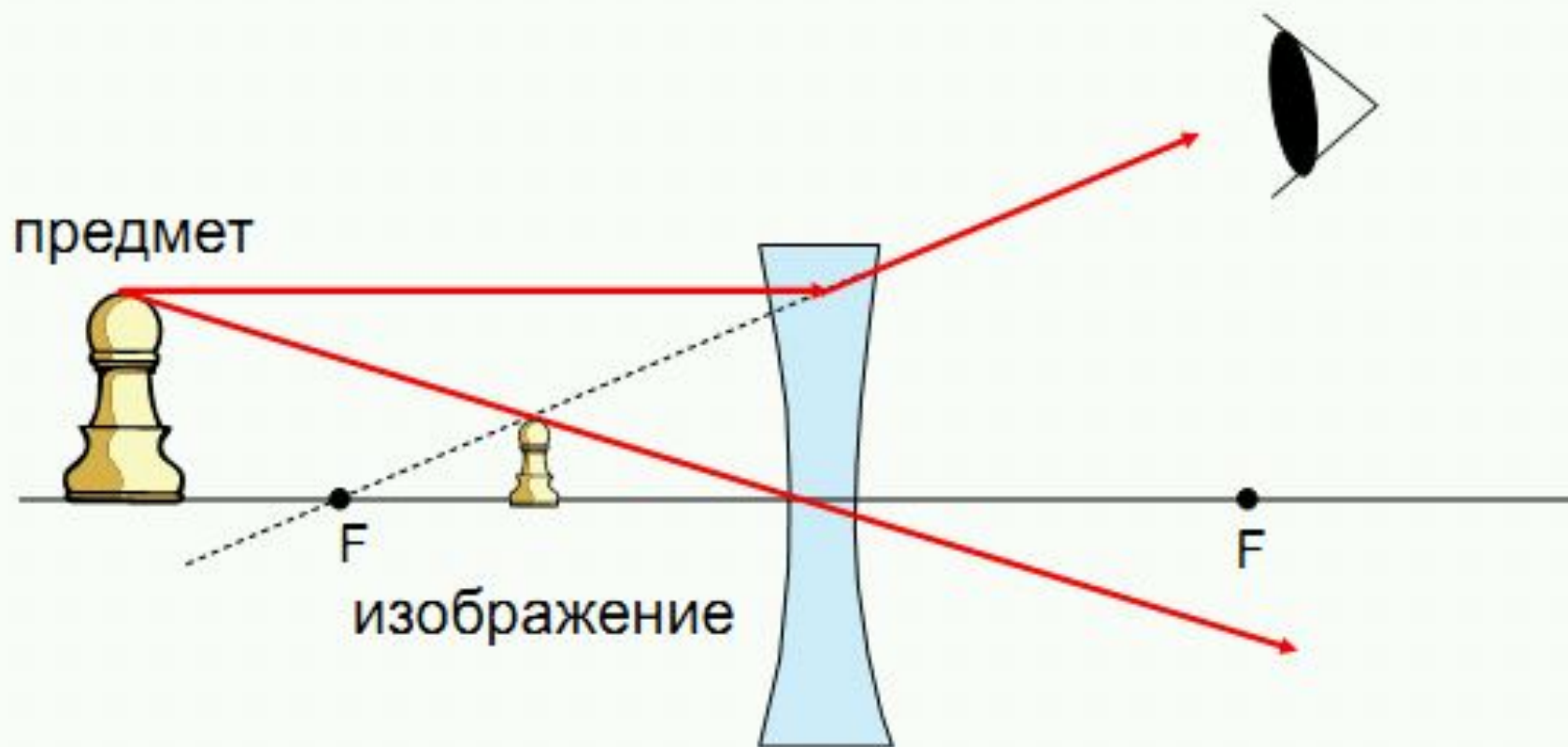


➡ Если d меньше f , то изображение предмета увеличенное, мнимое, прямое



➡ 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⁻¹

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

➡ **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)

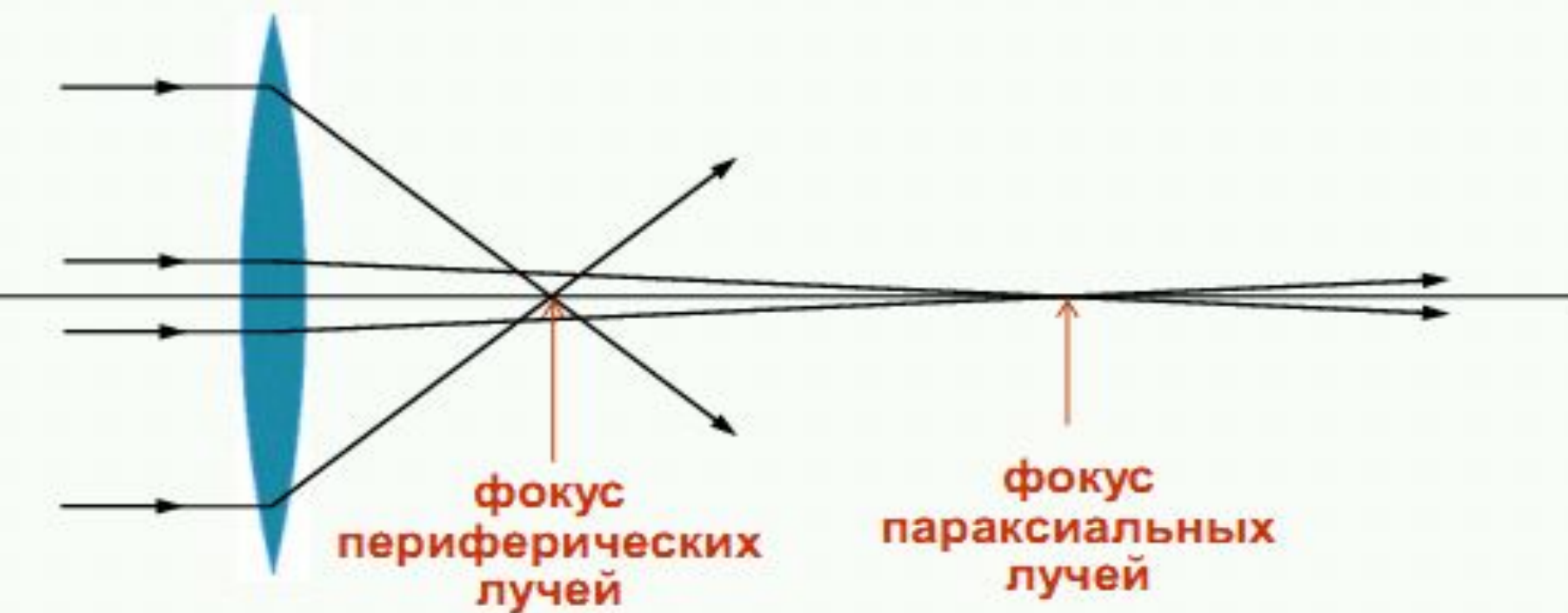
III. Аберрации линз

➡ **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:

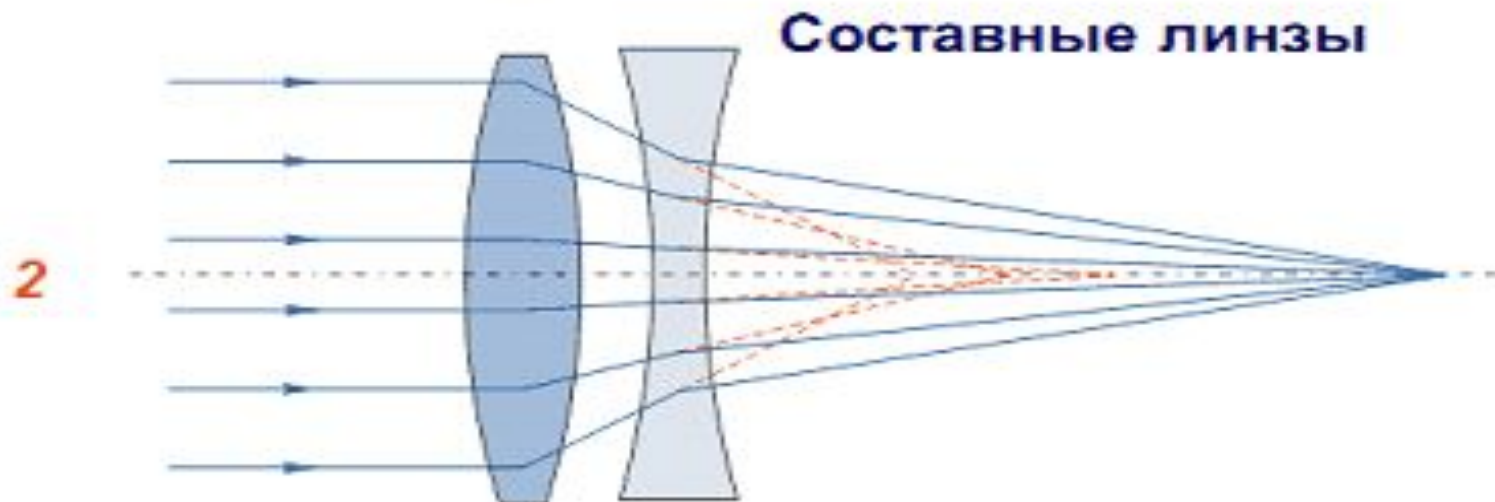
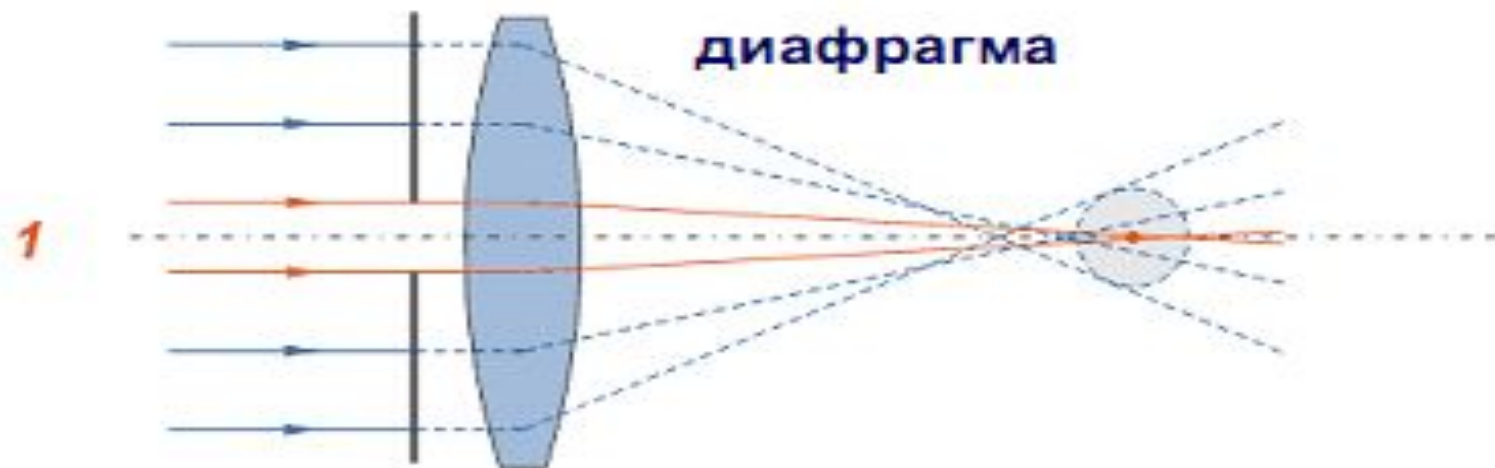
- заключается в том, что периферические части линзы **сильнее отклоняют лучи**, чем центральные
- фокусы для лучей света, проходящих через линзу на разных расстояниях от ГОО, **не** совпадают



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

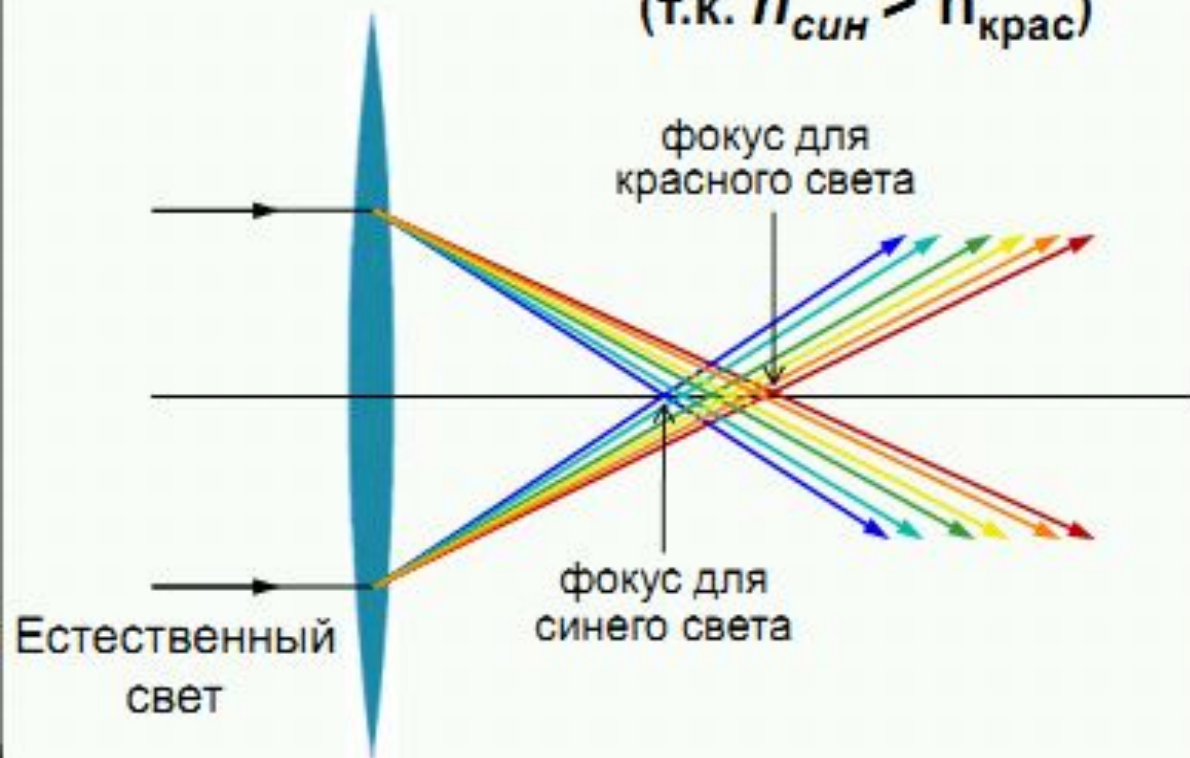
➡ Сферическую aberrацию **устраняют:**

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



- при хроматической аберрации положения фокусов для лучей разных длин волн **не** совпадают
- Лучи **синего** света отклоняются линзой сильнее , чем лучи **красного** света

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



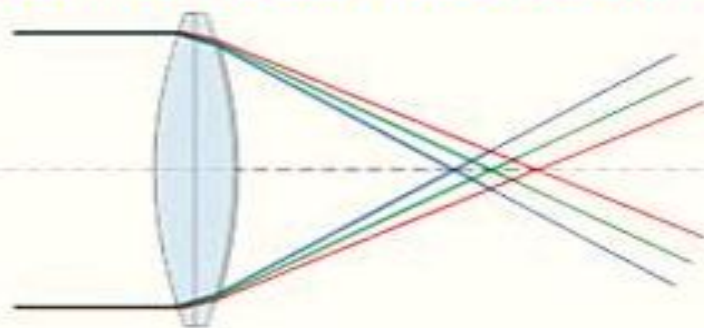
➡ Изображение окрашено в радужные кольца



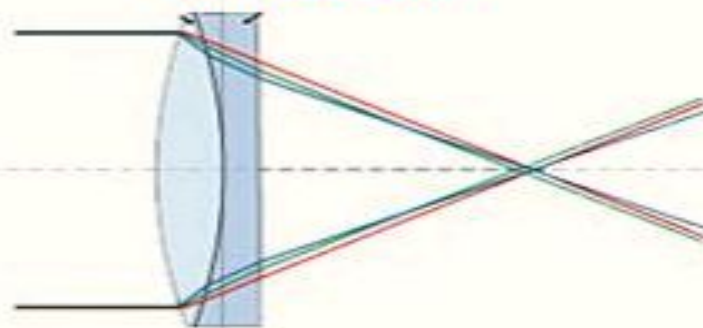
хроматическую aberrацию **устраняют:**

- ✓ 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



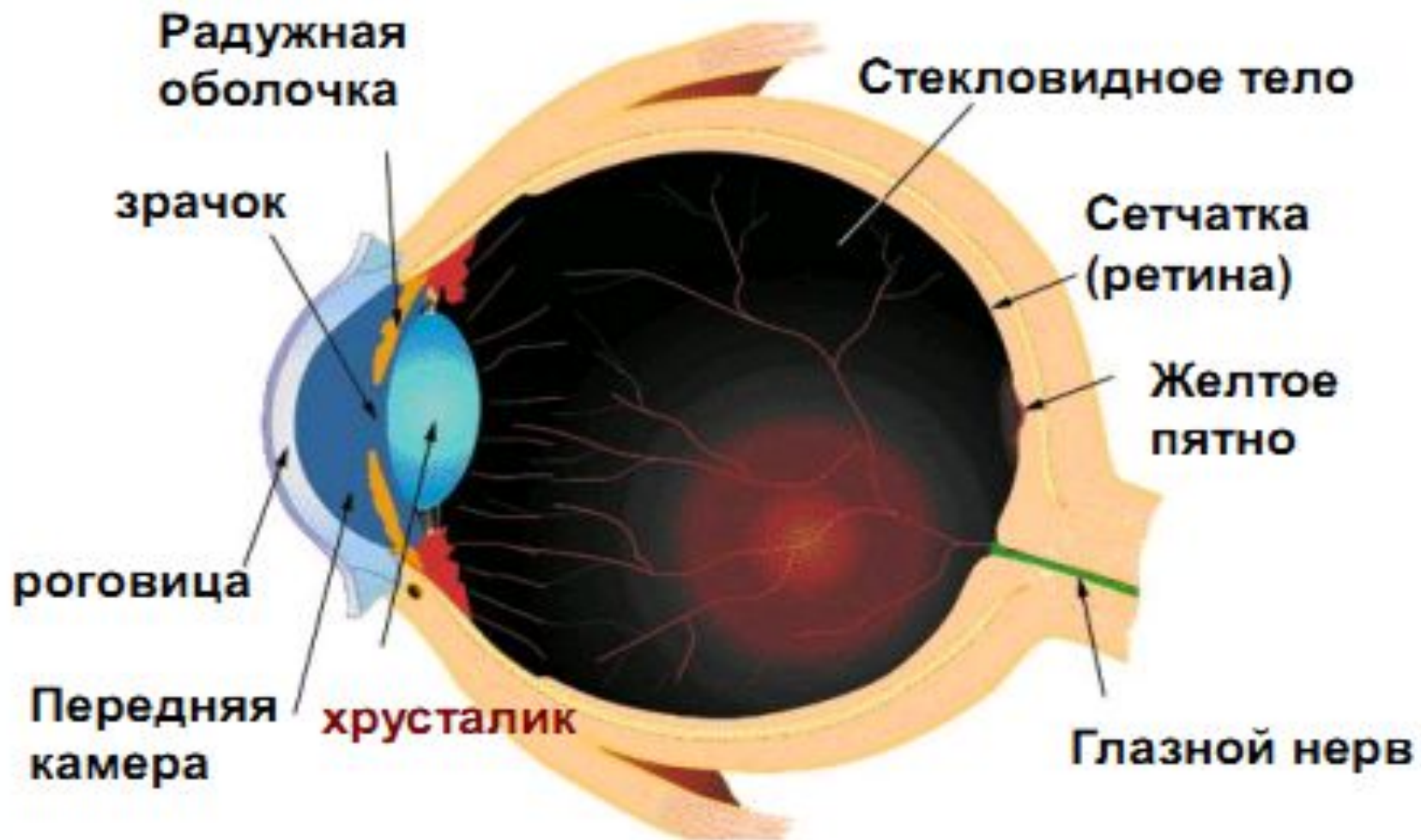
- Происходит если **лучи**, исходящие из точки, составляют **большие углы с оптической осью**
- Происходит за счет **асимметрии оптической системы**
- Наиболее характерна для глаза человека
- Устраняют при помощи подбора системы линз с разной кривизной

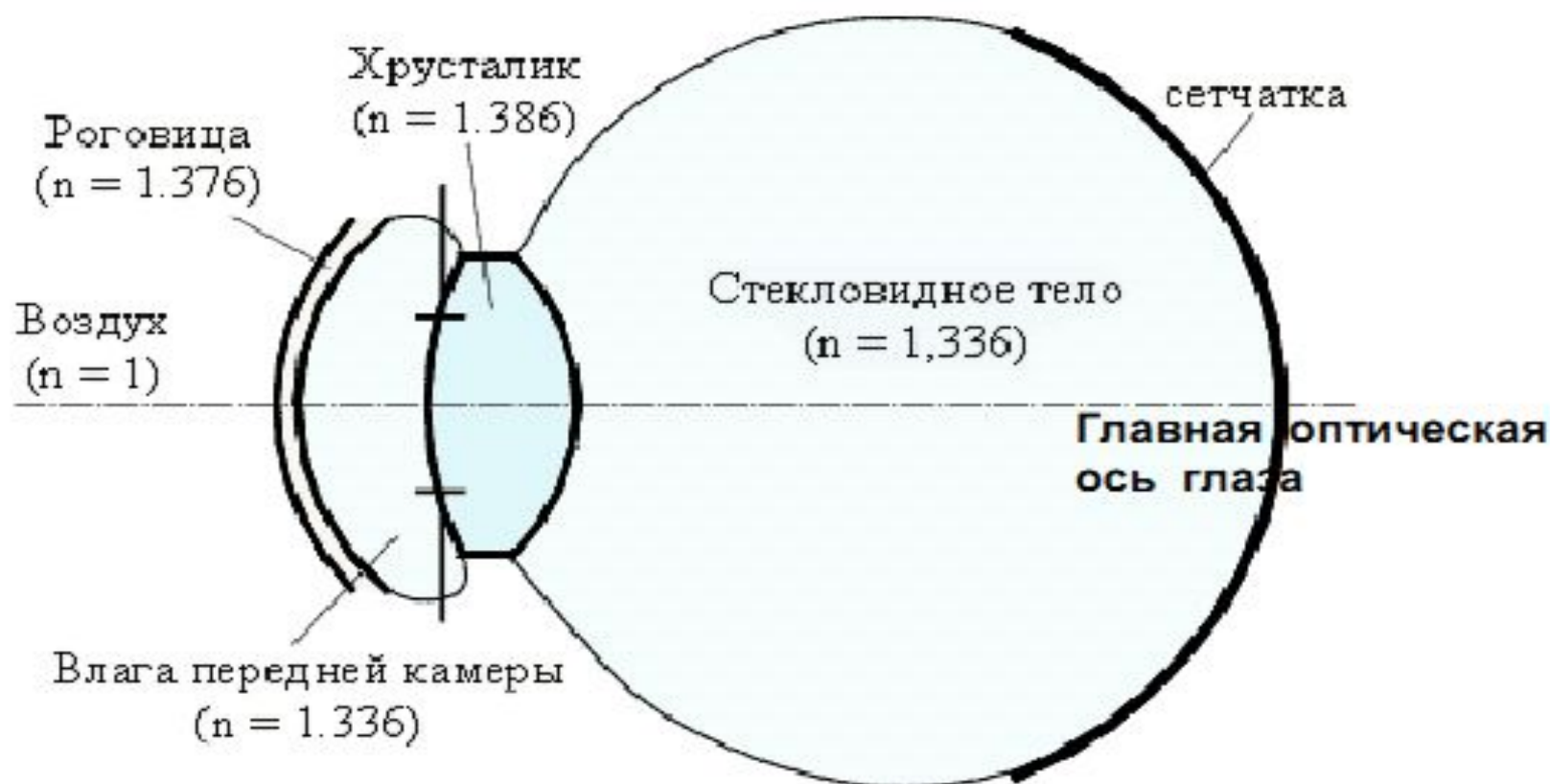
г) дисторсия:

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



IV. Оптическая система глаза



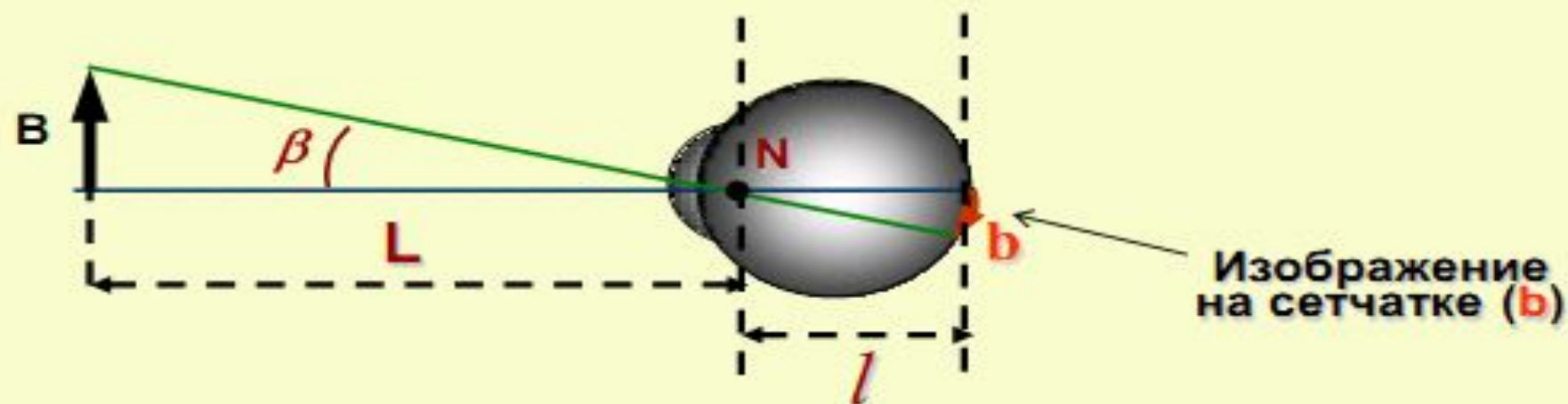


➔ **Световоспринимающий аппарат** : сетчатка (состоит из светочувствительных клеток – палочек и колбочек)

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)



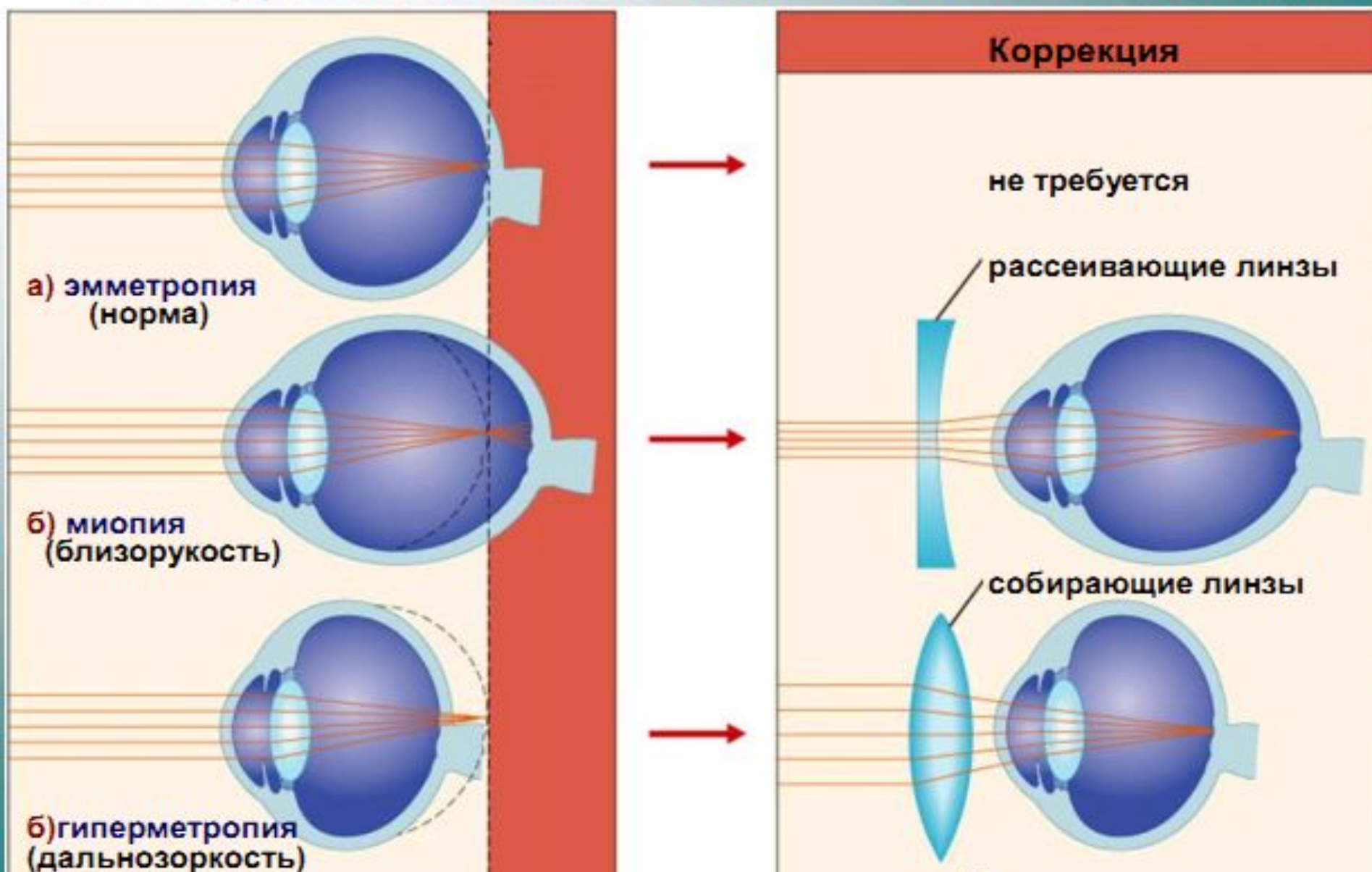
N - единая узловая точка (оптический центр глаза)

β – угол зрения (угол между лучами, идущими от крайних точек предмета через оптический центр глаза)

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

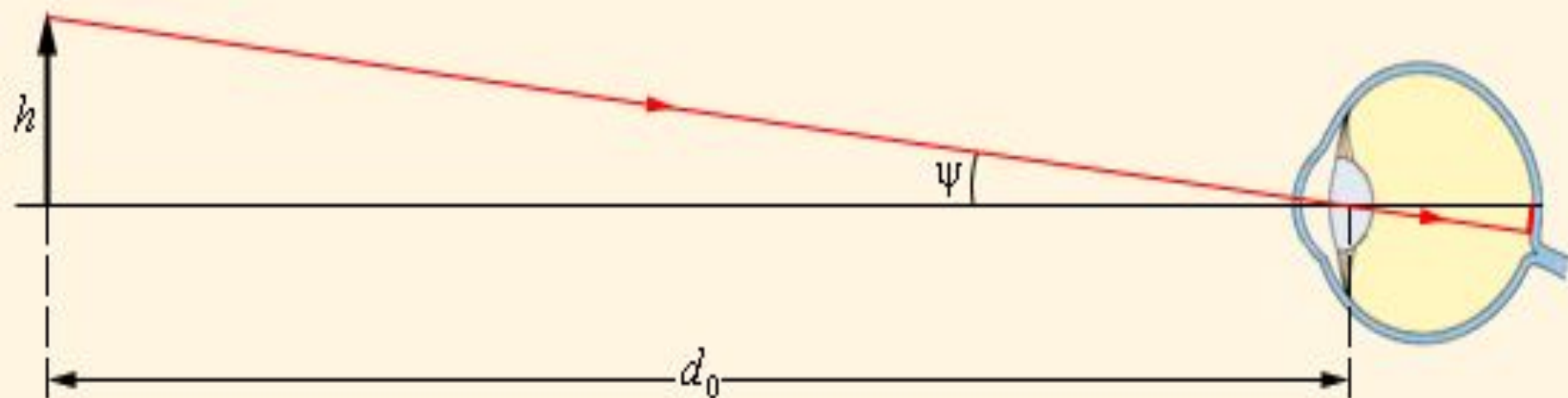
$$b = l \cdot \operatorname{tg} \beta$$

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

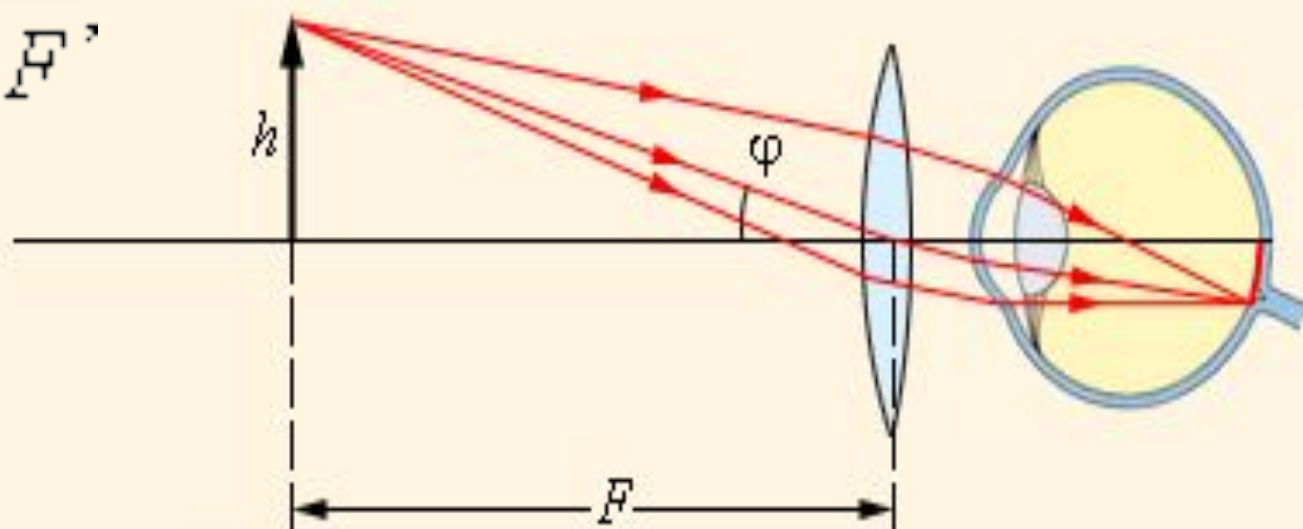
Действие лупы



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

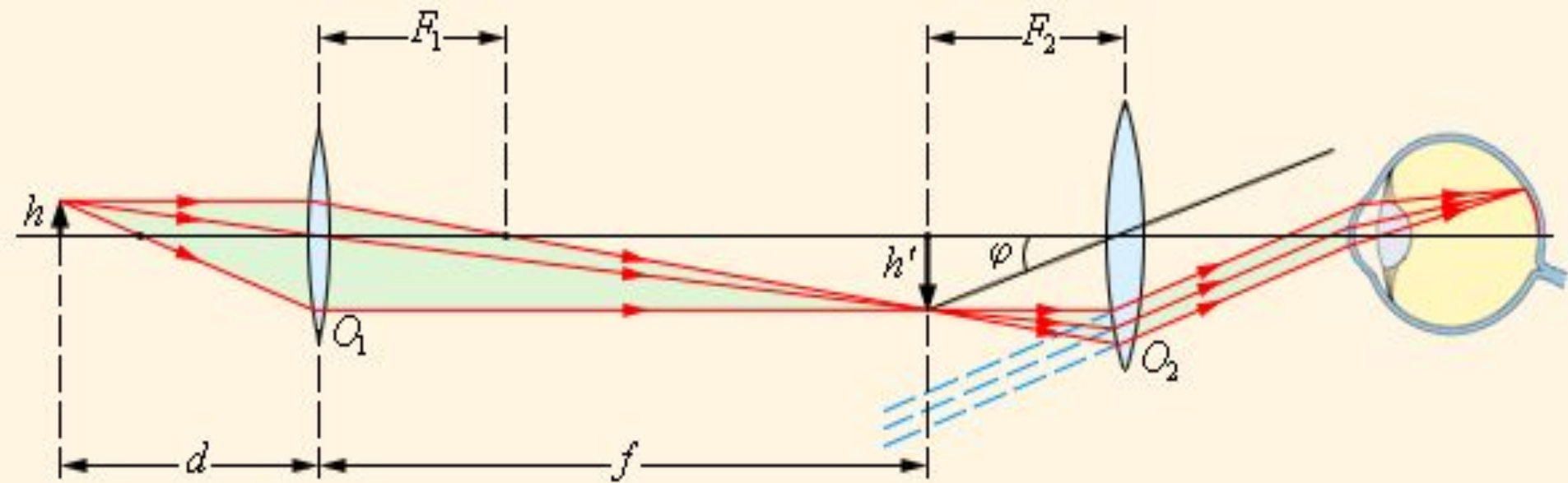
(a)

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

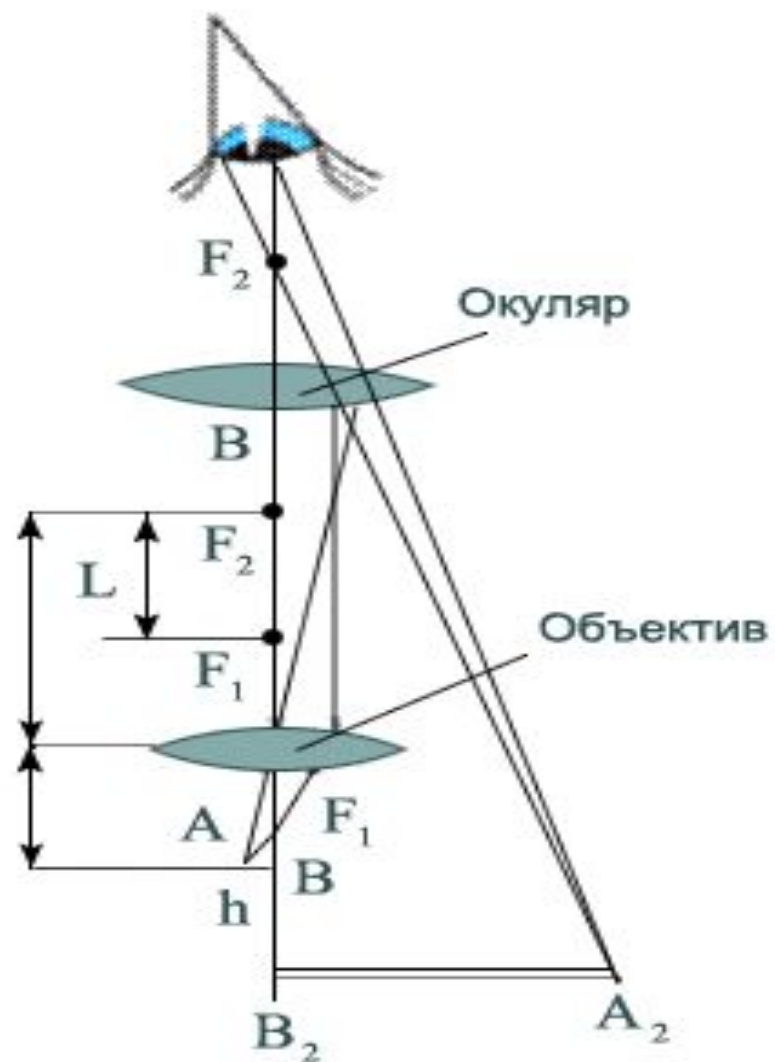


(b)

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 σ .

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

- 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 $\lambda = 0.5 \text{ мкм}$ 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

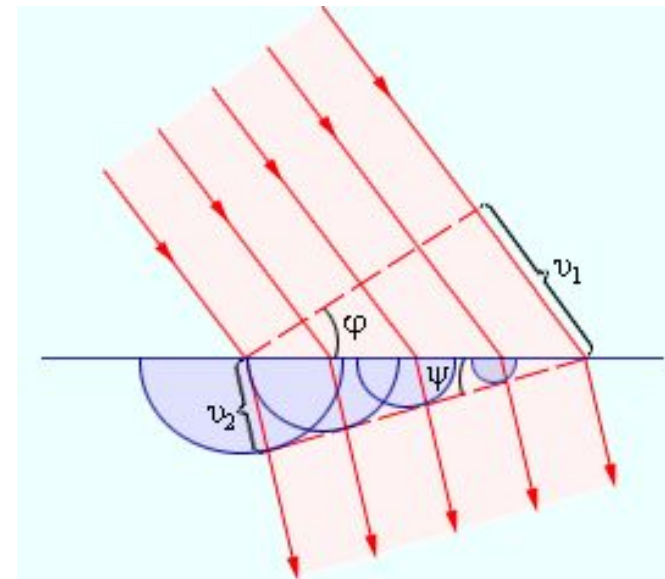
$$\sigma = \frac{\lambda}{2A} = \frac{0.2}{2 \cdot 1} = 0.1 \text{ мкм}$$

- **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:

$$500 \cdot A < \bar{\Gamma}_{\pi} < 1000 \cdot A$$

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

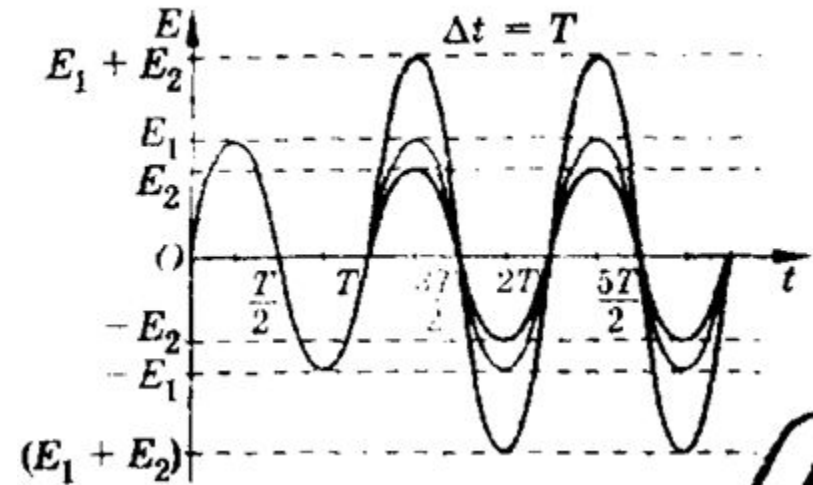
При одинаковом законе колебаний двух источников

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

При одинаковом законе колебаний двух источников

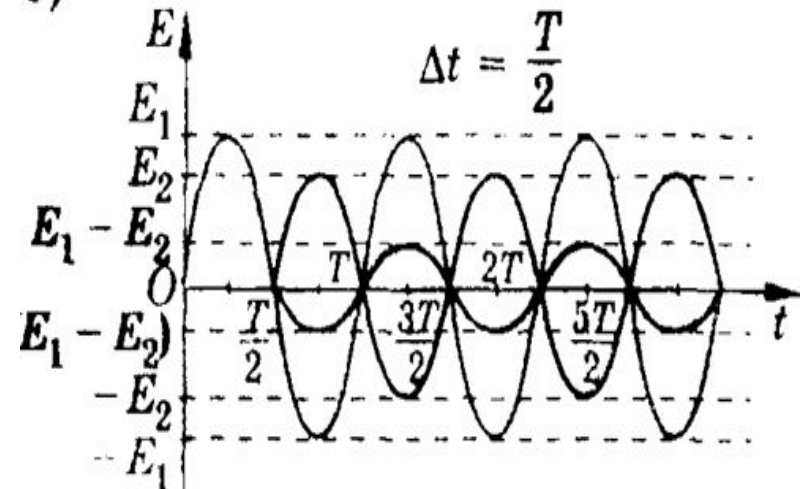
интерференционные минимумы наблюдаются в тех точках пространства, для которых **геометрическая разность хода интерферирующих волн равна нечетному числу полуволн**

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



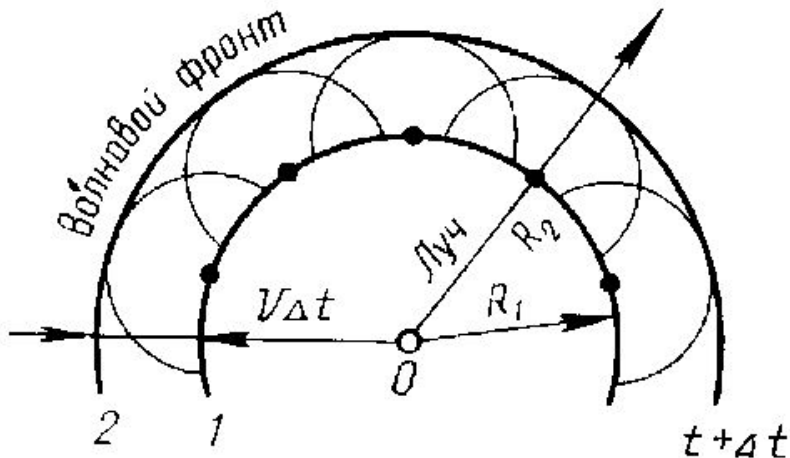
$$\Delta = m\lambda, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

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



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)

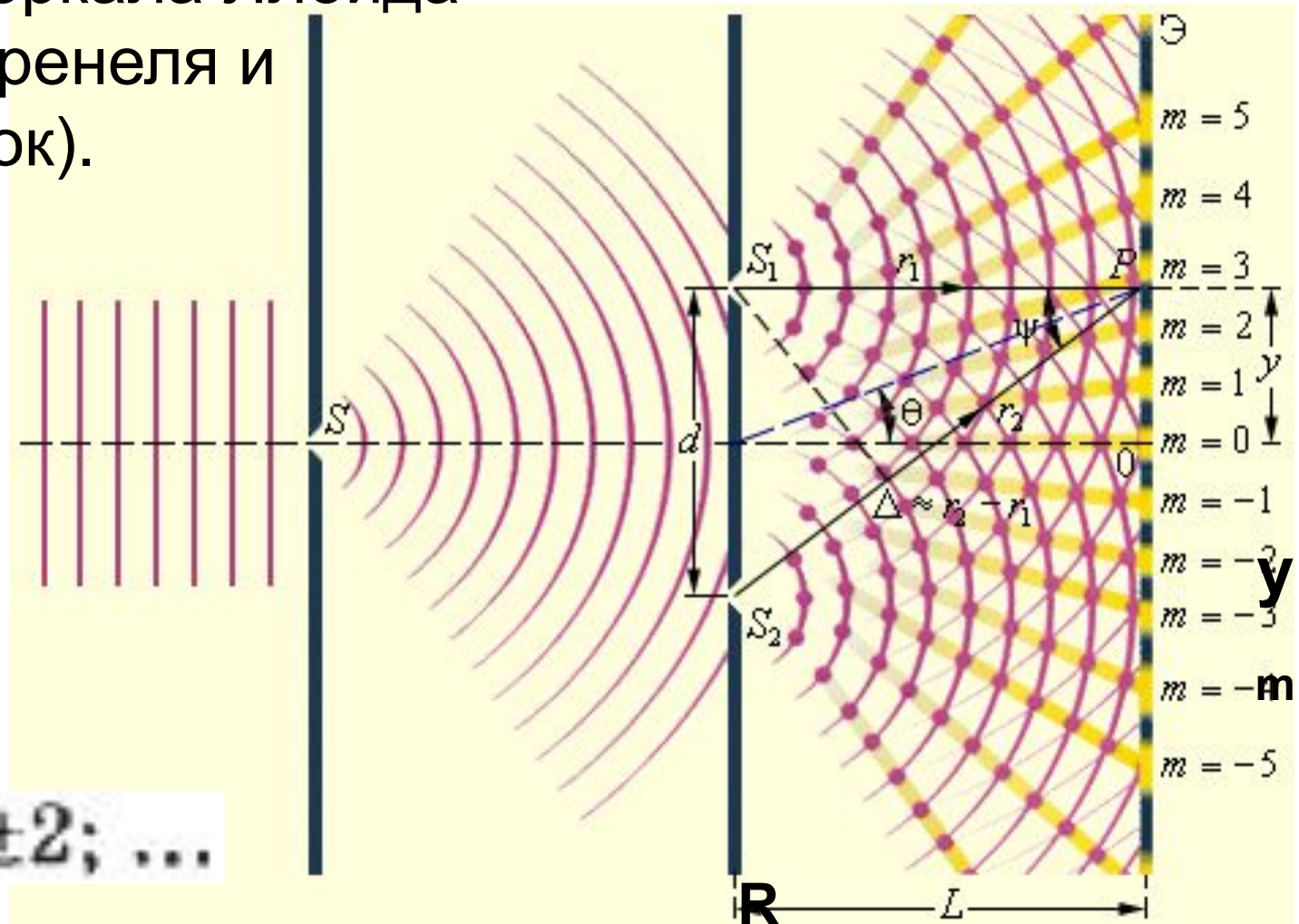
- В пространстве между двумя точками свет распространяется по тому пути, вдоль которого время его прохождения минимально
- *Для оптики можно сформулировать так: из одной точки в другую свет распространяется по линии с наименьшей оптической длиной пути*



Пьер Ферма (1601 – 1665)

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

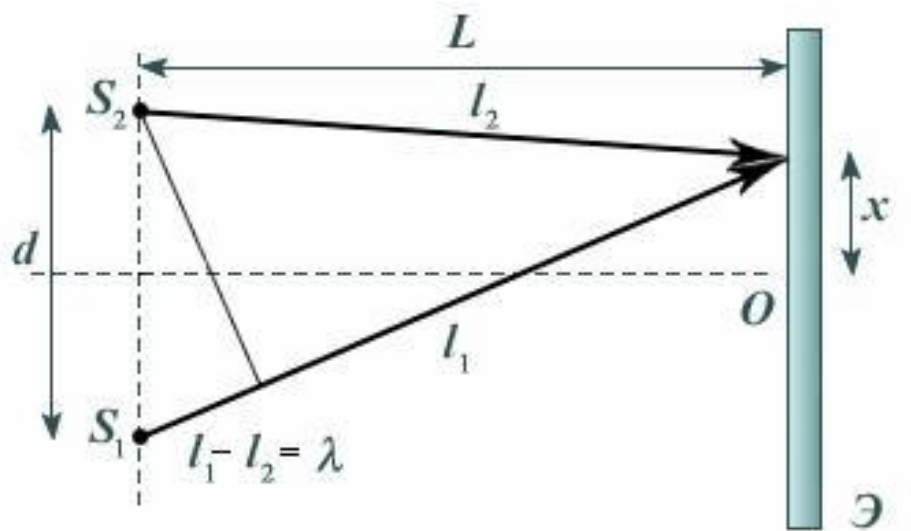
Интерференция света



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

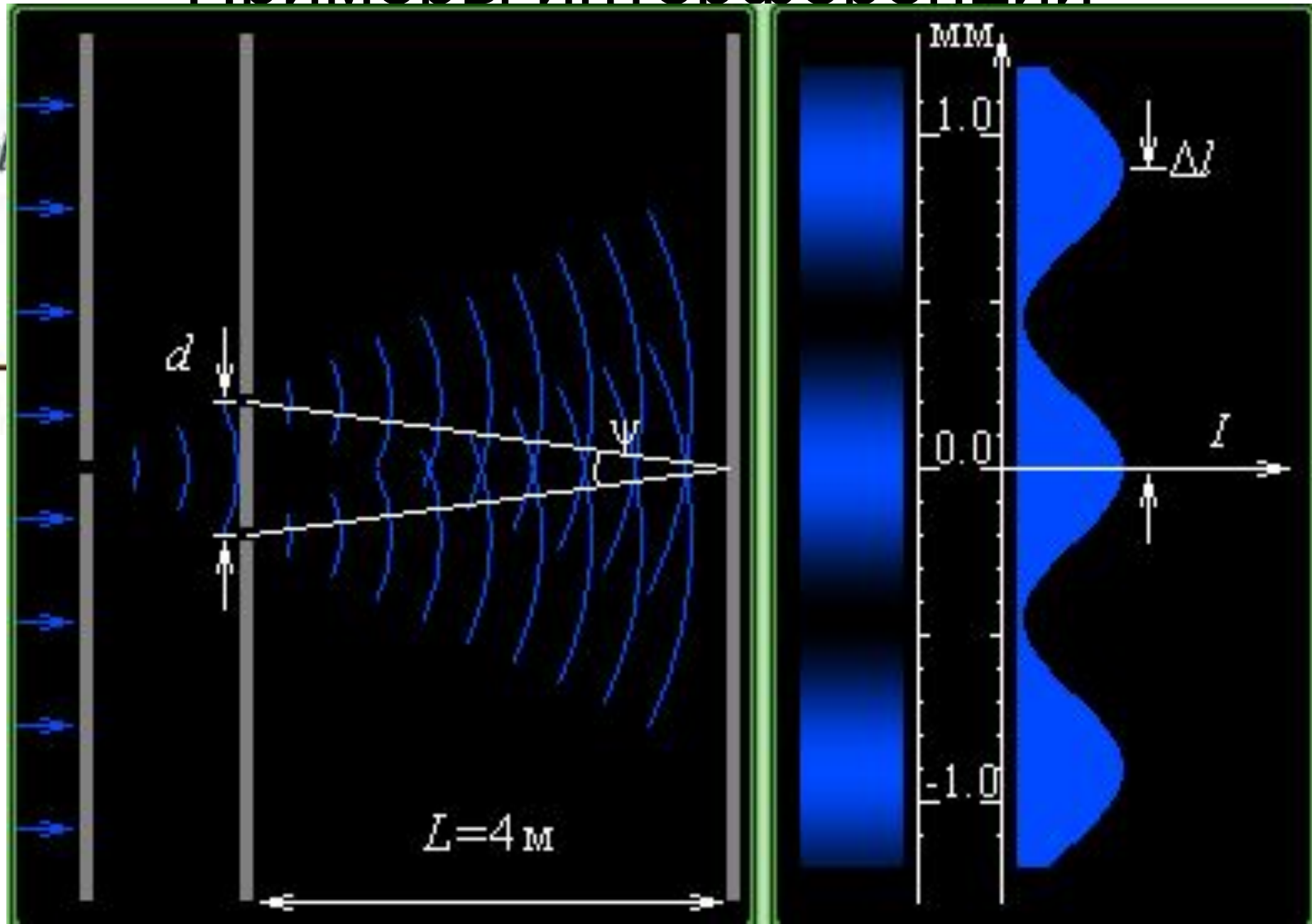


Схема опыта Юнга



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

Примеры интерференции

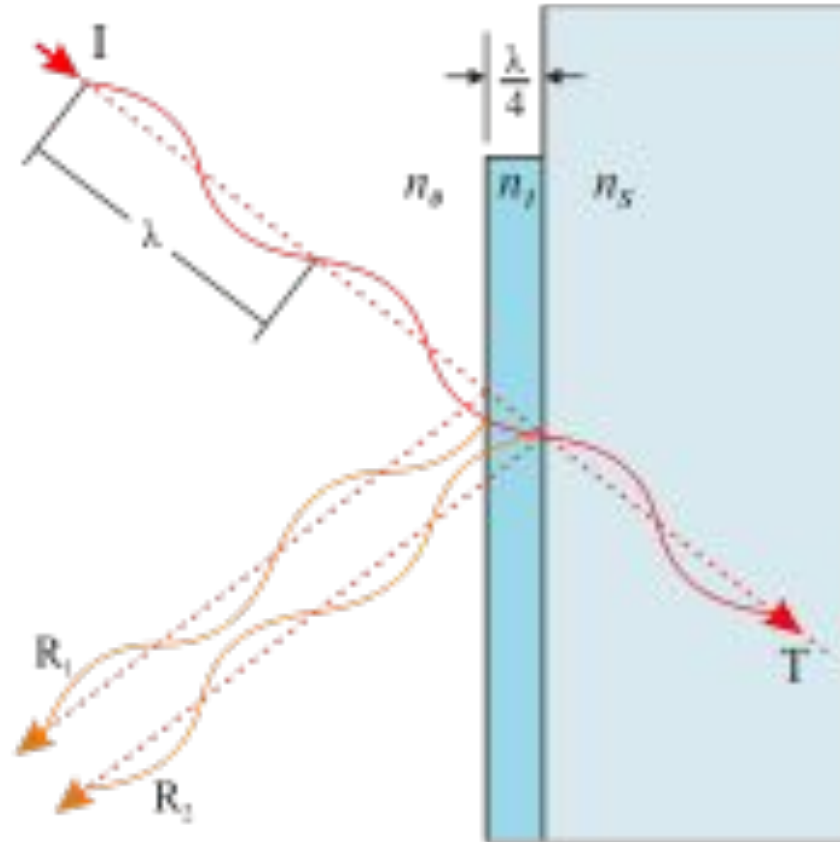


Просветление

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.

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



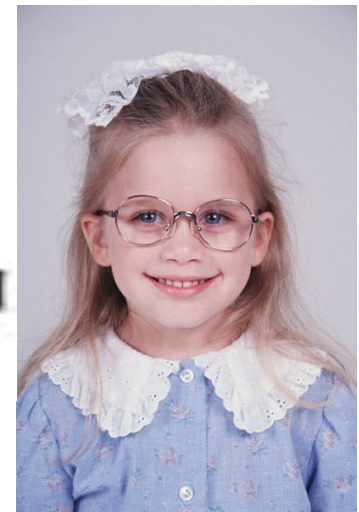
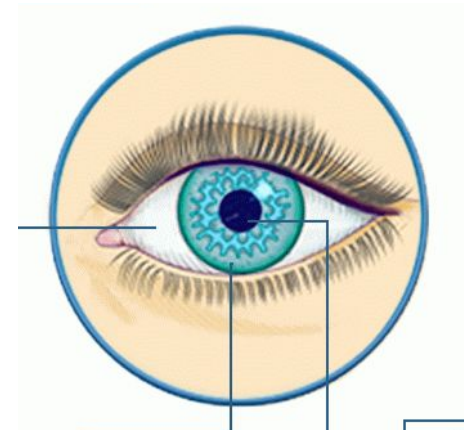
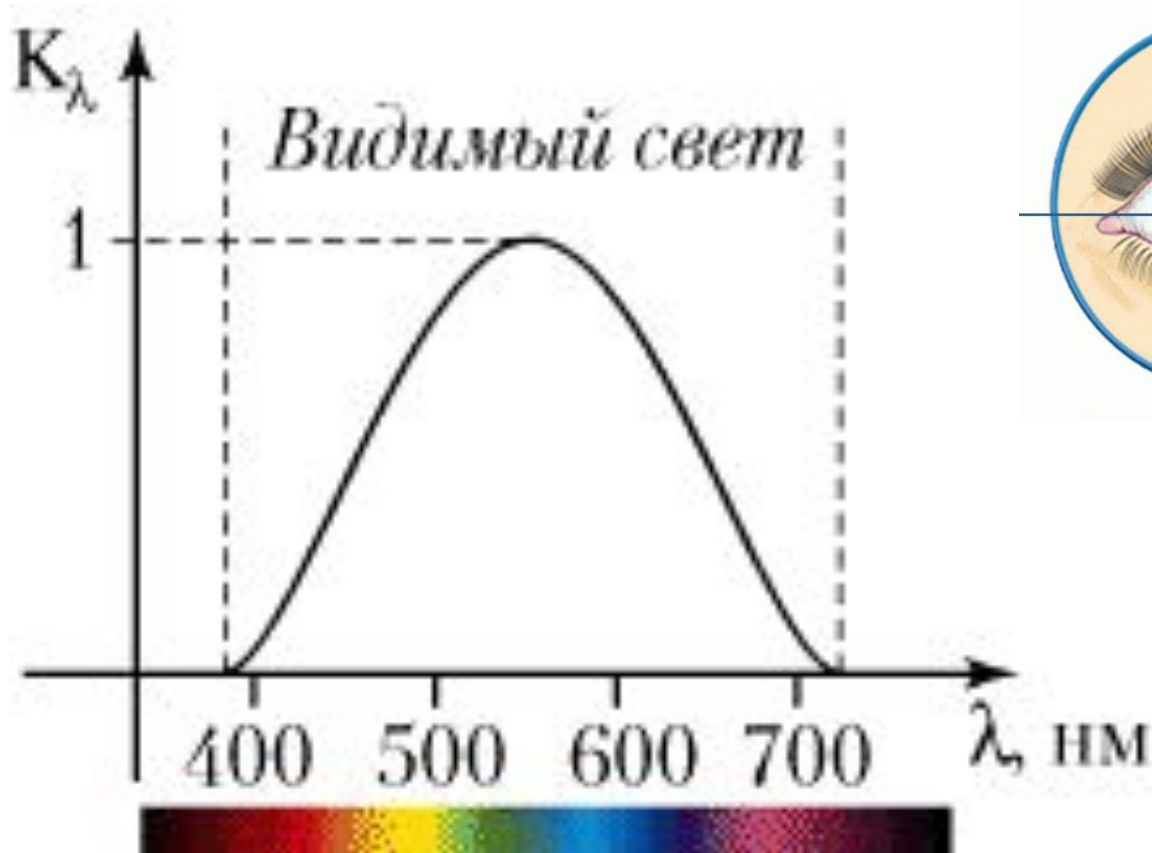
Дисперсия света

- **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)

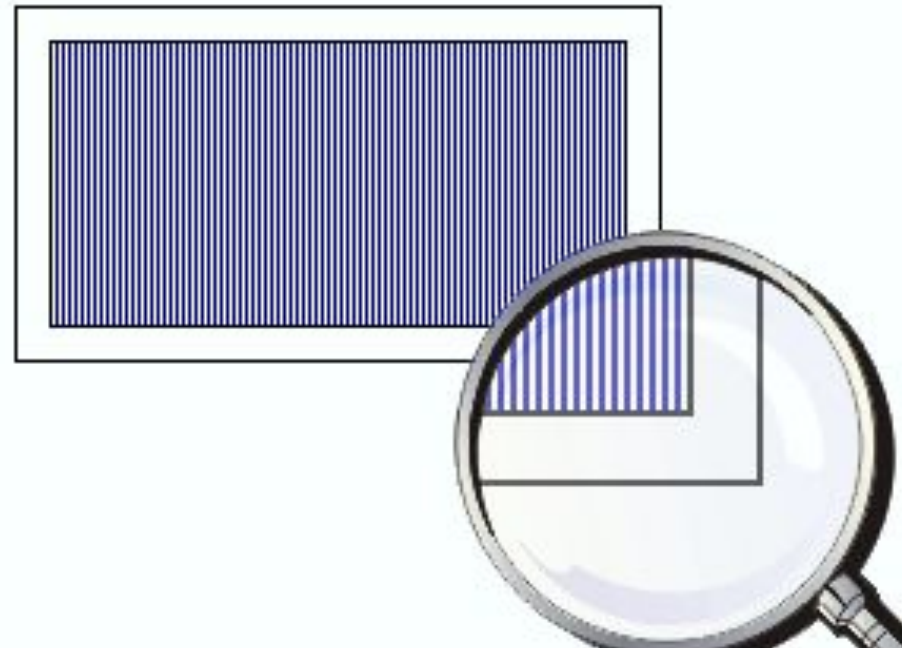
Спектральная чувствительность глаза человека



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**

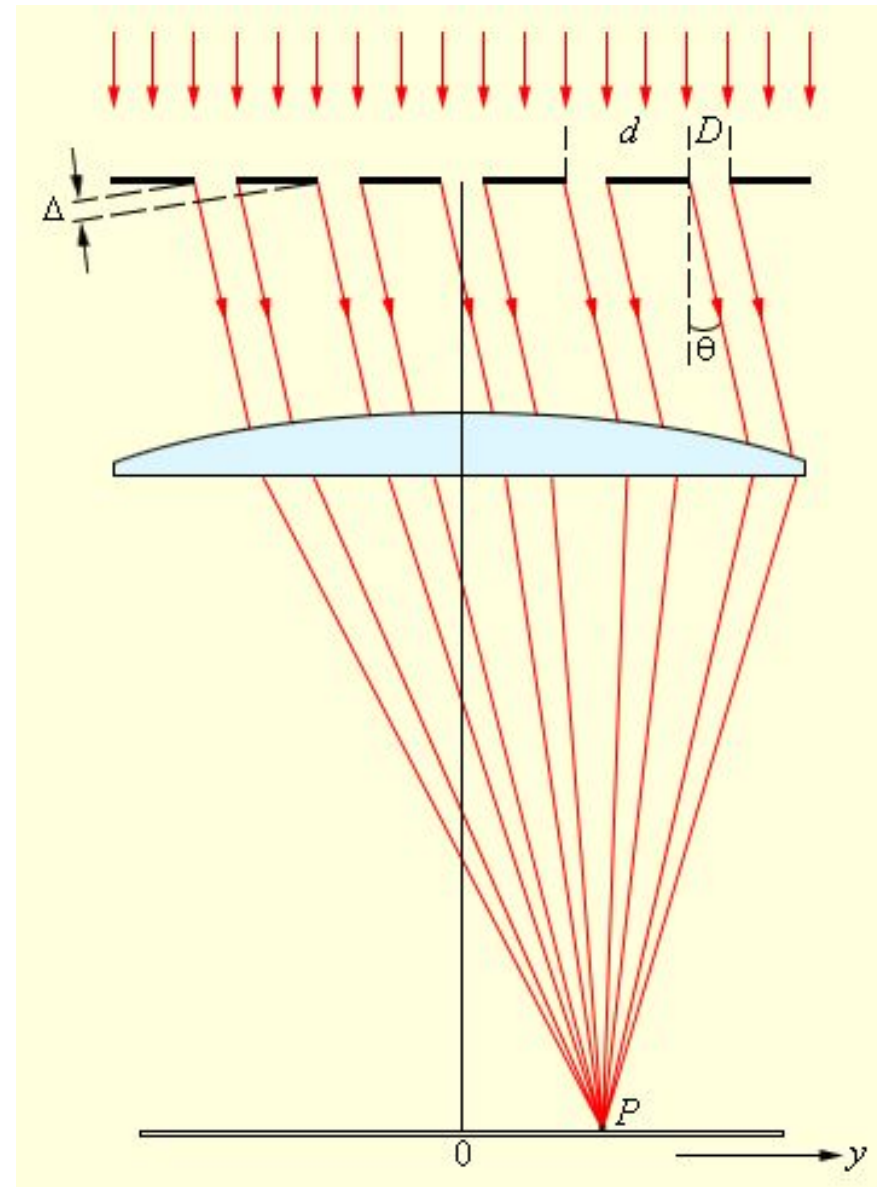
и значительной **ширины дифракционных максимумов** на одной щели. **Увеличение числа щелей** приводит к **увеличению яркости дифракционной картины**



Условие главных максимумов при дифракции света на решетке: главные максимумы наблюдаются под углом α , 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

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

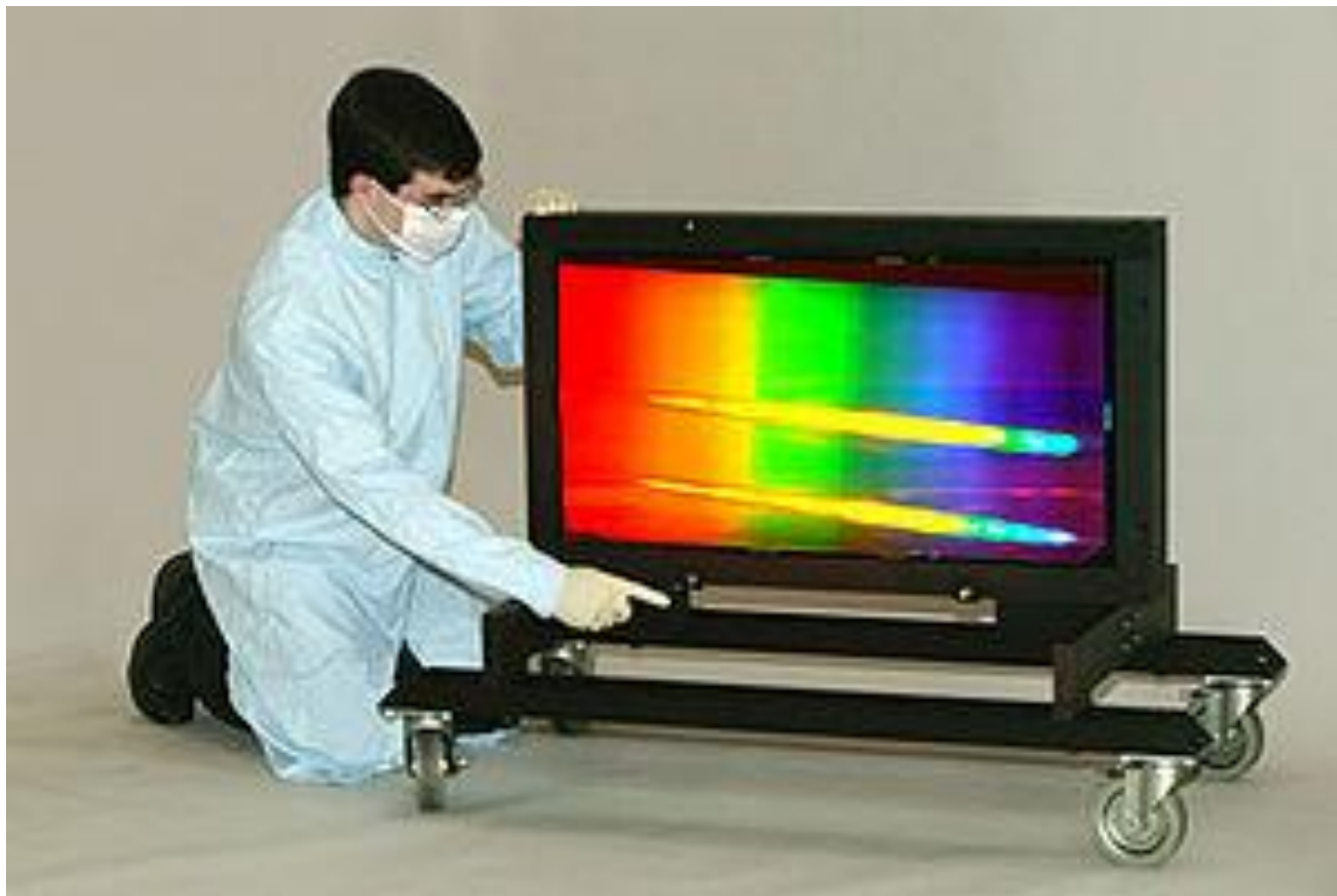
- где I_0 — интенсивность света, излучаемого одной щелью

- **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