



Геометрическая оптика

В оптике условно рассматривается три области:

- **геометрическая оптика, волновая оптика, квантовая оптика.**

- Основные законы геометрической оптики известны ещё с древних времен. Так, Платон (430 г. до н.э.) установил закон прямолинейного распространения света. Евклид формулируется закон прямолинейного распространения света и закон равенства углов падения и отражения. Аристотель и Птолемей изучали преломление света. Но точных формулировок этих *законов геометрической оптики* греческим философам найти не удалось.

- В конце XVII века, на основе многовекового опыта и развития представлений о свете возникли две мощные теории света – **корпускулярная (Ньютон-Декарт) и волновая (Гук-Гюйгенс).**



Геометрическая оптика

- *Геометрическая оптика* является предельным случаем волновой оптики, когда *длина световой волны стремится к нулю*.
- Простейшие оптические явления, например возникновение теней и получение изображений в оптических приборах, могут быть поняты в рамках геометрической оптики. В основу формального построения последней положено четыре закона, установленных опытным путем:
 - закон прямолинейного распространения света;
 - закон независимости световых лучей;
 - закон отражения;
 - закон преломления света.
 - Закон обратного хода лучей (обратимости)



Геометрическая оптика

■ Геометрическая (лучевая) оптика

Раздел физики, в котором распространение света рассматривается на основе представления о световых лучах, как направлениях переноса световой энергии

Основное понятие геометрической оптики

Луч

геометрическая линия, вдоль которой переносится энергия электромагнитными волнами

- ✓ **Световой пучок, исходящий из отверстия бесконечно малого размера**
- ✓ **Направления, вдоль которых переносится световая энергия**
- ✓ **Нормаль к фронту волны**

Область использования

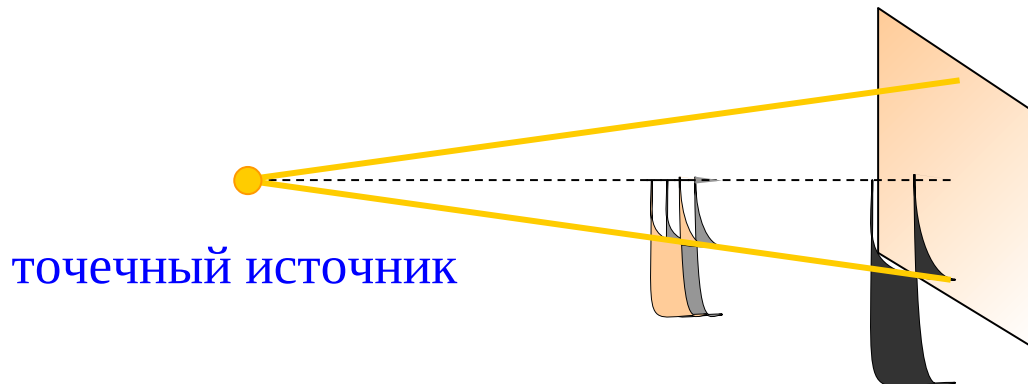
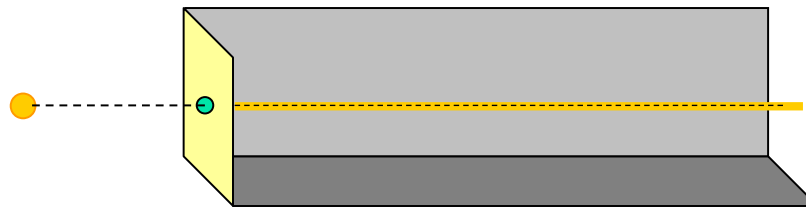
распространение света в однородных средах и предметах, состоящих из однородных сред

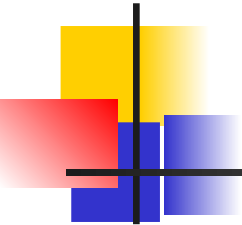
Границы применимости законов геометрической оптики

$\lambda \ll x$, где x - размеры оптических приборов

Закон прямолинейного распространения света

- **Закон прямолинейного распространения света:** в оптически однородной изотропной среде свет распространяется **прямолинейно**.
- при освещении непрозрачных тел источниками малых размеров («точечный источник») они отбрасывают тени с резко очерченными границами.

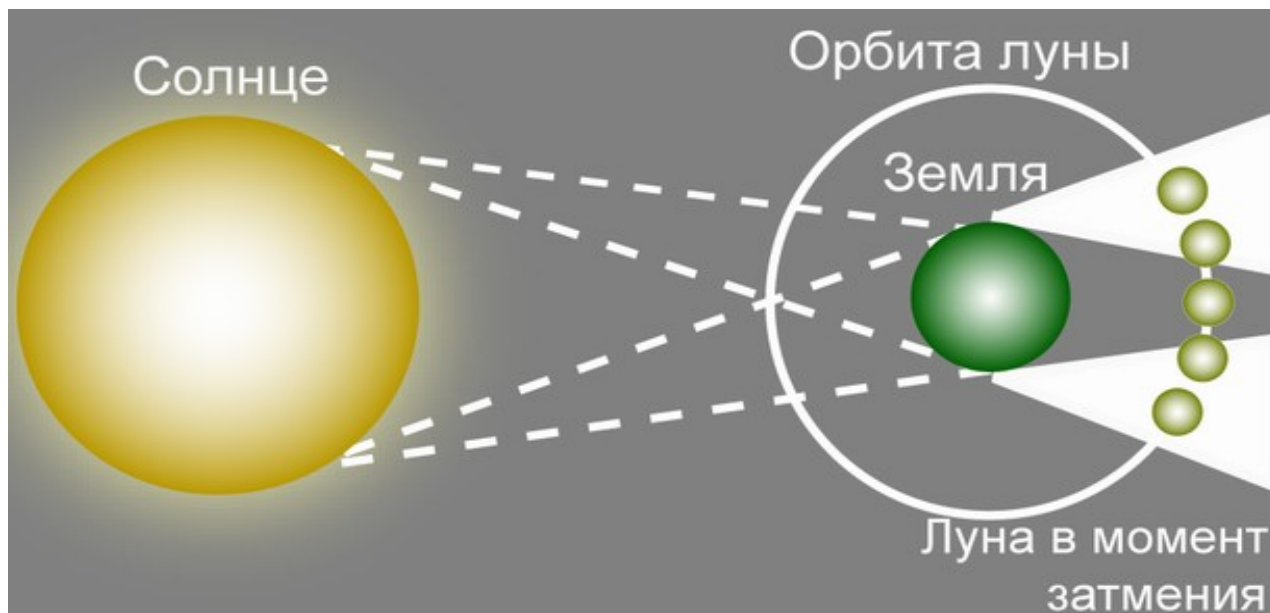




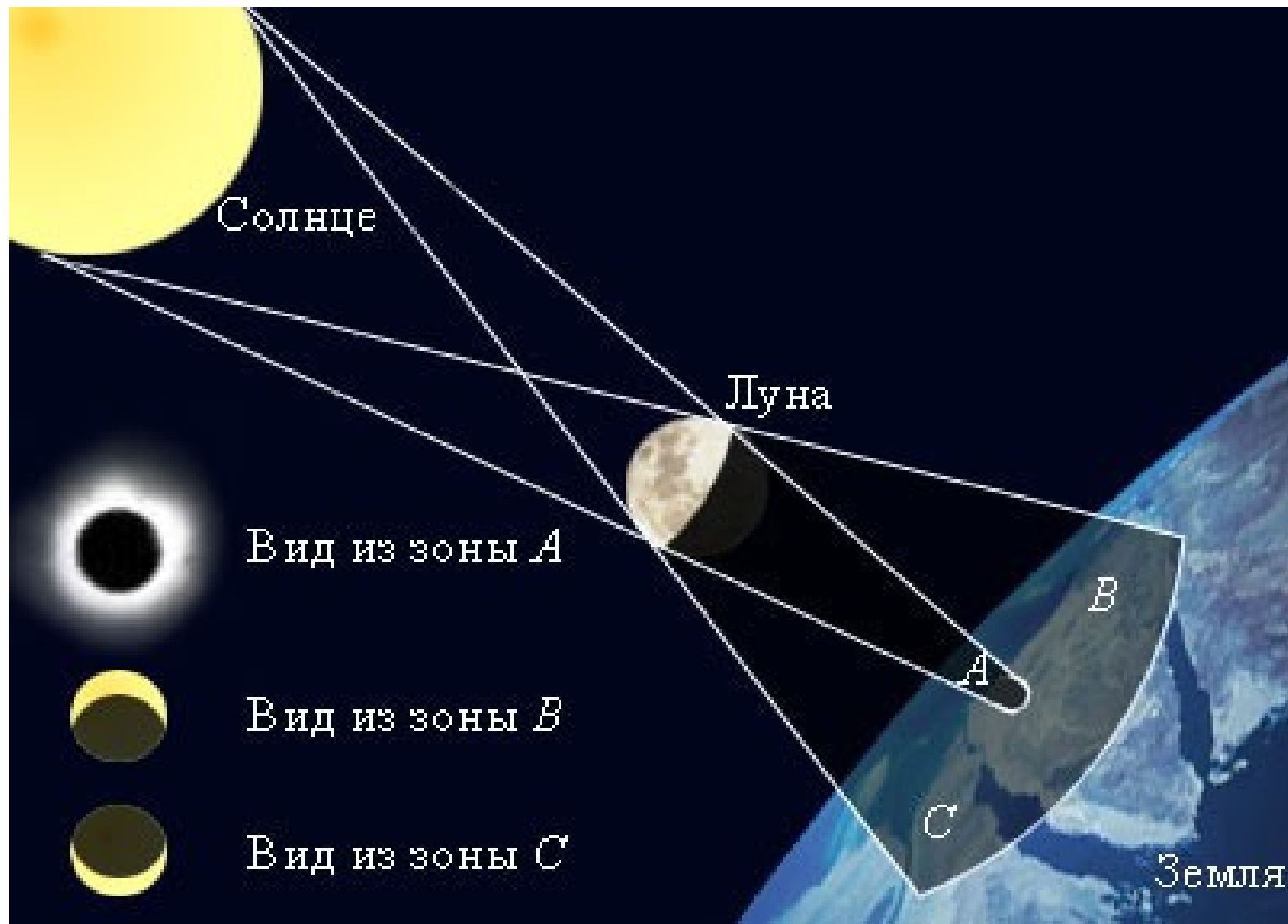
Закон прямолинейного распространения света

- *Линия, вдоль которой распространится световая энергия, называется световым лучем*
- Доказательством этого закона является наличие тени с резкими границами от непрозрачных предметов при освещении их источниками малых размеров.
- Тень, отбрасываемая предметом, обусловлена **прямолинейностью распространения световых лучей** в оптически однородных средах
- Если размеры препятствия много больше длины волны, то волны за него не проникают, создается область тени
- Астрономической иллюстрацией **прямолинейного распространения света** и, в частности, образования тени и полутени может служить затенение одних планет другими, например **затмение Луны**, когда Луна попадает в тень Земли.

Закон прямолинейного распространения света

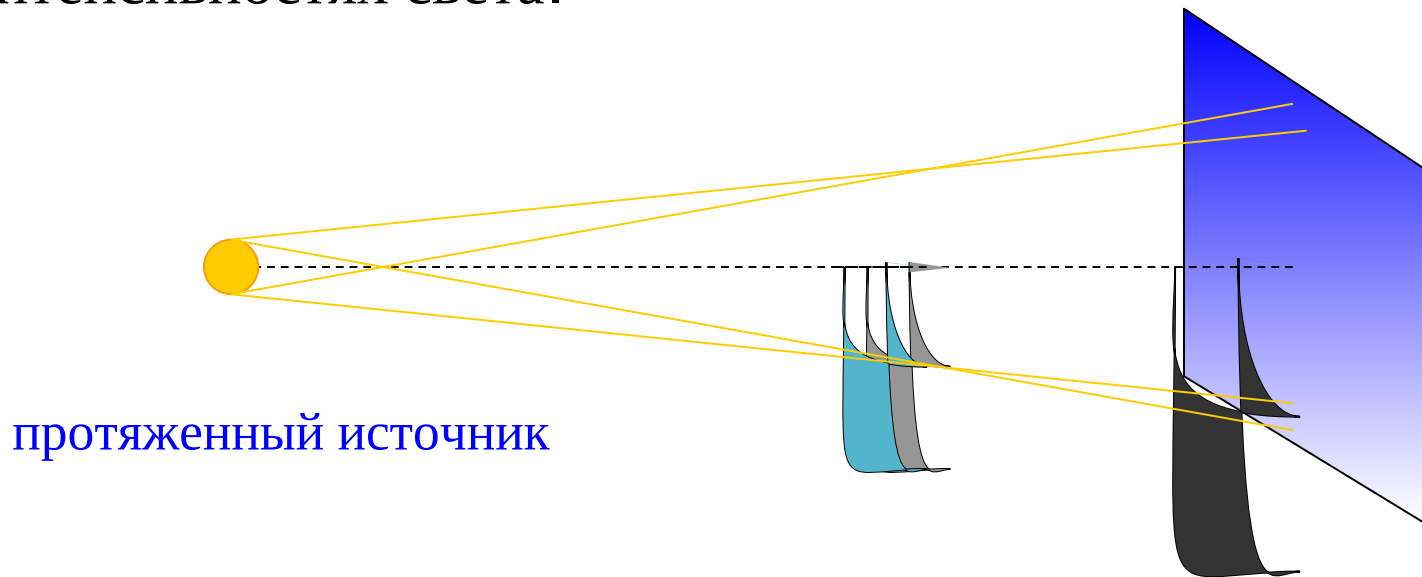


Закон прямолинейного распространения света



Закон независимости световых лучей

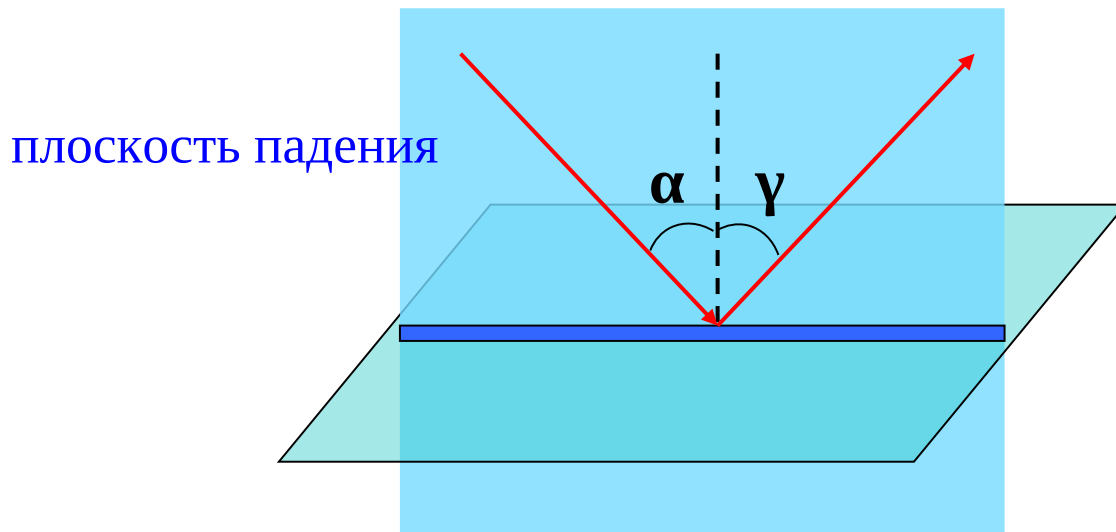
- **Закон независимости световых лучей** заключается в том, что при пересечении они не возмущают друг друга.
- Пересечение лучей не мешают каждому из них распространяться независимо друг от друга.
- Стоит отметить, что это соблюдается только при небольших интенсивностях света.



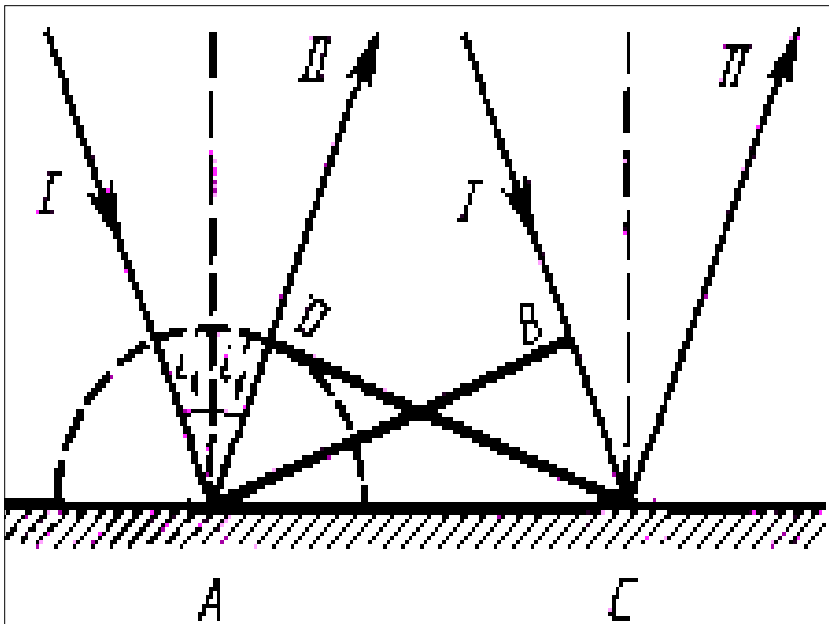
Закон отражения света

- **Закон отражения света:** отраженный луч лежит в одной плоскости (плоскость падения) с падающим лучом и нормалью, восстановленной в точке падения луча. Угол отражения γ равен углу падения α

$$\alpha = \gamma$$



Закон отражения света



Когда фронт волны (А В) достигнет отражающей поверхности в точке А, эта точка **начнет излучать вторичную волну**.

Для прохождения волной расстояния ВС требуется время $\Delta t = BC/v$. За это же время фронт вторичной волны достигнет точек полусферы, радиус AD которой равен $v\Delta t = BC$. Положение фронта

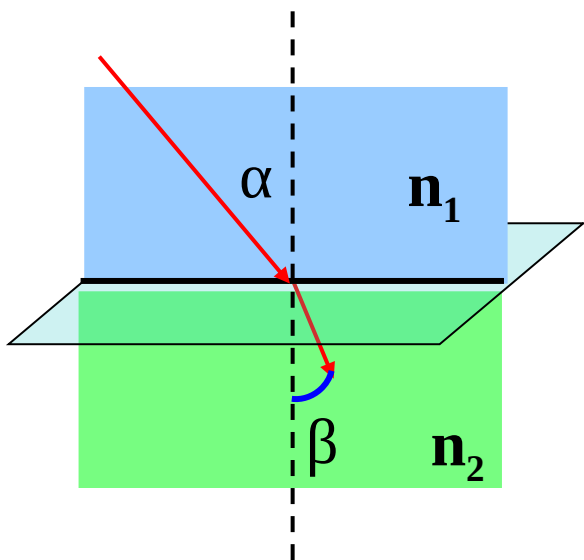
отраженной волны в этот момент времени в соответствии с принципом Гюйгенса задается плоскостью DC , а направление распространения этой волны — лучом II . Из равенства треугольников ABC и ADC вытекает **закон отражения**: **угол отражения i'_1 равен углу падения i_1** .

Закон преломления света

Закон преломления света: преломленный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью, восстановленной в точке падения. Отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β есть величина постоянная для данных веществ:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{12}$$

относительный показатель преломления
второго вещества по отношению к первому



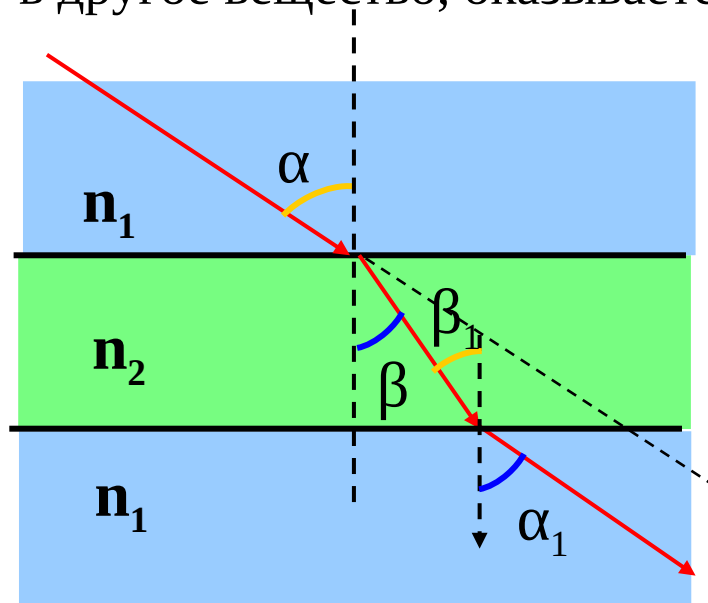
- Показатель преломления вещества по отношению к вакууму называется **абсолютным показателем преломления** данного вещества.
- Вещество с большим показателем преломления называют оптически более плотным.
- Относительный показатель преломления двух веществ равен отношению их абсолютных показателей преломления

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1}$$



Закон обратимости световых лучей

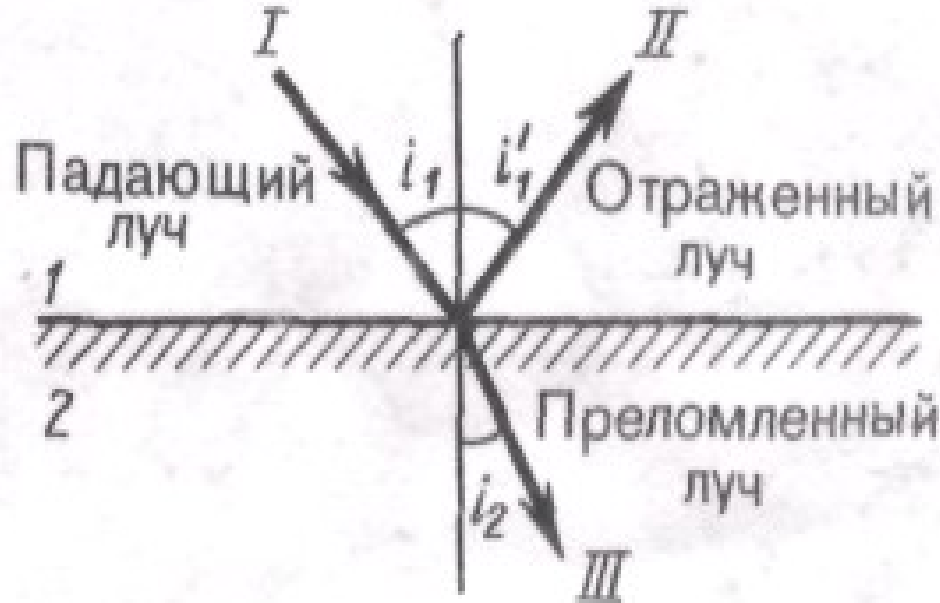
- Луч, прошедший через плоскопараллельную пластину погруженную в другое вещество, оказывается параллельным падающему лучу.



$$\left. \begin{aligned} \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} &= n_{12} \\ \frac{\sin \beta_1}{\sin \alpha_1} &= n_{21} \\ \beta &= \beta_1 \\ \alpha &= \alpha_1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow n_{12} = \frac{1}{n_{21}}$$

- **Закон обратимости** (или взаимности) световых лучей: если навстречу лучу, претерпевшему ряд отражений и преломлений, пустить другой луч, то он пойдет по тому же пути, что и первый (прямой) луч, но в обратном направлении

Закон обратимости световых лучей

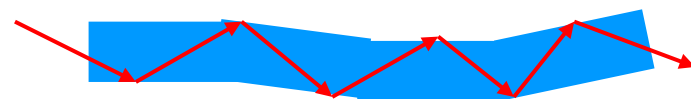
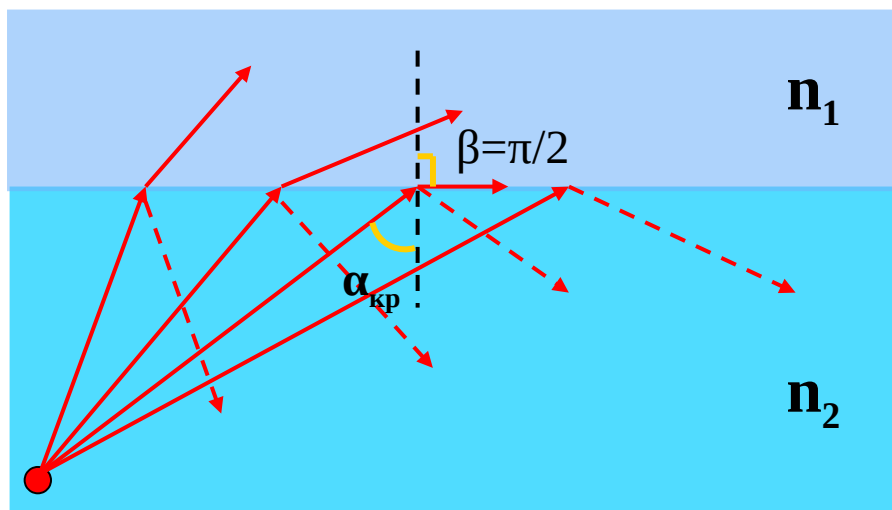


если обратить луч III , заставив его падать на границу раздела под углом i_2 , то преломленный луч в первой среде будет распространяться под углом i_1 , т. е. пойдет в обратном направлении вдоль луча I .

Явление полного отражения

■ $n_{12} = n_1 / n_2 \rightarrow$ закон преломления можно записать в следующем виде:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

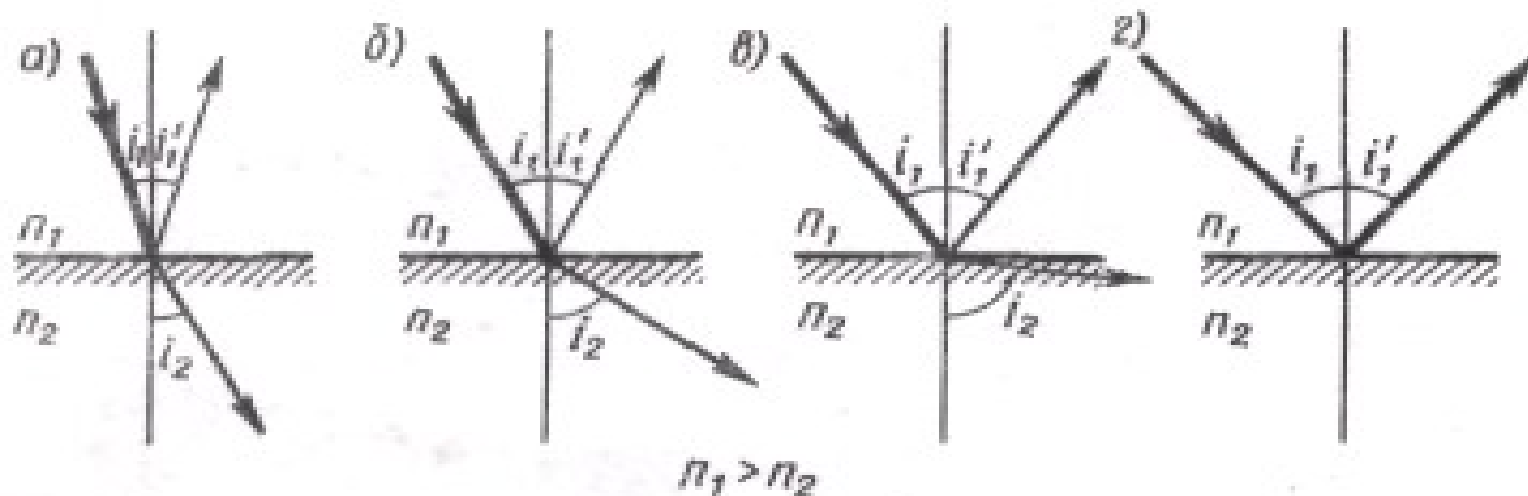


ход лучей в световоде

- При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную $n_2 < n_1$ и при превышении некоторого критического угла можно будет наблюдать явление полного отражения, то есть исчезновение преломленного луча.

$$\alpha_{кр} = \arcsin n_{12} \quad - \text{ предельный угол}$$

Явление полного отражения



• С увеличением угла падения увеличивается угол преломления (рис. б, в), до тех пор пока при некотором угле падения ($i_1 = i_{\text{пр}}$) **угол преломления не окажется равным $\pi/2$.**

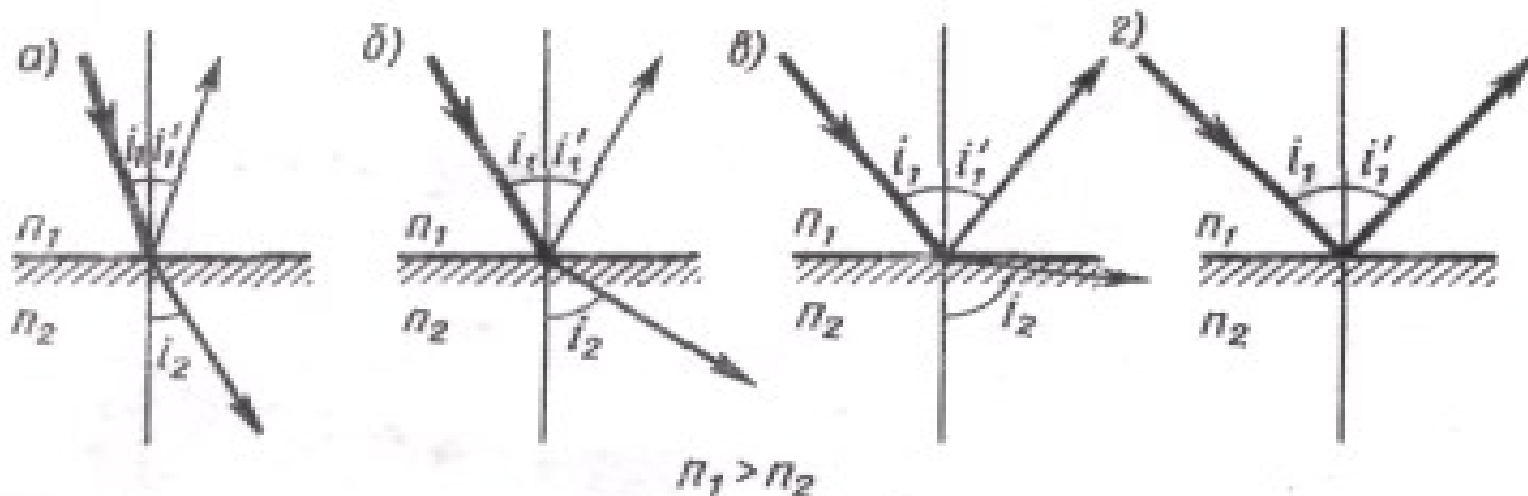
• Угол $i_{\text{пр}}$ называется **предельным углом**.

• Если $i_1 = i_{\text{пр}}$, то интенсивность преломленного луча обращается в нуль, а интенсивность отраженного равна интенсивности падающего (рис. г).

При углах падения $i > i_{\text{пр}}$ **весь падающий свет полностью**

отражается (рис. а)

Явление полного отражения

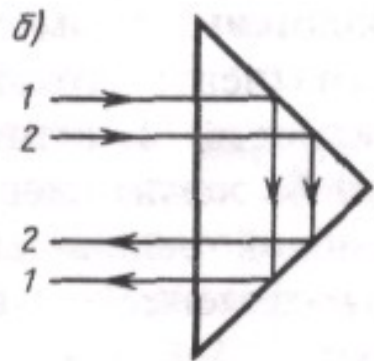
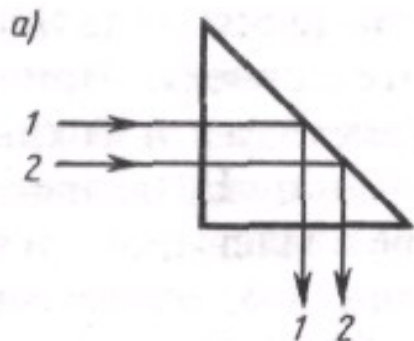


Таким образом, при углах падения в пределах от i_{np} до $\pi/2$ луч не преломляется, а полностью отражается в первую среду, причем интенсивности отраженного и падающего лучей одинаковы.

По мере приближения угла падения к предельному интенсивность преломленного луча уменьшается, а отраженного - растет.

Это явление называется полным отражением.

Явление полного отражения



Явление полного отражения используется в призмах полного отражения.

Показатель преломления стекла равен $n \approx 1,5$, поэтому предельный угол для границы стекло – воздух

$$i_{np} = \arcsin (1/1,5) = 42^\circ.$$

При падении света на границу стекло — воздух при $i > 42^\circ$ всегда будет иметь место полное отражение.

На рис. а — в показаны призмы полного отражения, позволяющие:

- а) повернуть луч на 90° ;
- б) повернуть изображение:
- в) обернуть лучи.



Явление полного отражения

Такие призмы применяются в оптических приборах (например, в биноклях, перископах), а также в рефрактометрах, позволяющих определять показатели преломления тел (по закону преломления, измеряя $i_{\text{пр}}$, определяем относительный показатель преломления двух сред, а также абсолютный показатель преломления одной из сред, если показатель преломления второй среды известен.

Явление полного отражения используется также в **световодах** представляющих собой тонкий, произвольным образом изогнутые нити (волокна) из оптически прозрачного материала.

В волоконных деталях применяют стеклянное волокно, световедущая жила (сердцевина) которого окружается стеклом — оболочкой из другого стекла с меньшим показателем преломления.

Свет, падающий на торец световода **под углами, большими предельного**, претерпевает на поверхности раздела сердцевины и оболочки **полное отражение** и распространяется только по

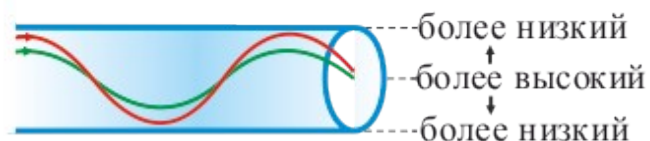
Явление полного отражения

В **волоконно - оптических** деталях световые сигналы передаются по светопроводам с одной поверхности (торца светопровода) на другую (выходную), как совокупность элементов изображения, каждый из которых передается по своей светопроводящей жиле.

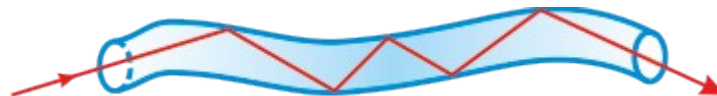
В волоконных деталях обычно применяют стеклянное волокно, световедущая жила которого (сердцевина) имеет высокий показатель преломления и окружена стеклом (оболочкой) с более низким показателем преломления. Вследствие этого на поверхности раздела сердцевины и оболочки лучи претерпевают полное внутреннее отражение и распространяются только по световедущей жиле. Коэффициент пропускания светопроводов в видимой области спектра составляет 30...70 % при длине 1 м.



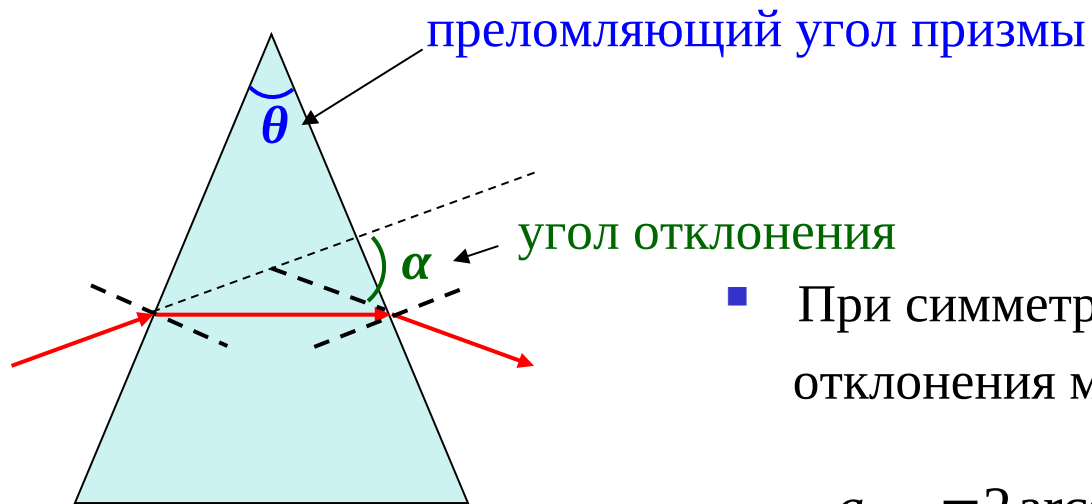
многомодовое волокно со ступенчатым профилем



многомодовое градиентное волокно



Прохождение света через призму



- При симметричном ходе лучей угол отклонения минимален и равен

$$\alpha_{\min} = 2 \arcsin(n \sin \theta / 2) - \theta$$

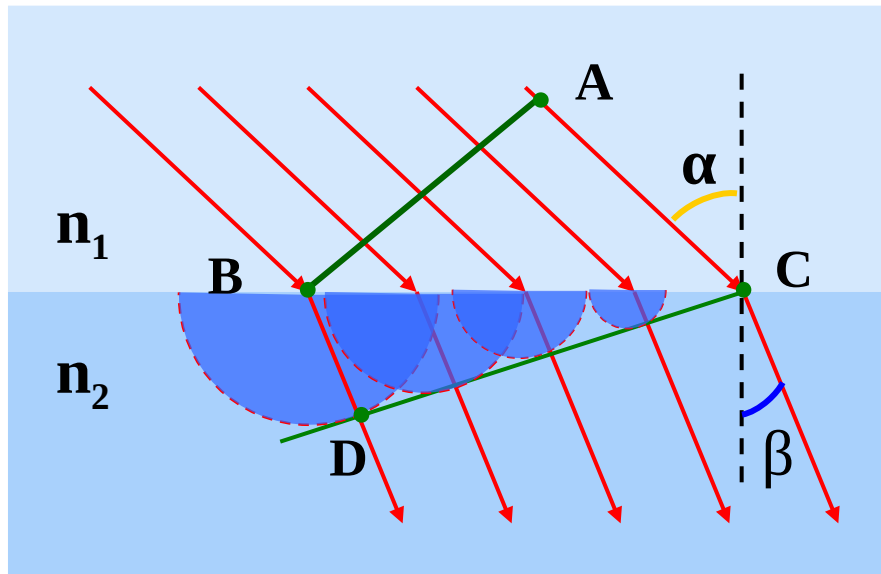
$$n = \frac{\sin(\theta + \alpha_{\min}) / 2}{\sin \theta / 2}$$

показатель преломления призмы

Если θ мал, то независимо от хода лучей, угол отклонения $\alpha = (n - 1)\theta$

Принцип Гюйгенса

Каждая точка, до которой доходит волна, становится центром вторичных волн, а огибающая этих волн дает положение волнового фронта в следующий момент времени.



AB – фронт падающей волны

CD – фронт преломленной волны

$$\left. \begin{aligned} AC &= v_1 \times t \\ BD &= v_2 \times t \\ \sin \alpha &= AC / BC \\ \sin \beta &= BD / BC \end{aligned} \right\} \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

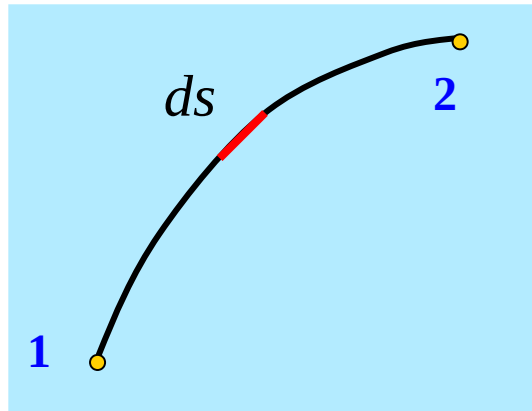
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{12} \Rightarrow n_{12} = \frac{v_2}{v_1}$$

- Если первое вещество вакуум, то абсолютный показатель преломления равен отношению скорости света в вакууме к скорости света в среде:

$$n = c / v$$

Принцип Ферма

- Свет распространяется по такому пути, для прохождения которого ему требуется минимальное время



$$dt = ds / v \quad \leftarrow \text{скорость света в данной точке среды}$$

$$v = c / n$$

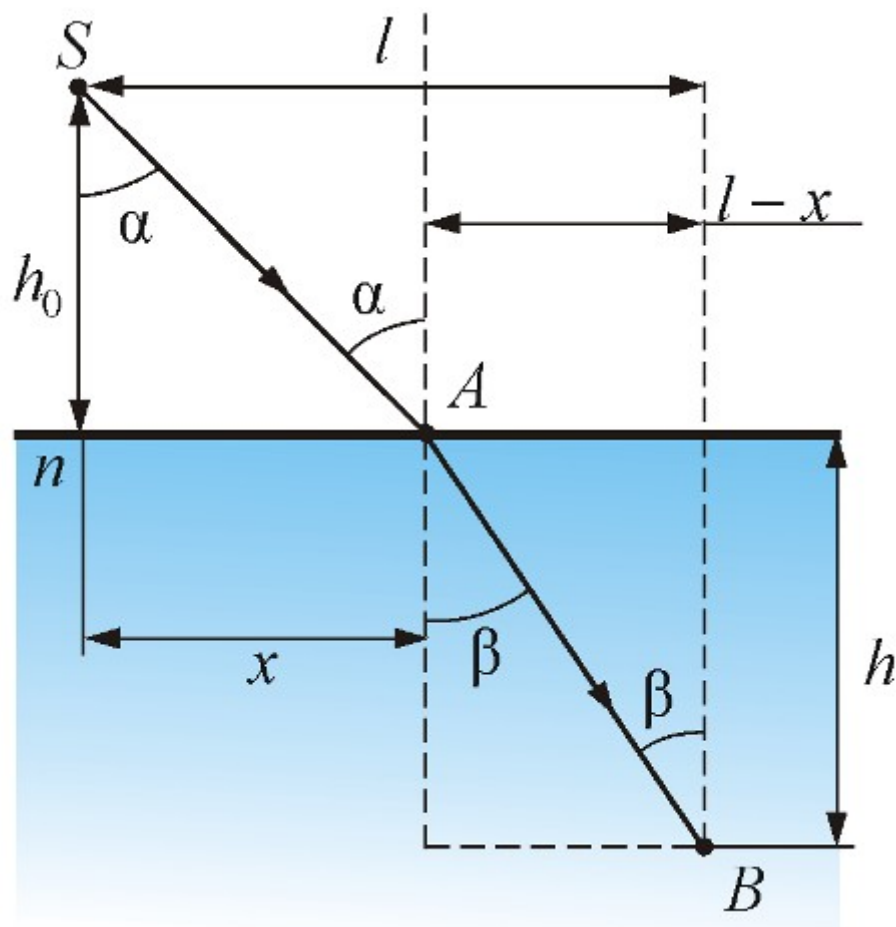
$$dt = nds / c \quad \rightarrow \quad \tau = \frac{1}{c} \int_1^2 nds = \frac{L}{c}$$

$$L = \int_1^2 nds \quad - \text{оптическая длина пути}$$

Из принципа Ферма вытекают законы **отражения** и **преломления** света

Принцип Ферма

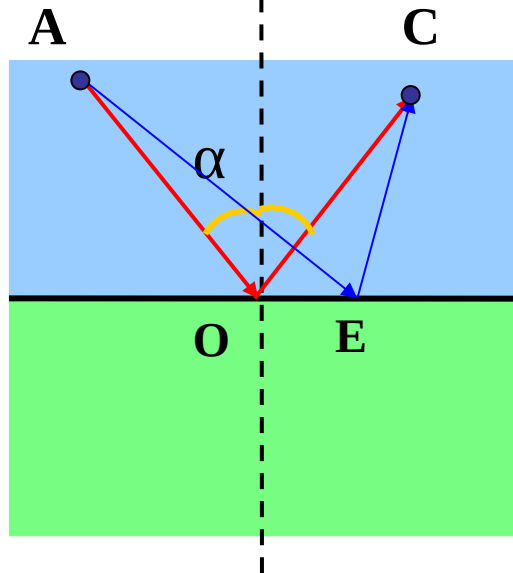
- Свет распространяется по такому пути, для прохождения которого ему требуется минимальное время



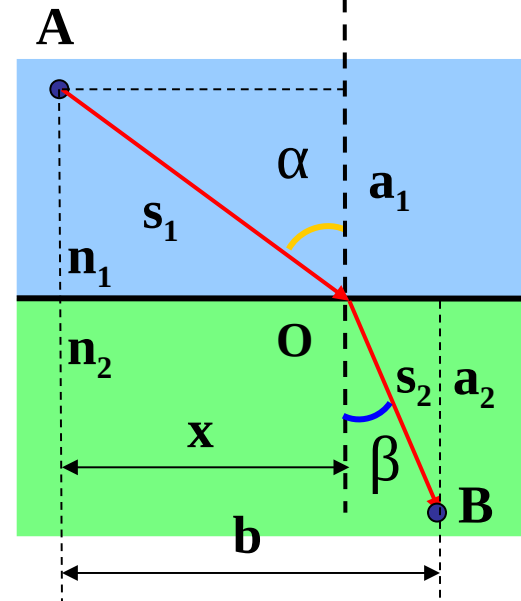
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{v} = n$$

Принцип Ферма

закон отражения



закон преломления



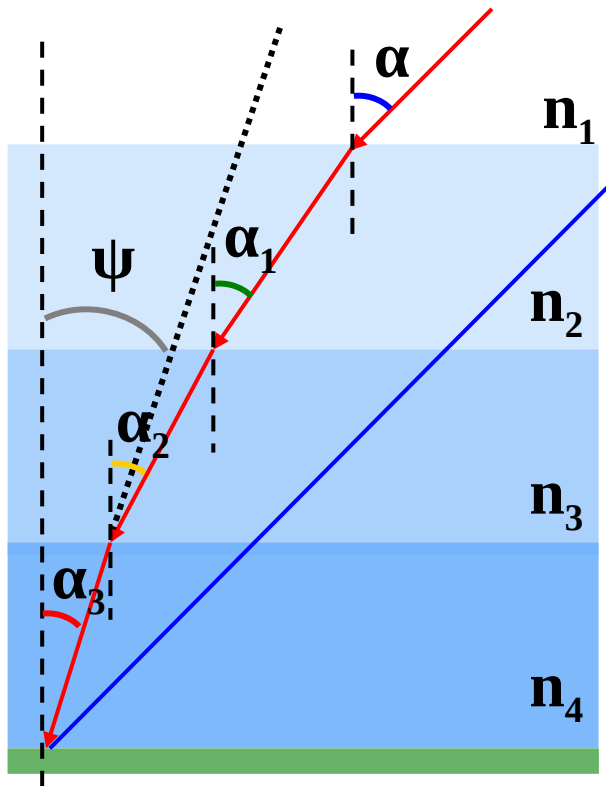
$$L = n_1 s_1 + n_2 s_2 = n_1 \sqrt{a_1^2 + x^2} + n_2 \sqrt{a_2^2 + (b - x)^2}$$

$$\frac{dL}{dx} = n_1 \frac{x}{s_1} - n_2 \frac{b - x}{s_2} = 0$$

$$\sin \alpha = \frac{x}{s_1} \quad \sin \beta = \frac{b - x}{s_2}$$

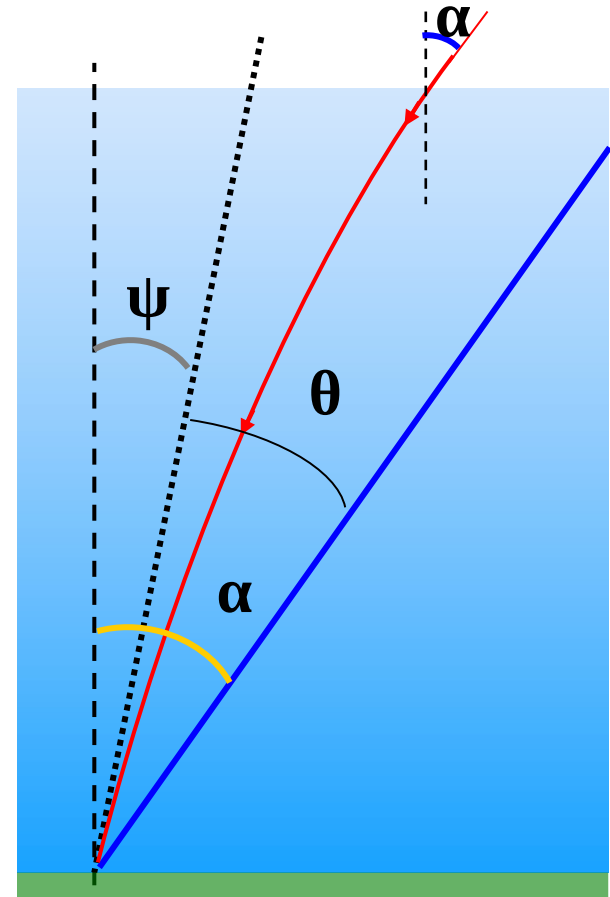
$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

Рефракция света



α - истинное направление
(зенитное расстояние)

ψ - кажущееся направление



$\theta = \alpha - \psi$ - угол рефракции

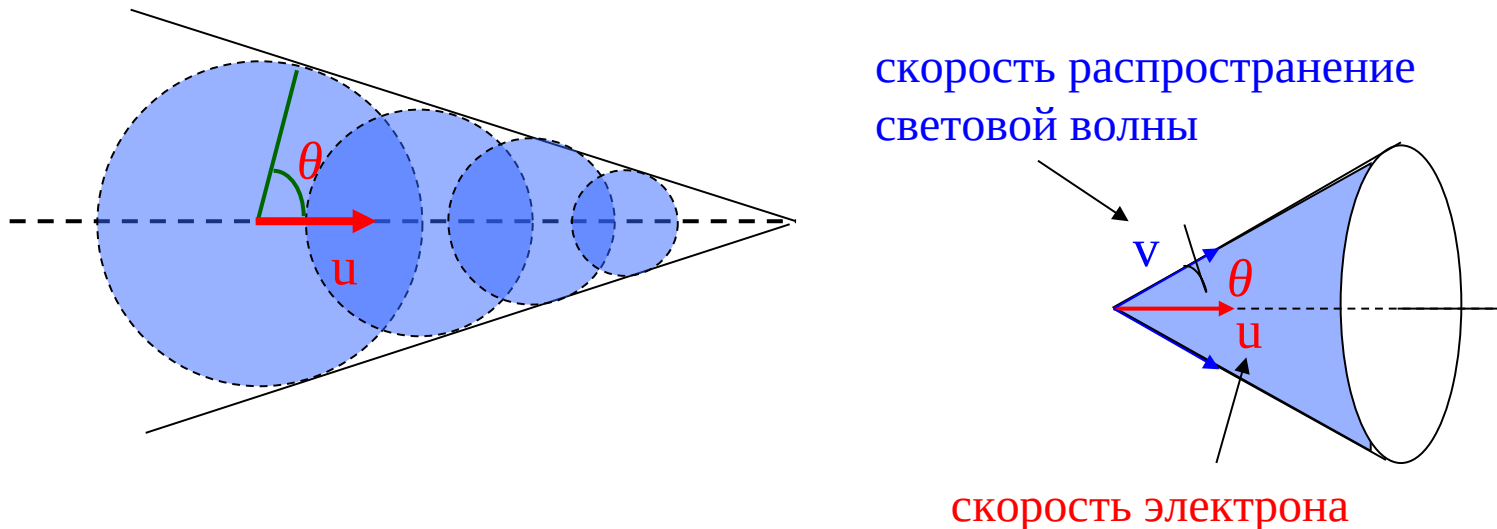
Рефракция света

Рефракция в атмосфере может приводить к своеобразным обманам зрения, таких как, сплюснутая форма дисков Солнца и Луны у горизонта, огромное солнце на закате, миражи.



Излучение Вавилова-Черенкова

- эффект Вавилова-Черенкова, заключается в том, что электрон, движущийся в некоторой среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде, порождает специфическое излучение

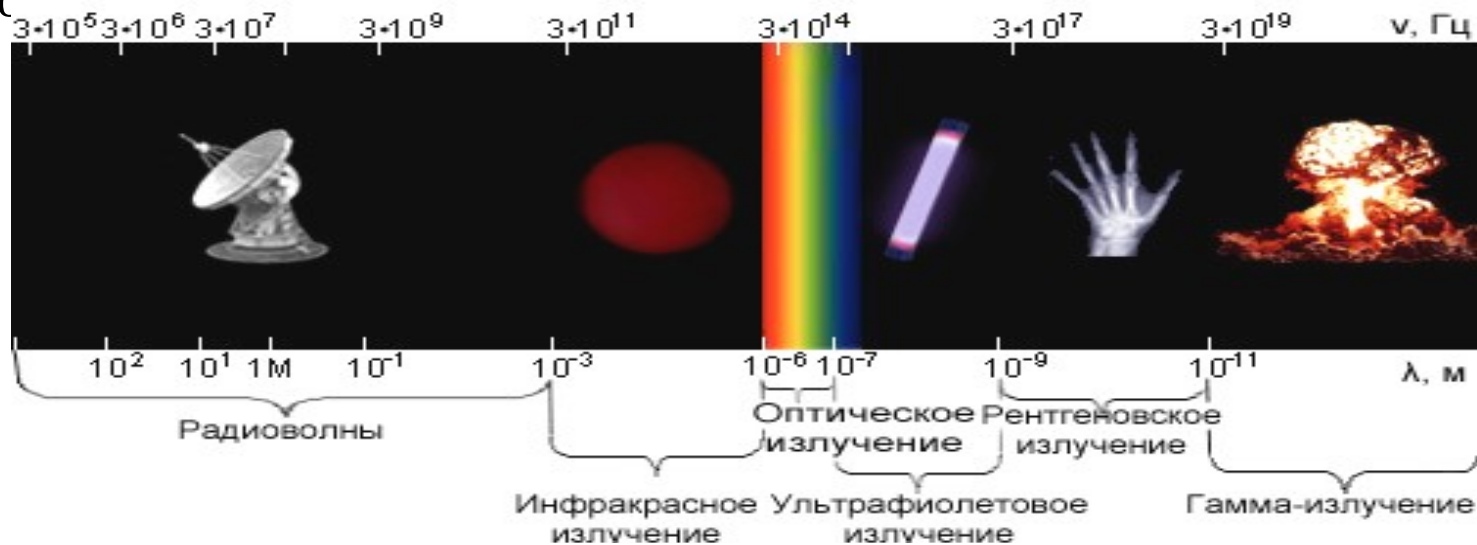


$$\cos \theta = \frac{u}{v} = \frac{c}{n v}$$

Геометрическая оптика

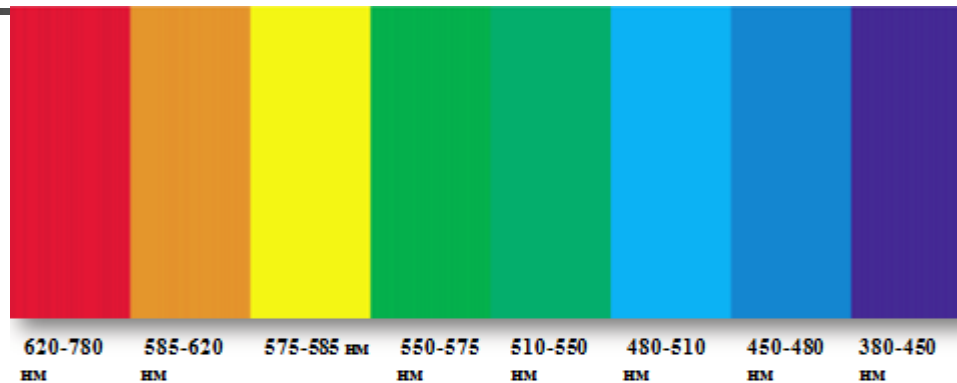
Оптика – (от греч. *optike* – наука о зрительных восприятиях) – **раздел физики, в котором изучаются оптическое излучение (свет), его распространение и явления, наблюдаемые при взаимодействии света и вещества.**

Оптическое излучение представляет собой электромагнитные волны, и ПОЭТОМУ ОПТИКА – часть общего учения об электромагнитном поле



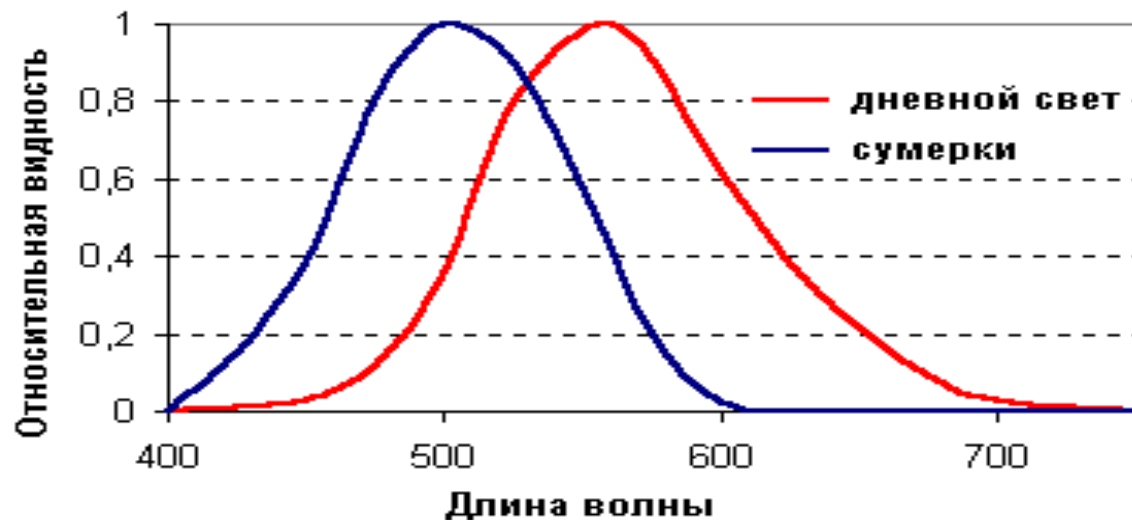
Такое ограничение условно и в значительной степени определяется общностью технических средств и методов исследования явления в указанном диапазоне.

Геометрическая оптика



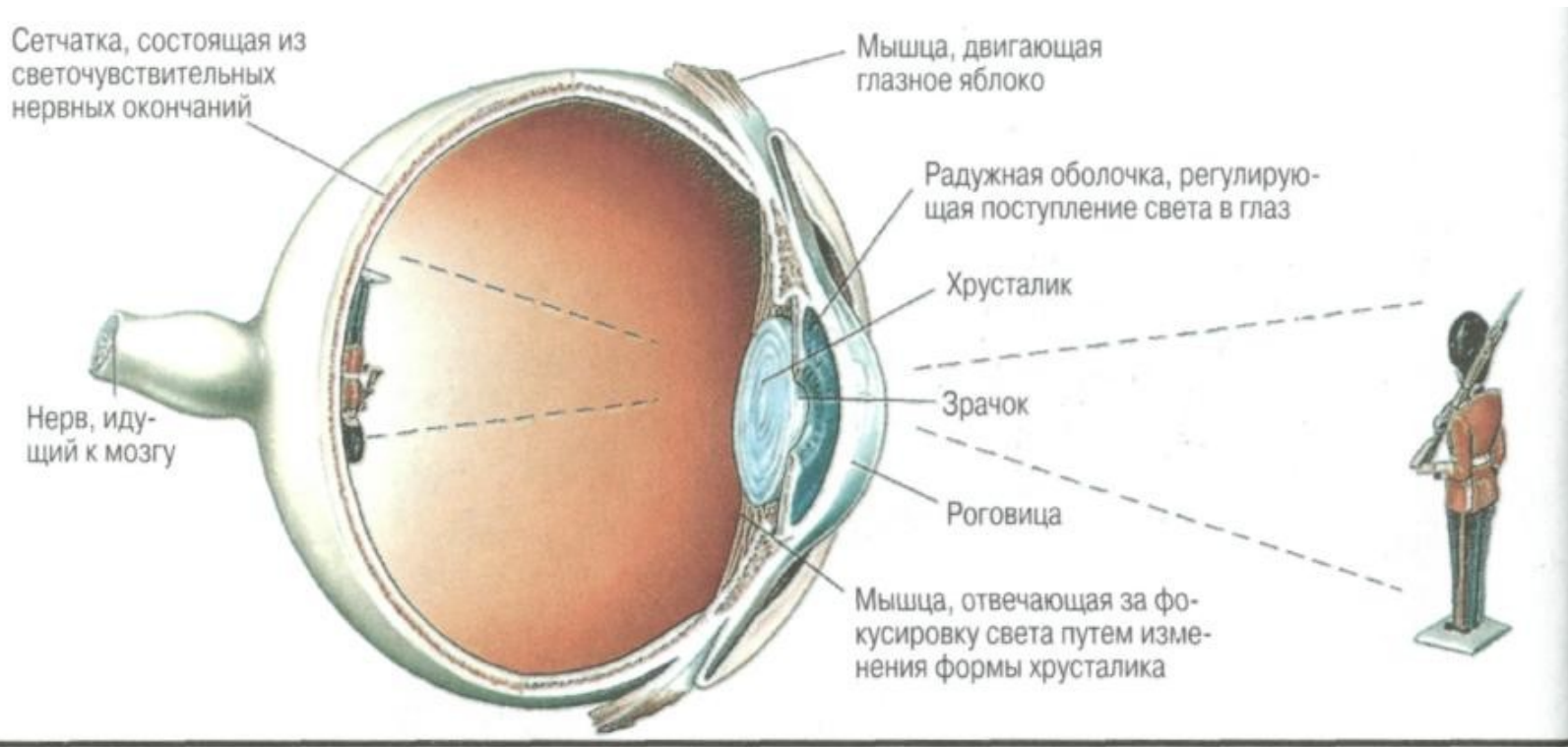
Кривая видимости - относительная спектральная чувствительность глаза к излучениям различных длин волн .

- максимальная чувствительность глаза при дневном свете – на длине волны **555 нм**,
- при сумеречном свете - на длине волны **510 нм**.



Геометрическая оптика

Физиологическая оптика изучает строение и функционирование всего аппарата зрения – от глаза до коры мозга; разрабатывается теория зрения, восприятия света и цвета.



Геометрическая оптика

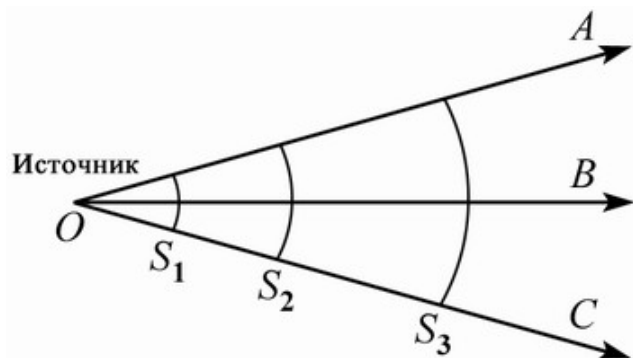
Интенсивность света – модуль среднего по времени значения плотности потока энергии, переносимой световой волной:

$$I = |\langle P \rangle| = |\langle [E, H] \rangle|$$

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n E_0^2 \sim n E_0^2$$

В случае однородной среды ($n = \text{const}$) интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды световой волны

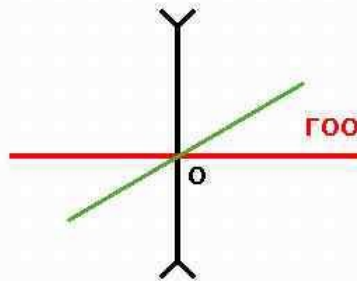
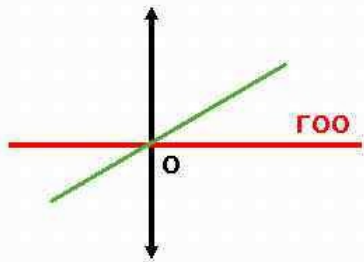
Луч – линия, вдоль которой распространяется световая волна.



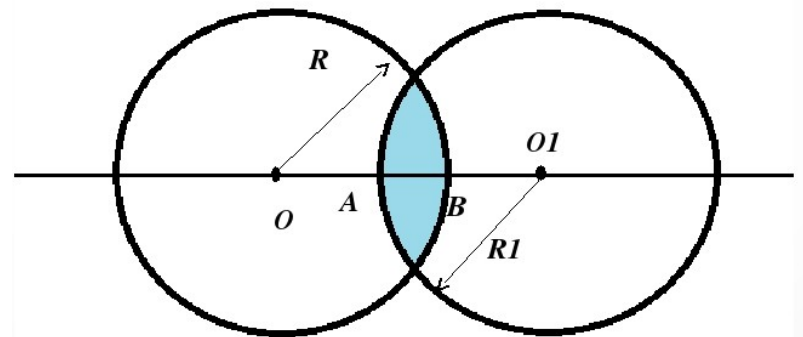
- В изотропных средах лучи перпендикулярны к волновым поверхностям
- В анизотропных средах лучи не ортогональны волновым поверхностям

Тонкие линзы

- **Линза** – прозрачное тело, ограниченное с двух сторон сферическими поверхностями.
- Виды линз – **выпуклые (собирающие)** и **вогнутые (рассеивающие)**.
- **Главная оптическая ось (ГОО)** – прямая, на которой лежат центры сферических поверхностей линз, ограничивающих линзу.
- **Побочная оптическая ось** – прямая проходящая через оптический центр линзы.
- Главная плоскость линзы проходит через её оптический центр перпендикулярно главной оптической оси.

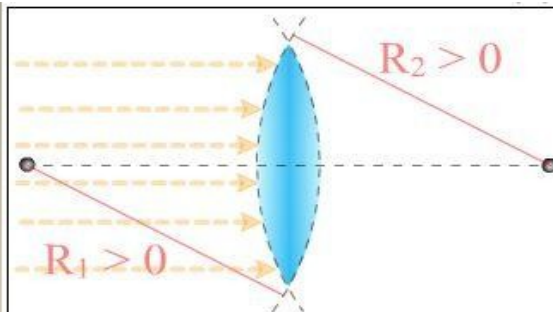


Э

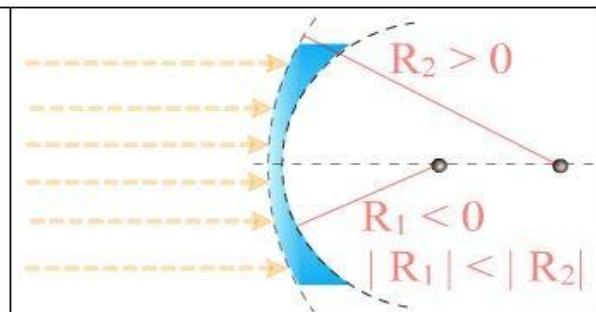


Тонкие линзы

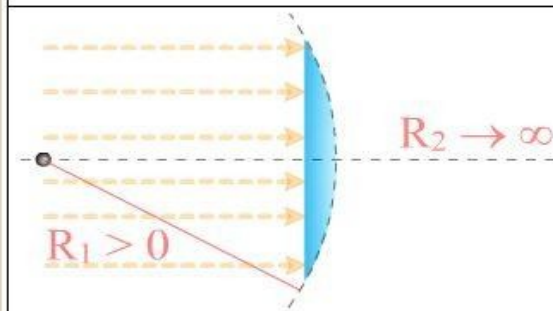
Виды линз



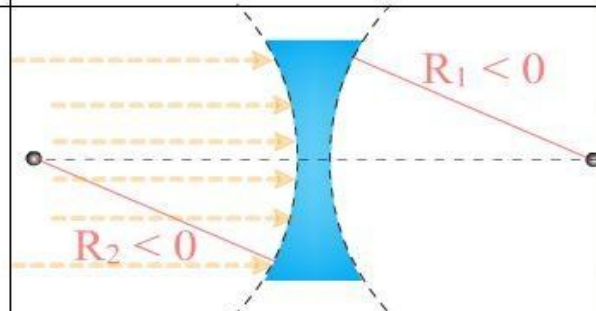
Двояко-выпуклая



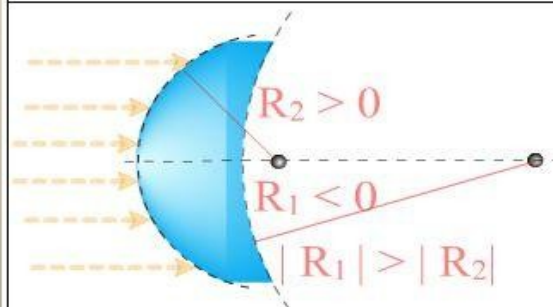
Выпукло-вогнутая



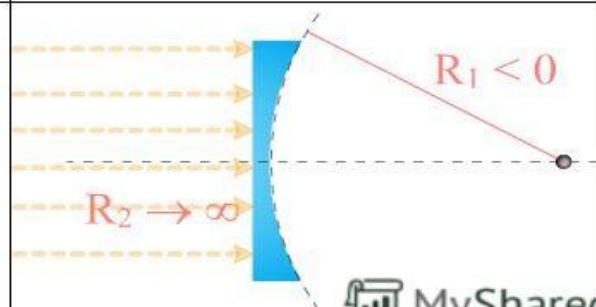
Плоско-выпуклая



Двояко-вогнутая



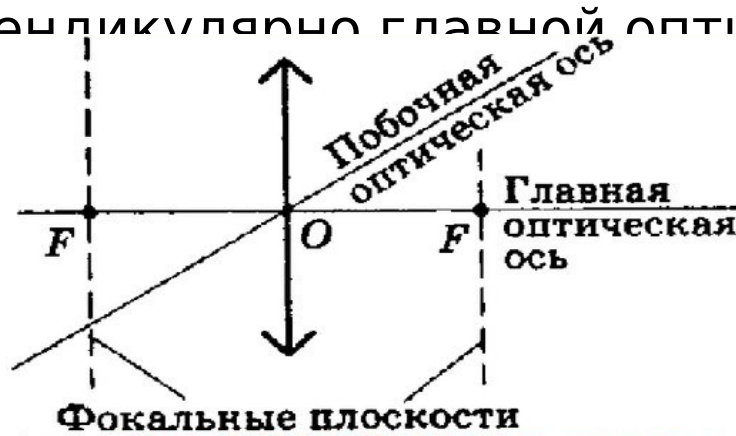
Вогнуто-выпуклая



Плоско-вогнутая

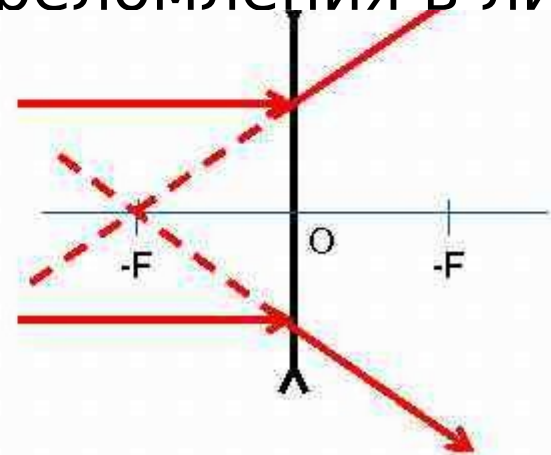
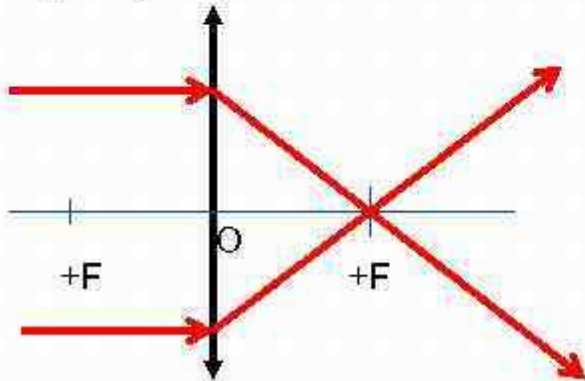
Тонкие линзы

- Линза является тонкой, если толщина линзы много меньше радиусов кривизны её сферических границ .
- **Фокусное расстояние**- это расстояние от оптического центра линзы до её фокуса.
- **Фокальная плоскость** – плоскость, проходящая через главный фокус линзы перпендикулярно к главной оптической оси.
- Точка О - **оптический центр линзы**.
- Главная плоскость линзы проходит через её оптический центр перпендикулярно главной оптической оси.



Тонкие линзы

- **Фокус собирающей линзы** – точка на главной оптической оси, в которой собираются лучи, падающие параллельно ГОО, после преломления в линзе.
- **Фокус рассеивающей линзы** – точка на главной оптической оси, через которую проходят продолжения расходящегося пучка лучей, параллельных ГОО. после преломления в линзе.

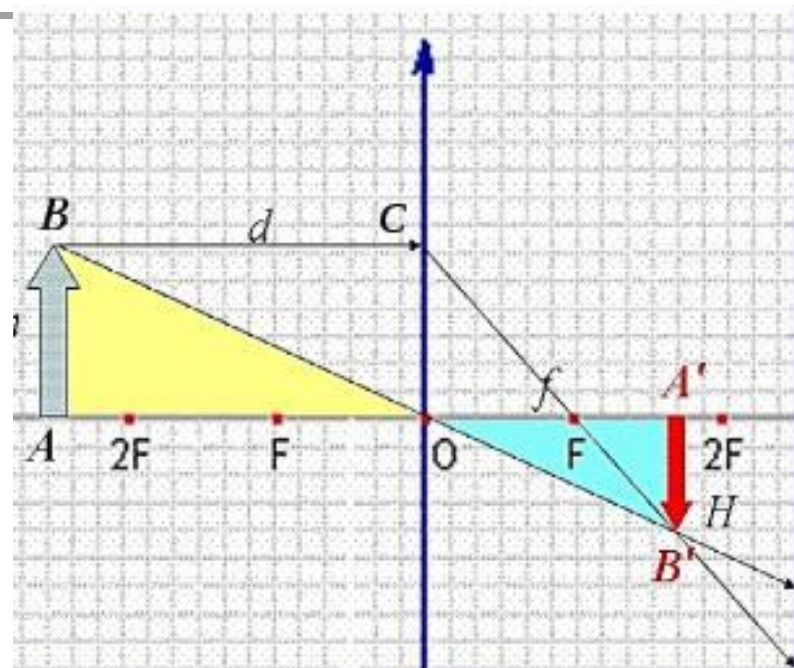


Тонкие линзы

- *Оптическая сила линзы:*

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

- *1 дптр - это оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1м.*



- *Формула тонкой линзы:* $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$

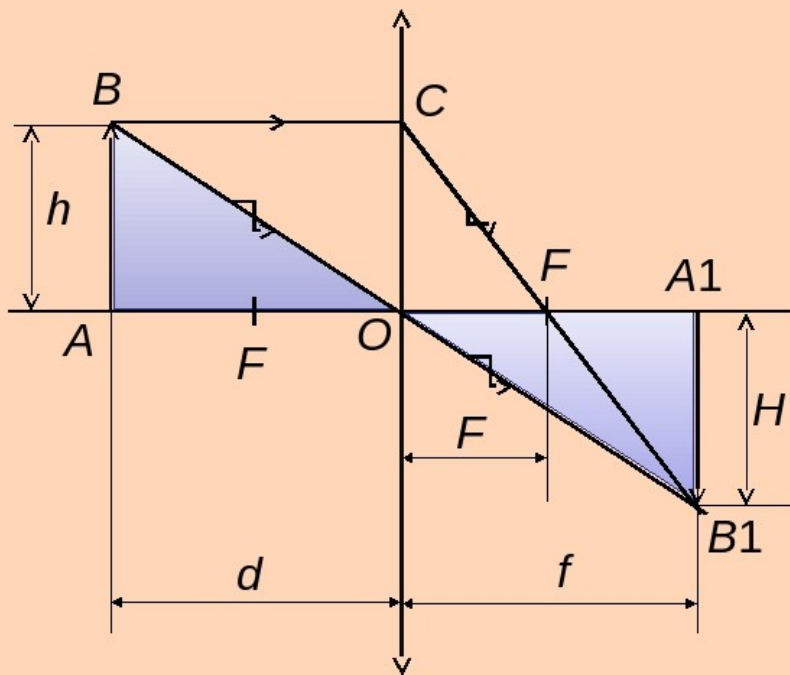
$$\frac{1}{F} = \left(\frac{n_{\text{л}}}{n_{\text{ср}}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

- 
- *Линейное увеличение (Γ) – это отношение линейных размеров изображения к линейным размерам предмета.*

- $\Gamma = \frac{H}{h}$ или $\Gamma = \frac{f}{d}$

- Γ - увеличение (уменьшение)
- H – линейный размер изображения, м
- h - линейные размеры предмета, м
- f - расстояние от линзы до изображения, м
- d - расстояние от линзы до предмета, м

Тонкие линзы



Линейное увеличение линзы — это отношение линейного размера изображения к линейному размеру предмета.

$$\Gamma = \frac{H}{h}$$

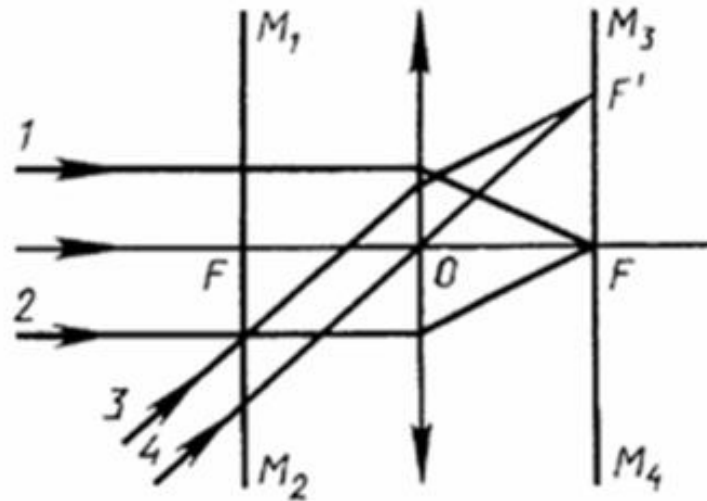
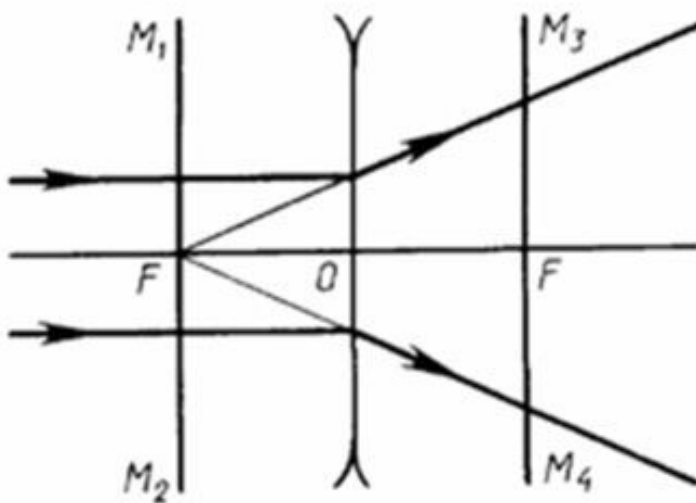
$$\triangle ABO \sim \triangle A_1B_1O \Rightarrow \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$$

$$\Gamma = \frac{f}{d}$$

Тонкие линзы

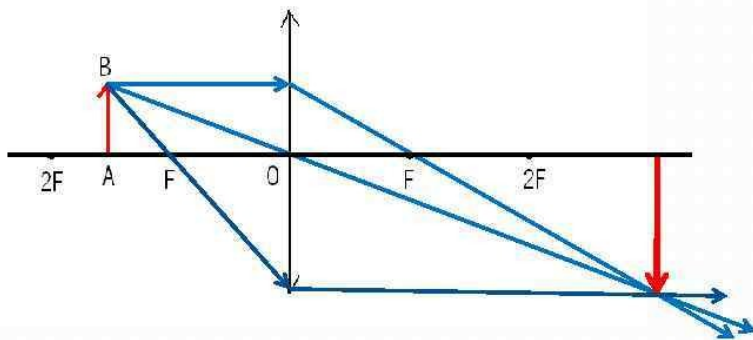
Изображение хода лучей в рассеивающей и собирающей линзах (M_1M_2 и M_3M_4 – фокальные плоскости линз)

Фокус линзы

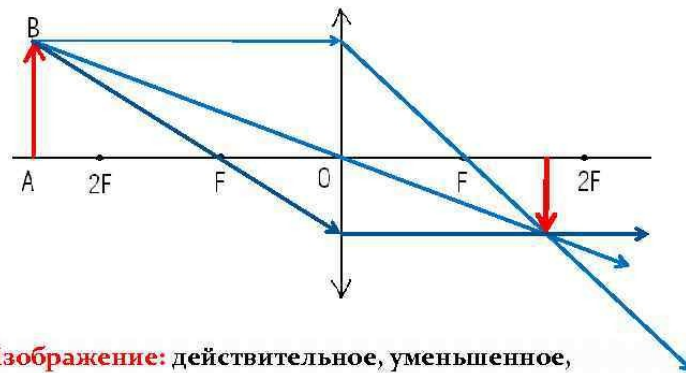


F – главный фокус, F' – побочный фокус

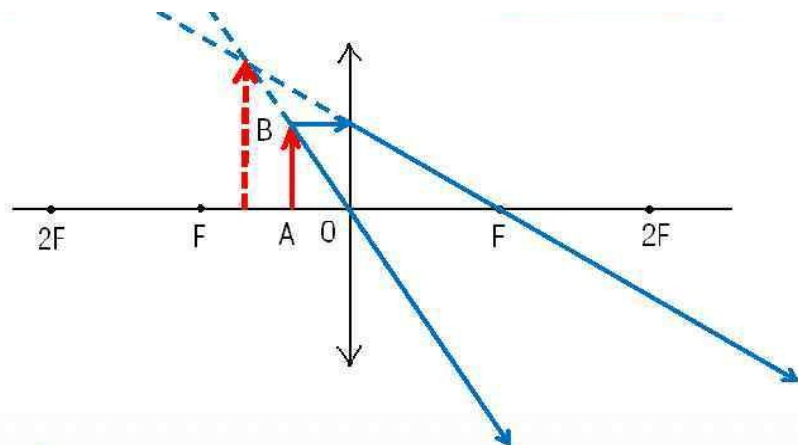
Тонкие линзы



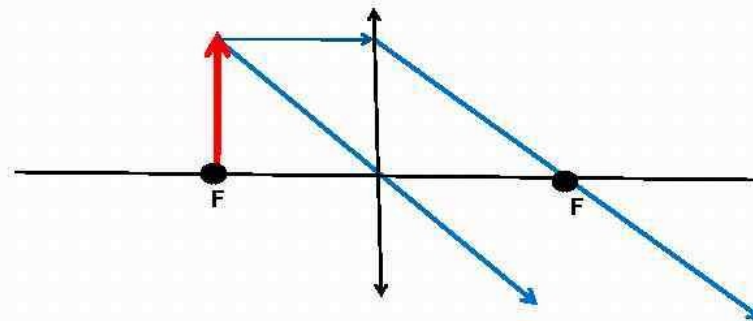
Изображение: действительное, увеличенное, перевернутое



Изображение: действительное, уменьшенное, перевернутое



Изображение: мнимое, увеличенное, прямое

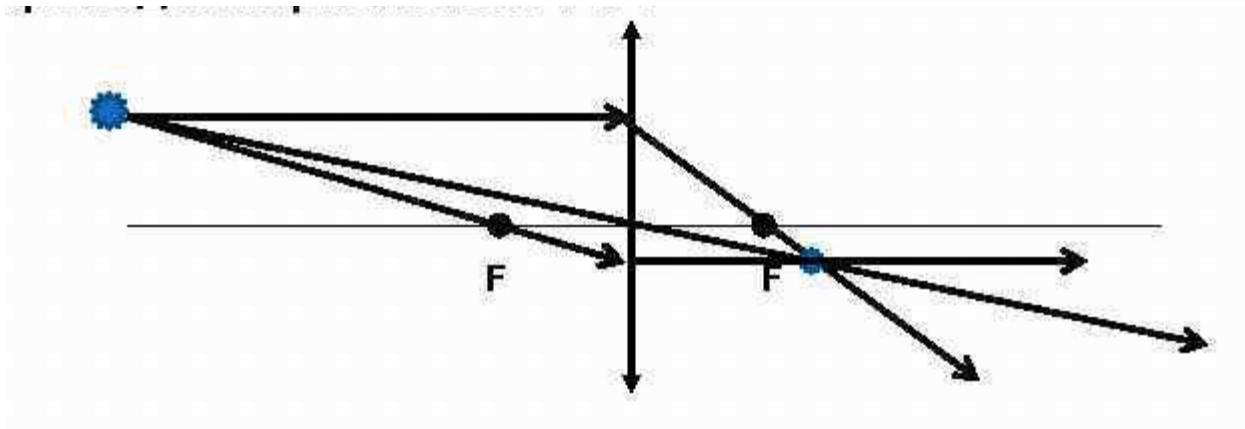


если предмет находится в фокусе, то изображения не будет

Тонкие линзы

Основные лучи для построения изображения в собирающей линзе:

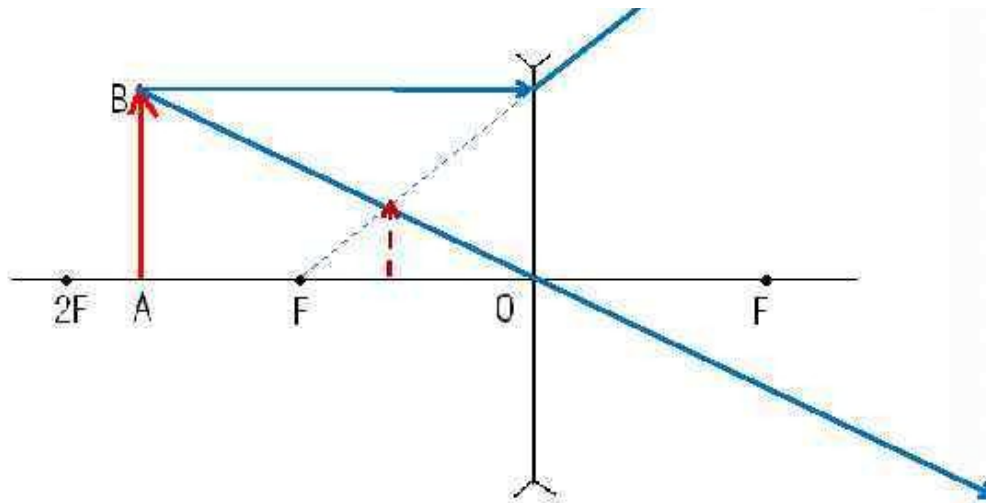
- Луч, параллельный ГОО, преломляясь в линзе, проходит через её фокус,
- Луч, идущий через оптический центр линзы, проходит через неё, не преломляясь,
- Луч, идущий через фокус, преломляясь в линзе, проходит параллельно ГОО



Тонкие линзы

Основные лучи для построения изображения в рассеивающей линзе:

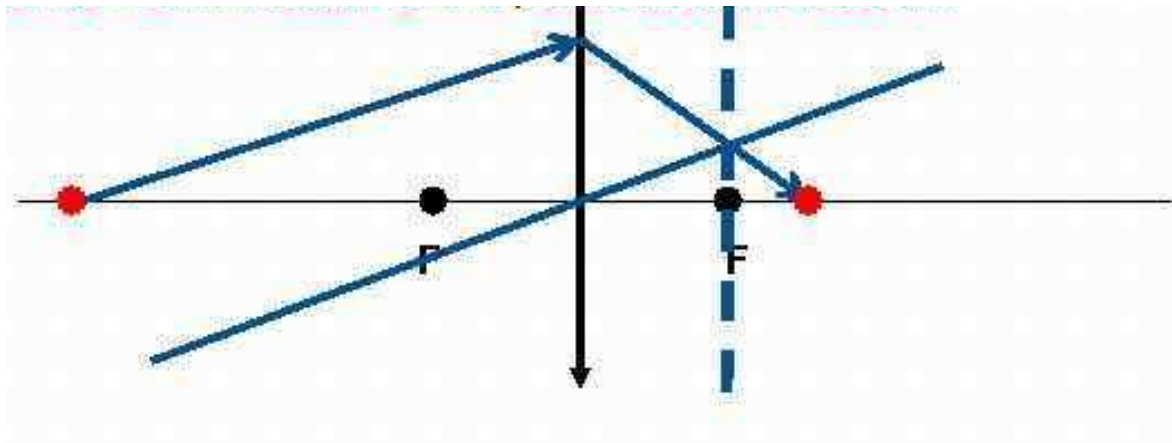
- Луч, параллельный ГОО, преломляясь в линзе, выходит как бы из мнимого (переднего) фокуса,
- Луч, идущий через оптический центр линзы, проходит через неё, не преломляясь.



Тонкие линзы

Основные лучи для построения изображения точки, находящейся на ГОО:

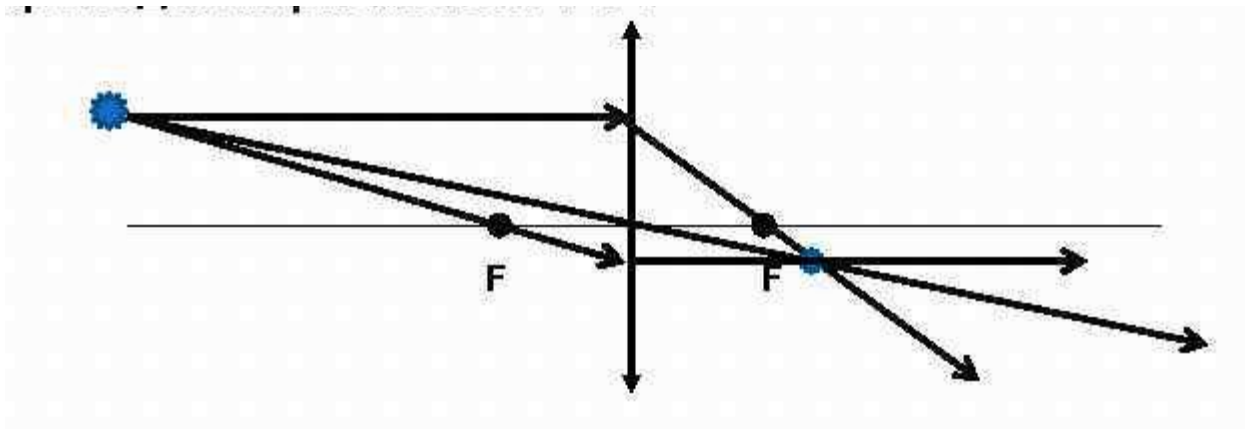
- Строим любой луч, идущий из точки до линзы,
- Строим побочную оптическую ось, параллельную взятому лучу,
- Строим фокальную плоскость,
- Строим параллельный луч, проходящий через точку пересечения побочной оптической оси и фокальной плоскости



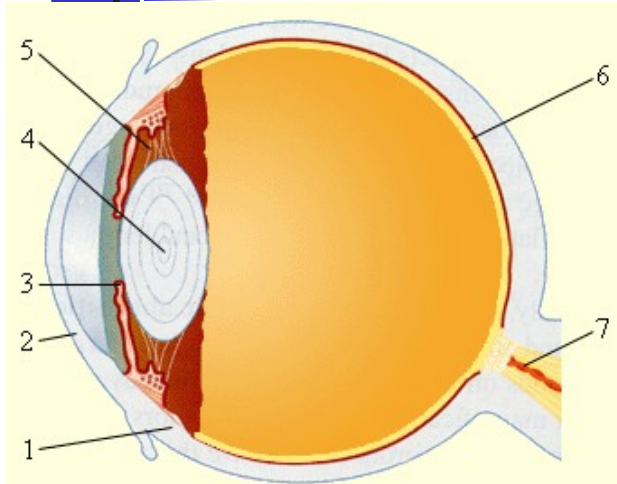
Тонкие линзы

Основные лучи для построения изображения в собирающей линзе:

- Луч, параллельный ГОО, преломляясь в линзе, проходит через её фокус,
- Луч, идущий через оптический центр линзы, проходит через неё, не преломляясь,
- Луч, идущий через фокус, преломляясь в линзе, проходит параллельно ГОО



Глаз, как оптическая система



1 - склерой

2 - роговица

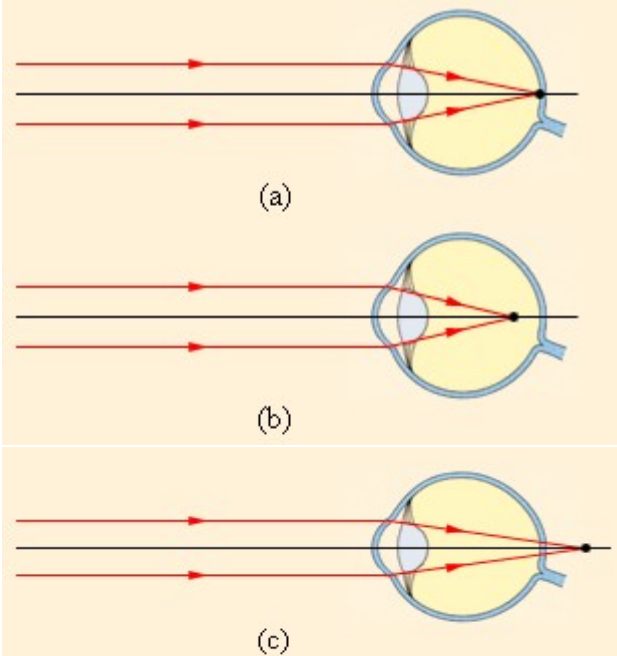
3 - радужная оболочка со зрачком (от 2 до 8 мм, т.е. действует подобно диафрагме фотоаппарата)

4 - хрусталик

5 - мышца, изменяющая в некоторых пределах **форму хрусталика**, изменяя тем самым его **оптическую силу**

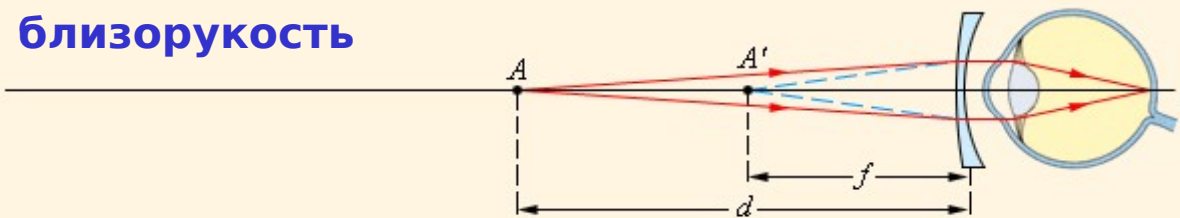
Остальная часть глаза заполнена стекловидным телом

6 - глазное дно 7 - палочки и колбочки, являющиеся **светочувствительными элементами**

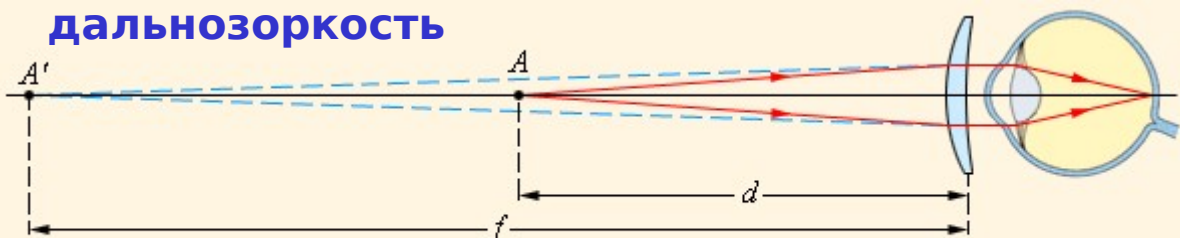


Дефекты зрения и их коррекция

близорукость

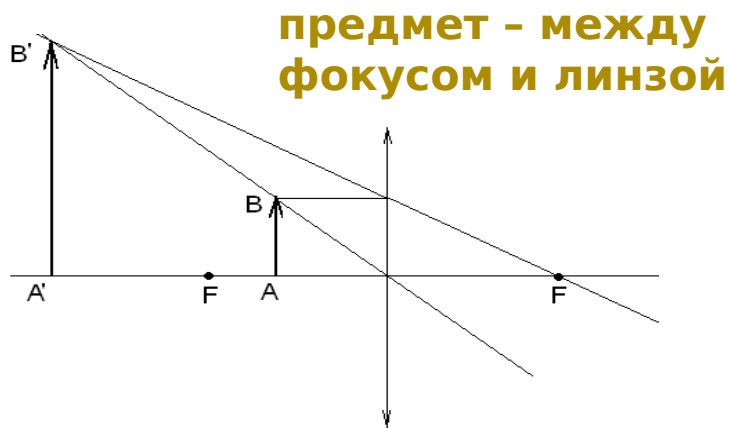


дальнозоркость



Оптические приборы

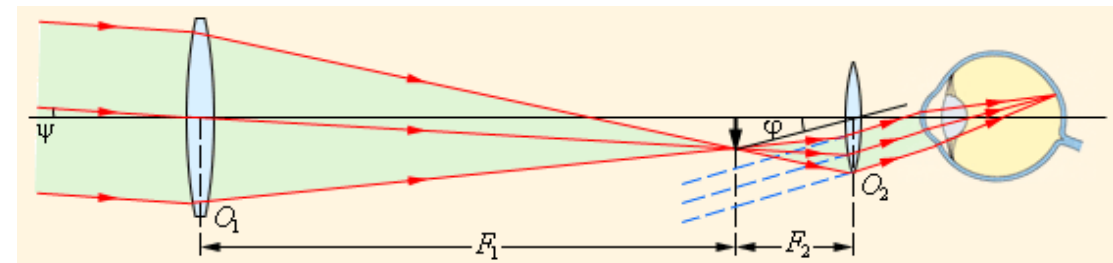
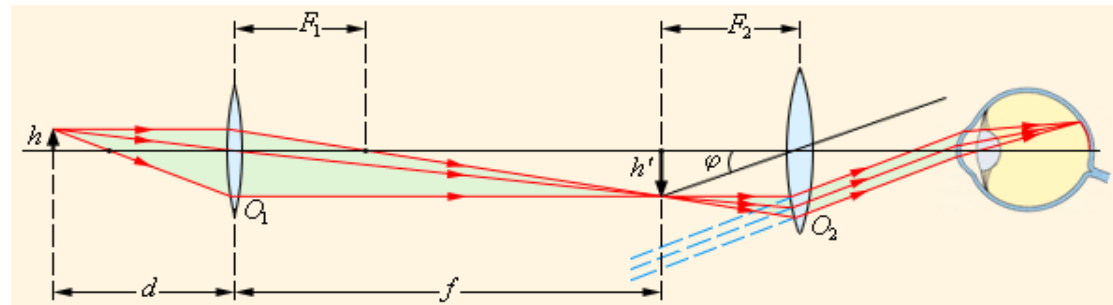
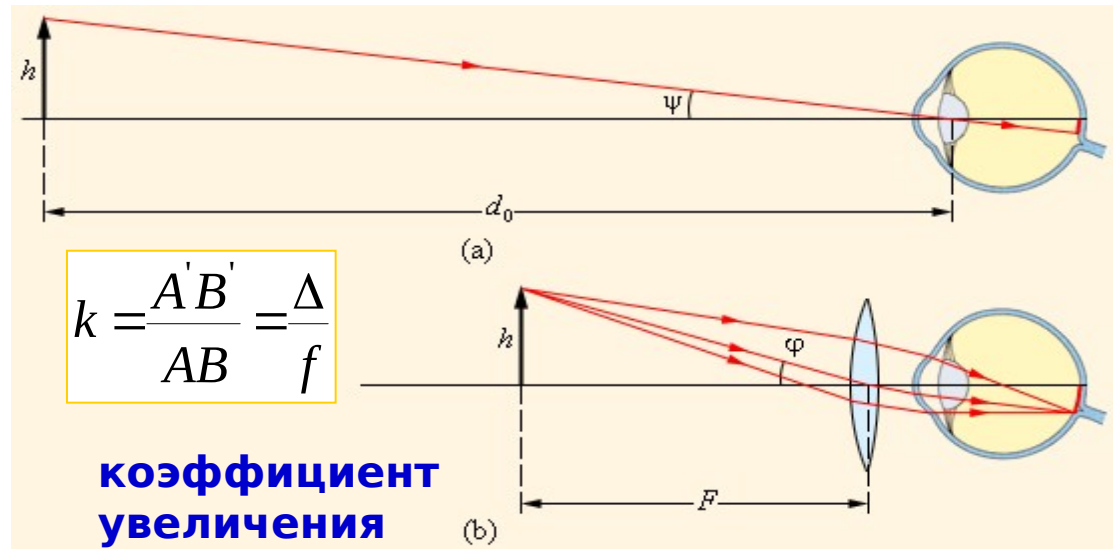
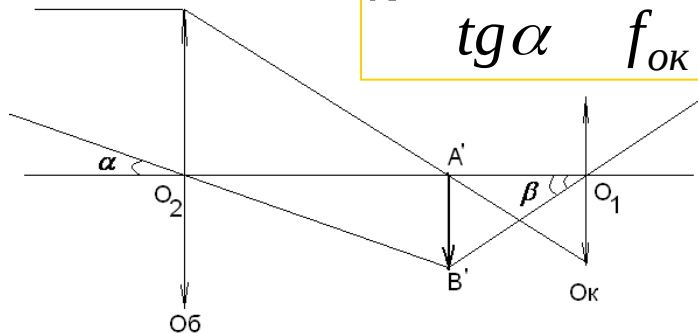
Лупа



Микроскоп

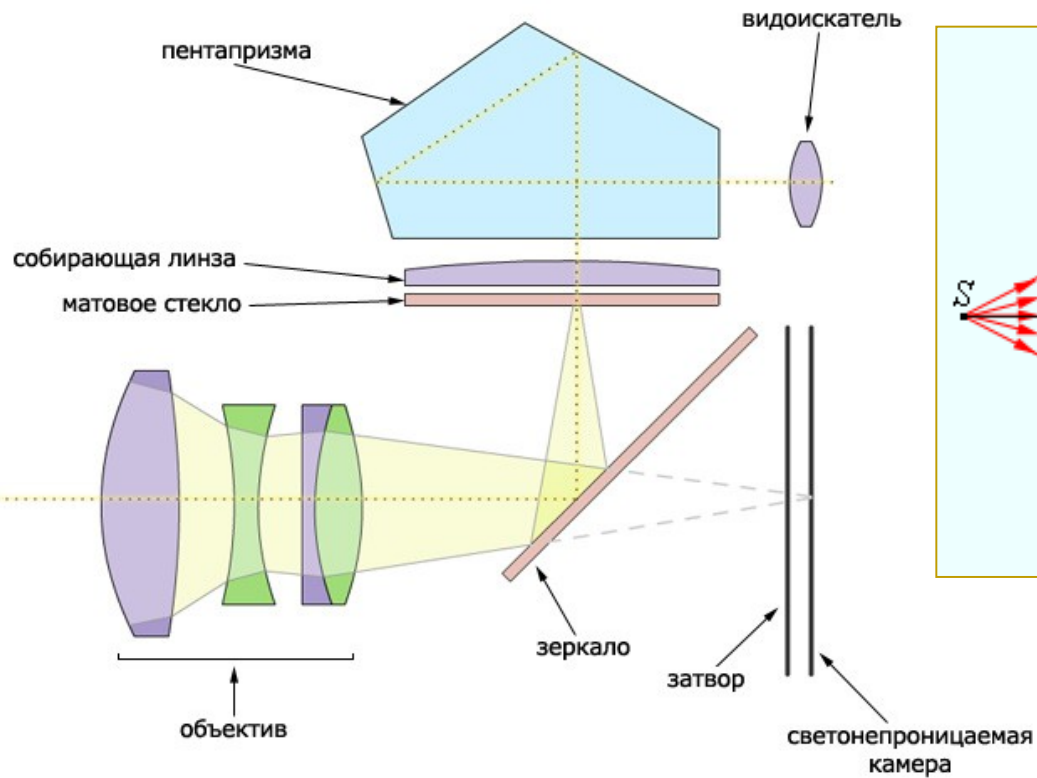
$$k = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{f_{\text{об}}}{f_{\text{ок}}}$$

Телескоп



Оптические приборы

Фотоаппарат



Проектор

