

Концепции и модели физики

Кузьмичев Сергей Дмитриевич



Содержание лекции №1

1. Основные понятия геометрической оптики.
2. Законы геометрической оптики. Принцип Ферма́.
3. Примеры: камера-обску́ра, плоское и параболическое зеркала, уголко́вый отражатель, призма, полное внутреннее отражение, миражи.
4. Линза. Оптическая сила линзы. Формула тонкой линзы. Увеличение линзы. Глаз. Дальнозоркость и близорукость. Очки.
5. Зрительные трубы Кеплера и Галилея. Нормальное увеличение зрительной трубы. Яркость изображения.
6. Формулы Френеля. Угол Брюстера. Световое давление.

Физическая Оптика – раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света, а также его взаимодействие с веществом.

Свет – электромагнитное излучение (описывается либо как электромагнитные волны, либо как поток квантов (фотонов)).

Оптическая область спектра электромагнитных волн:

❖ **Инфракрасное излучение** –

$$\lambda = 2 \text{ мм} \div 760 \text{ нм}, \nu = 1,5 \cdot 10^{11} \div 3,9 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$$

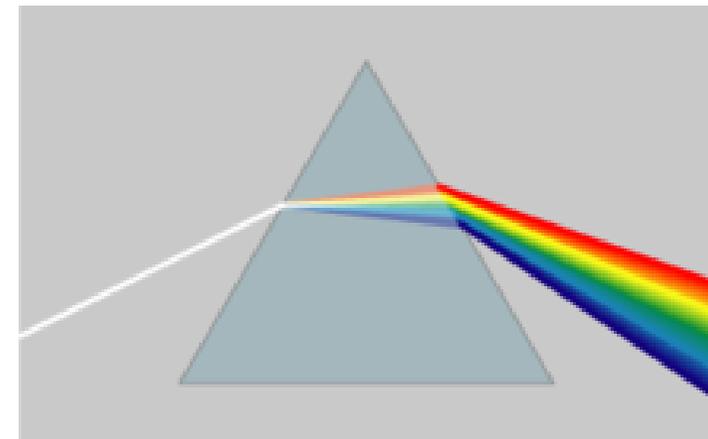
❖ **Видимое излучение** -

$$\lambda = 760 \text{ нм} \div 400 \text{ нм}, \nu = 3,9 \cdot 10^{14} \div 7,5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$$

❖ **Ультрафиолетовое излучение** -

$$\lambda = 400 \text{ нм} \div 10 \text{ нм}, \nu = 7,5 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{16} \text{ Гц}$$

Радуга



Каждый Охотник Желает Знать Где Сидит Фазан

Карлссон Опять Жизнерадостно Задумал Гадость С Фрикадельками
(детское)

Как-то Один Жуткий Заяц Гонял Свирепого Фокстерьера
(охотничье)

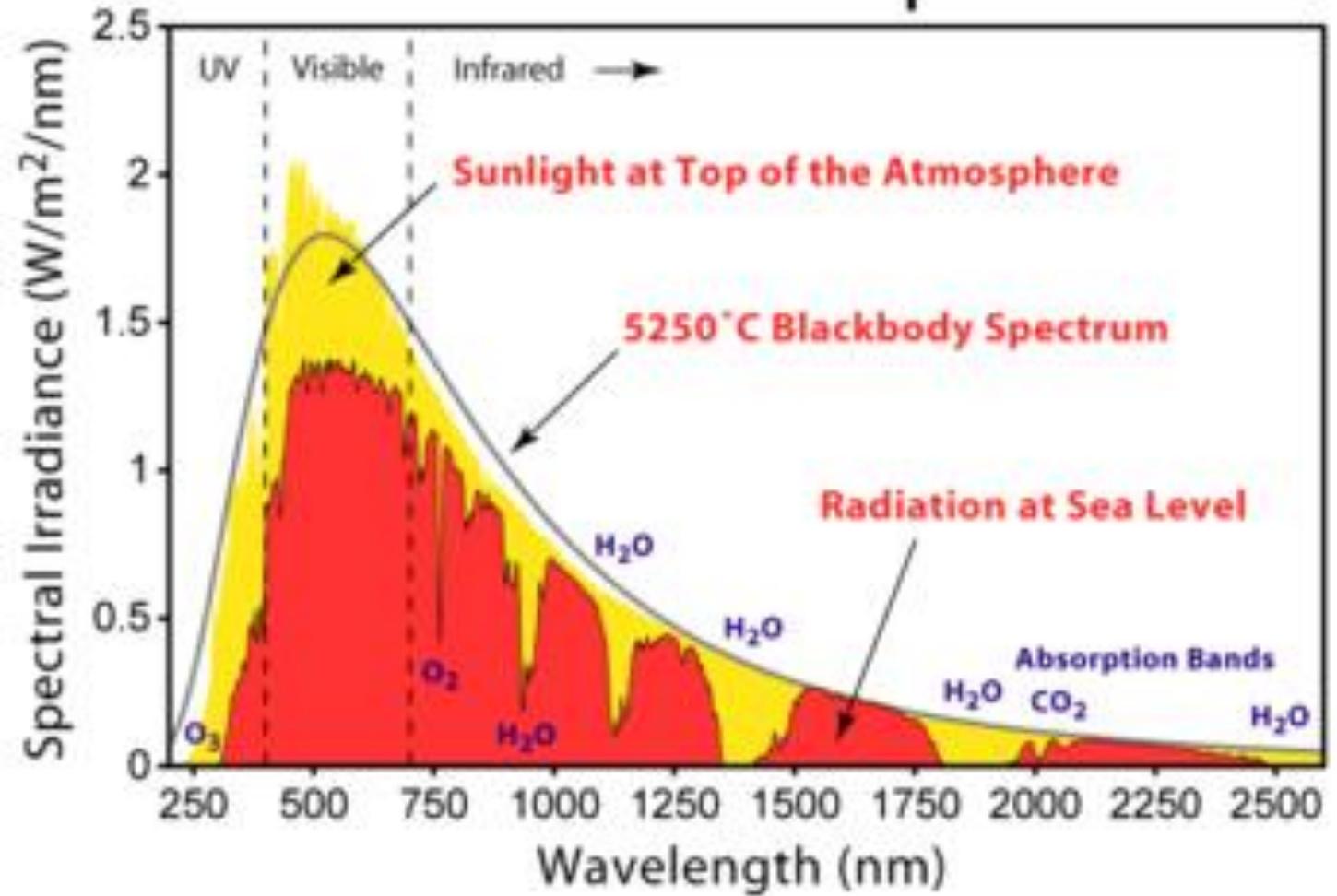
Корабль Оказался Жалкой Затычкой Горловины Скандинавских Фьордов
(морское)

Кем Ощущается Жестокий Звон Гонга Сопротивления Фатальности?
(философское)

Источники света

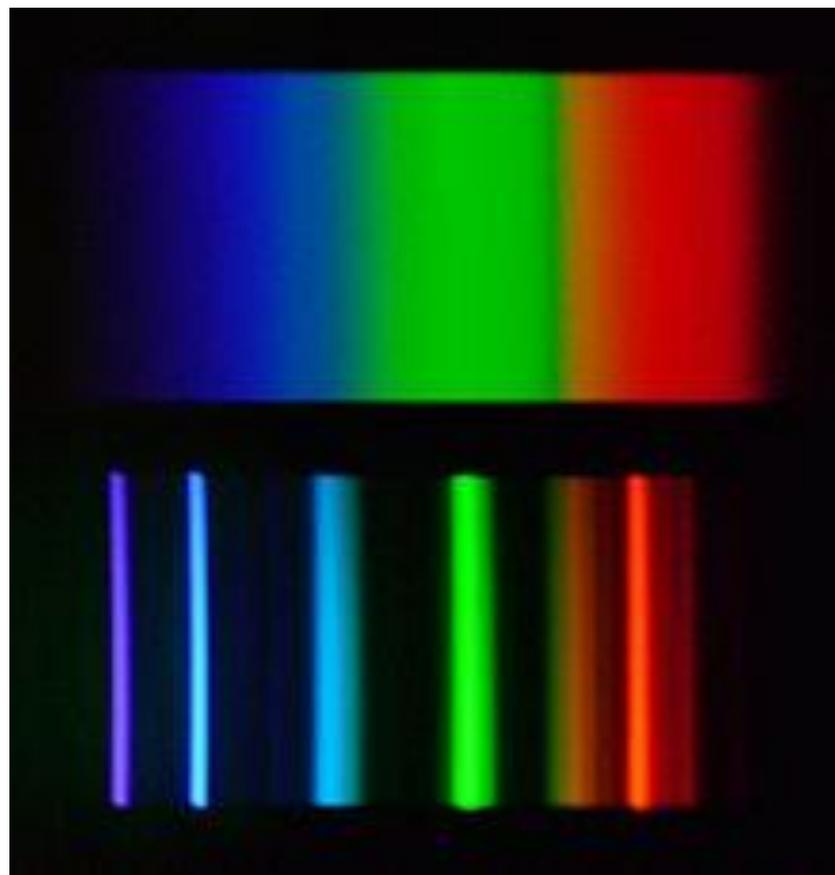


Solar Radiation Spectrum



Спектр излучения Солнца

Источники света



1

2

**Спектры излучения:
лампы накаливания (1)
люминесцентной лампы (2)**

Основные законы геометрической оптики

Закон прямолинейного распространения света

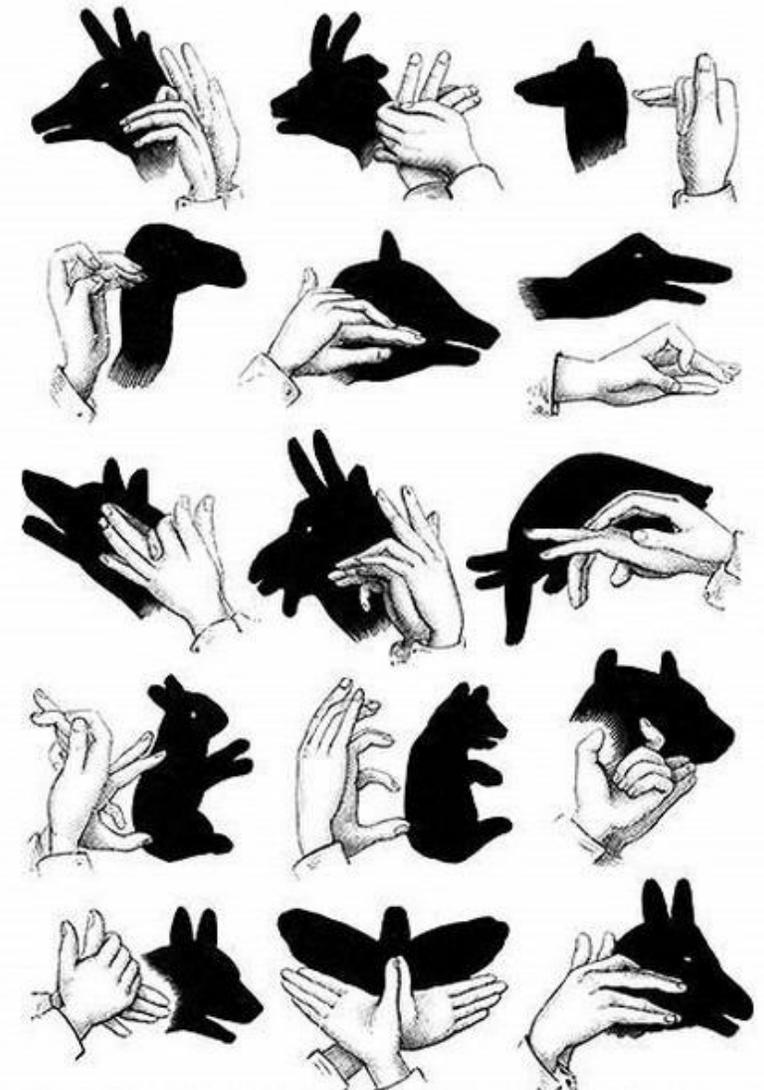
В прозрачной однородной среде свет распространяется по прямым линиям.

Опытные доказательства: резкие тени, отбрасываемые непрозрачными телами, освещаемые точечными источниками света, силуэт, камера обскура.

Точечный источник света – источник, размер которого мал по сравнению с размерами освещаемого тела и расстоянием до него.

В мутной среде распространение света сопровождается его ***рассеянием*** в стороны.

Закон прямолинейного распространения света



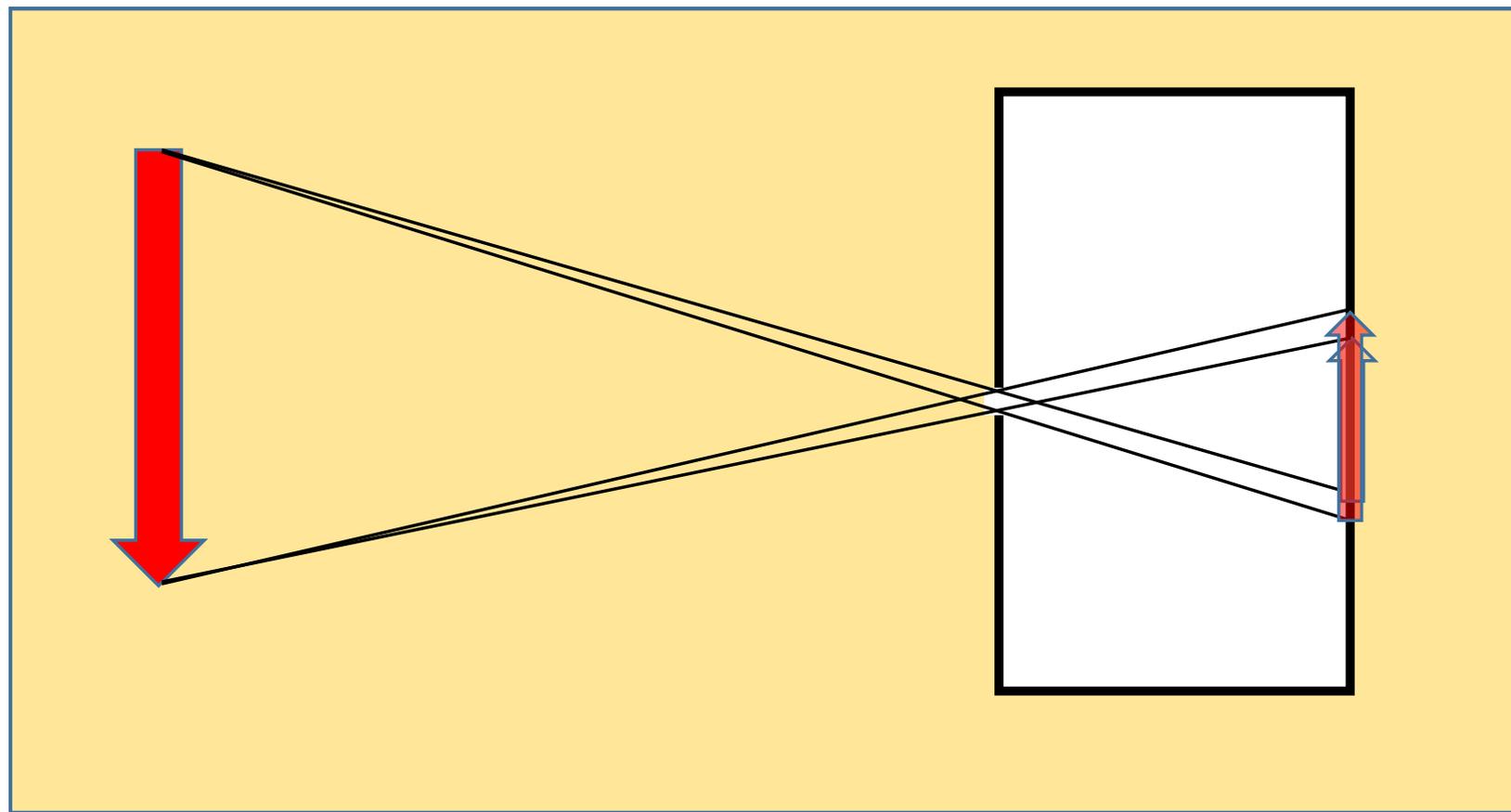
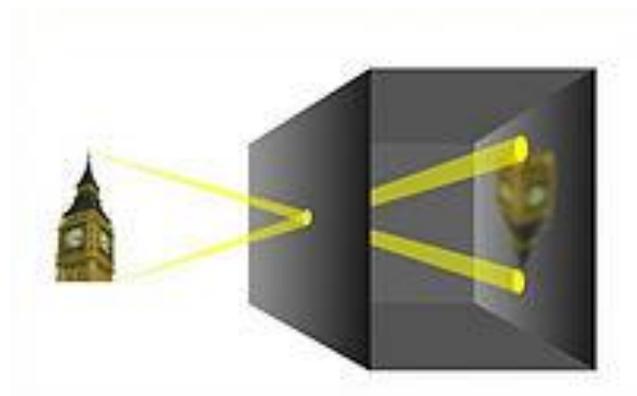
Ombres de la main. — Renne, chamois, bœuf, chameau, porc, âne, lapin, chèvre, l'éphant lièvre, ours, loup, chien, papillon, âne.

oldbookillustrations.com

Этьен де Силуэт (1709—1767) — французский министр, известный скупостью, на которого была сделана «скупая» карикатура в виде одного только **теневого профиля**.

Распространённое слово «силуэт» образовалось от его фамилии после этого события.

Камера обскура (pin-hole)





Закон независимости световых пучков*

Распространение всякого светового пучка в среде не зависит от того, есть ли в ней другие пучки света или нет*.

Изображение на сетчатке глаза не изменится, если свет, образующий это изображение, будет на своём пути проходить через пучки света, не попадающие в глаз.

Освещённость экрана, создаваемая несколькими световыми пучками, равна сумме освещённостей, создаваемых каждым пучком в отдельности*.

Луч есть линия, вдоль которой распространяется свет. Световой пучок содержит бесконечное множество лучей.

Луч – конечный, но достаточно узкий световой пучок, который может существовать изолированно от других пучков.

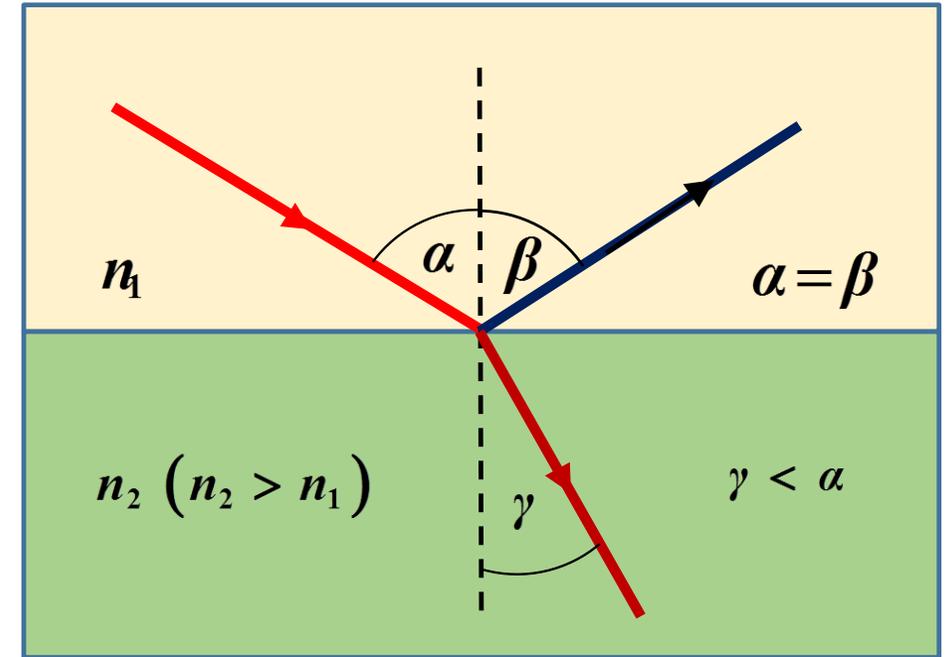
* - Дифракция, интерференция, нелинейная оптика.

Законы отражения

Когда луч достигает плоской границы раздела двух прозрачных сред, он частично проходит во вторую среду (преломляется), частично возвращается обратно (отражается).

Падающий и отражённый лучи лежат в одной плоскости с нормалью к границе раздела в точке падения (плоскость падения), причём угол падения равен углу отражения:

$$\alpha = \beta$$

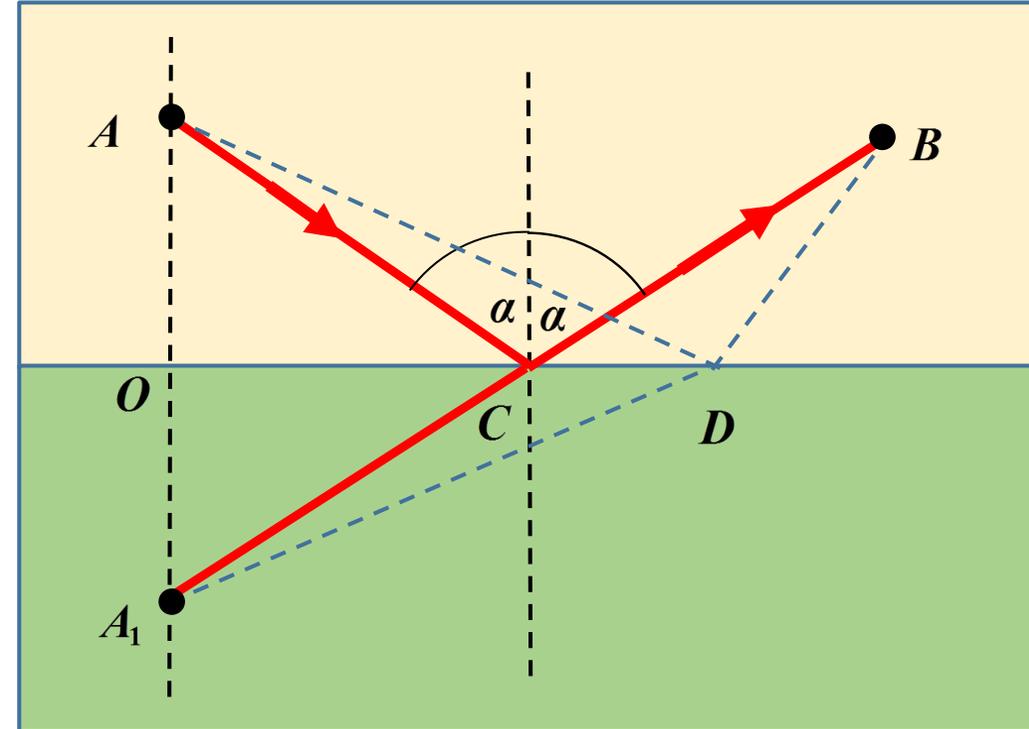


Законы отражения и принцип Ферма

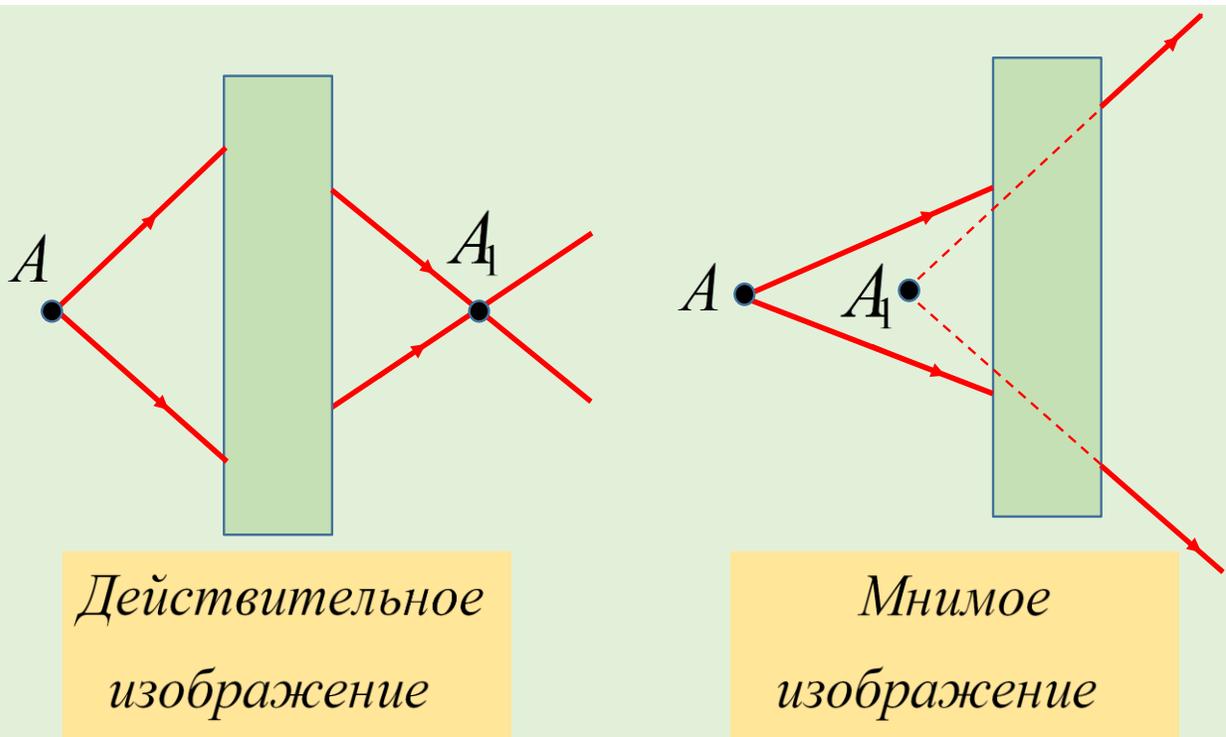
Свет при распространении из одной точки в другую «выбирает» путь, которому соответствует

наименьшее
время распространения.

$$AC + CB < AD + DB$$



Оптическое изображение точки.

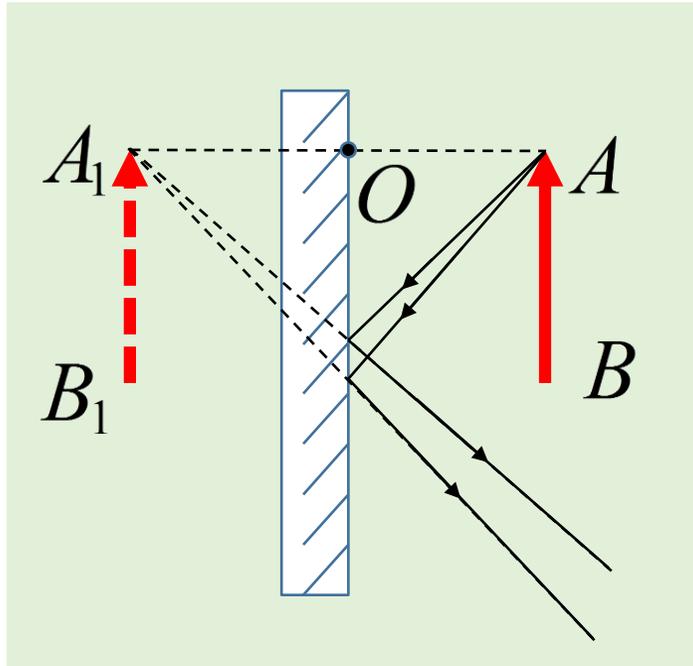


Если пучок световых лучей, исходящий из какой-либо точки A , в результате отражений, преломлений или изгибаний в неоднородной среде, сходится в точке A_1 , то точка A_1 называется **изображением** точки A .

Изображение A_1 называют **действительным**, если световые лучи **действительно пересекаются** в точке A_1 .

Изображение A_1 называют **мнимым**, если в этой точке пересекаются продолжения лучей, проведённые в направлении, обратном направлению распространения света.

Плоское зеркало.



Плоское зеркало создаёт **мнимое, прямое** изображение протяжённого предмета. Размеры изображения **равны** размерам предмета.

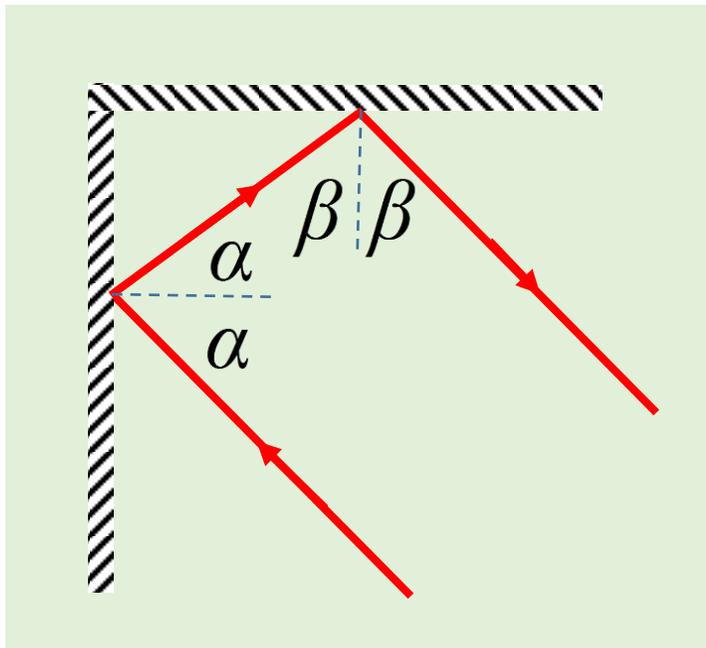
$$AB = A_1B_1, \quad AO = OA_1$$

Левое-правое.

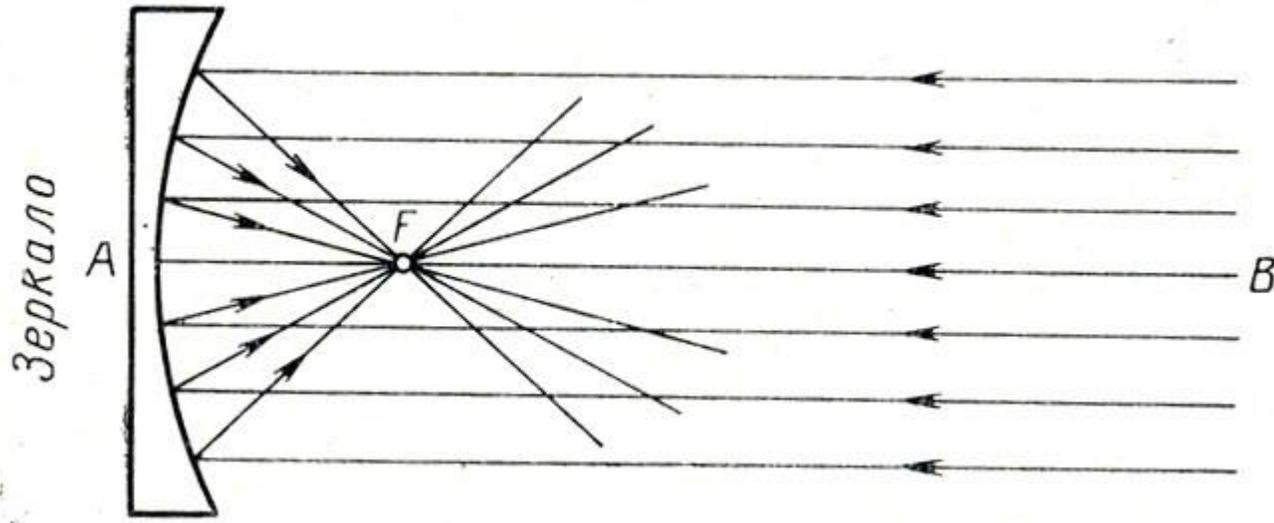
Какова должна быть минимальная высота плоского зеркала, расположенного на вертикальной стене, чтобы человек смог увидеть себя в полный рост?

Угловый отражатель.

Угловый отражатель: катафот, отражатели радиоволн, определение расстояния до Луны оптическими методами.

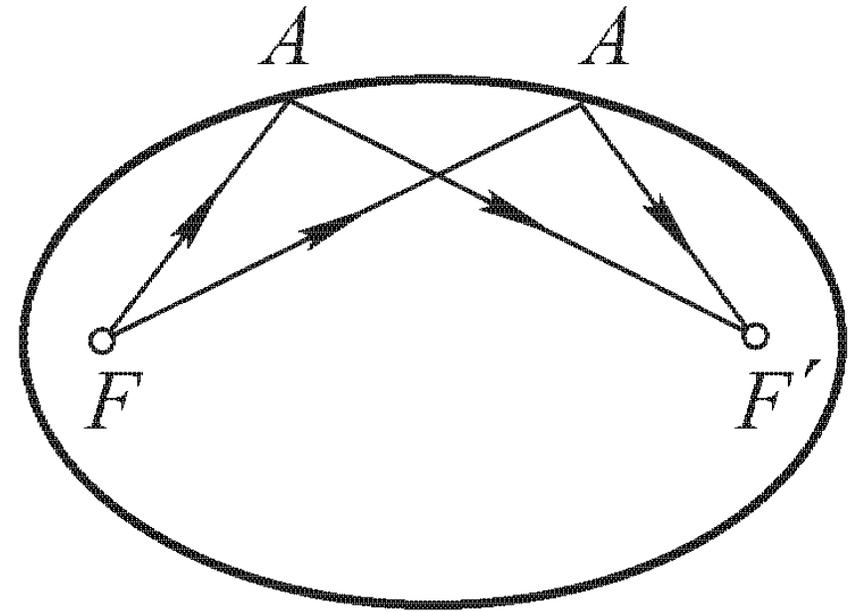


Параболическое и эллиптическое зеркала



$$y^2 = 2px$$

Координаты фокуса $\left(\frac{p}{2}, 0\right)$



$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad \varepsilon = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

Координаты фокусов $(\pm a\varepsilon, 0)$

Показатель преломления.

Фазовая скорость электромагнитной волны

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{n}, \quad n = \sqrt{\epsilon\mu}, \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ м / с}$$

Величины ϵ , μ зависят от частоты электромагнитной волны. Для прозрачных стёкол показатель преломления увеличивается с ростом частоты в видимом диапазоне.

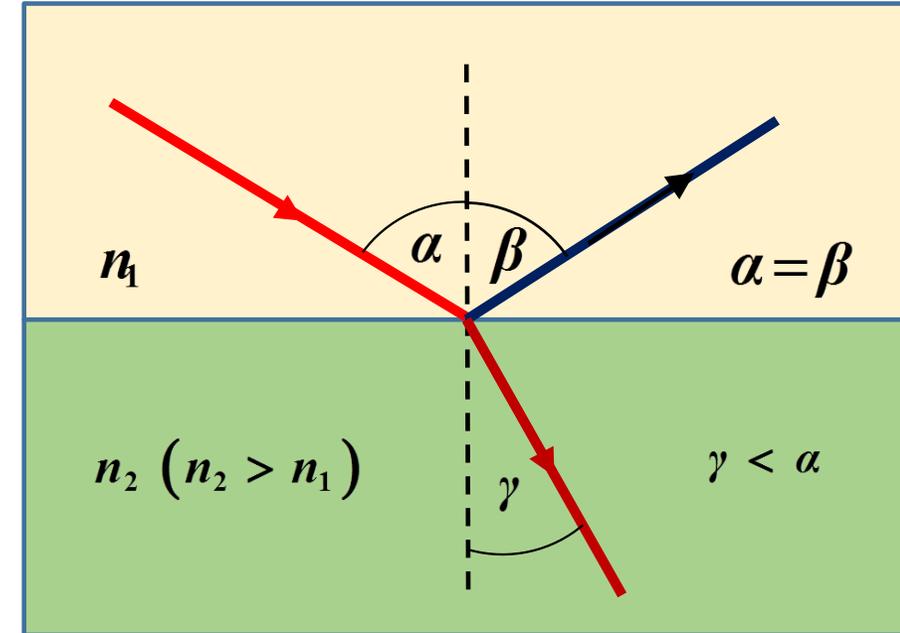
Показатель преломления зависит от поляризации электромагнитной волны (кристаллооптика), давления, температуры, внешних электрических и магнитных полей, интенсивности света (нелинейная оптика).

Показатели преломления некоторых веществ (в видимом диапазоне)

Вещество	Показатель преломления
<i>Воздух</i>	1,000292
<i>Вода</i>	1,333
<i>Алмаз</i>	2,417
<i>Оптические стёкла</i>	1,48÷1,80
<i>Каменная соль</i>	1,544

Законы преломления

Преломлённый луч лежит в плоскости падения, причём отношение синуса угла преломления к синусу угла падения для рассматриваемых сред зависит от длины световой волны, но не зависит от угла падения



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}, \quad n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma$$

n_1, n_2 - показатели преломления веществ.

Рефракция при астрономических наблюдениях. Принцип Ферма и преломление.

Полное внутреннее отражение

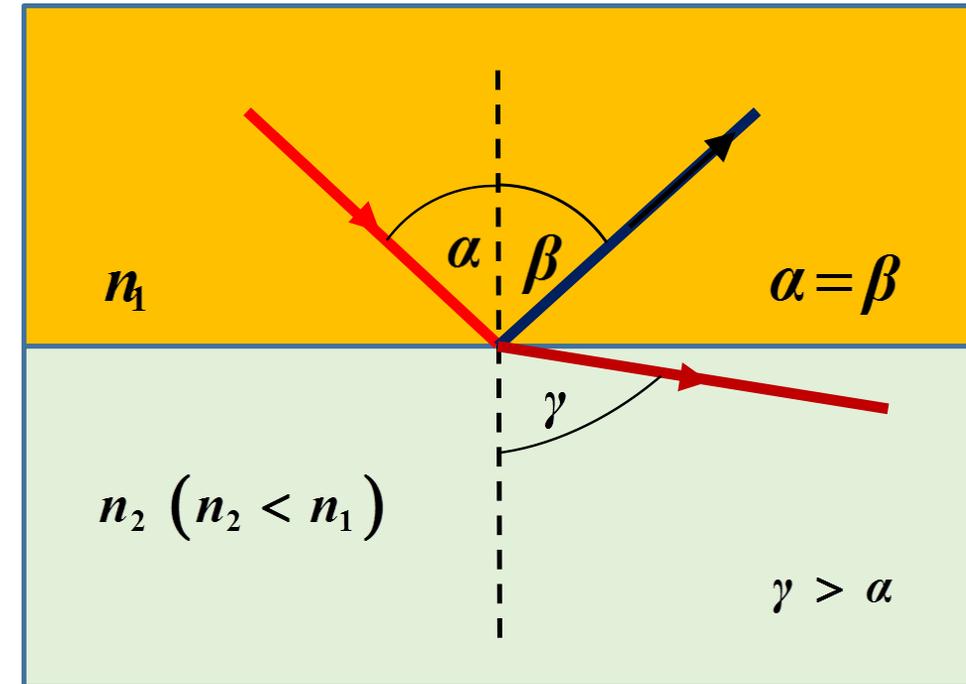
$$\frac{n_2}{n_1} < 1, n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \gamma$$

Предельный угол полного отражения

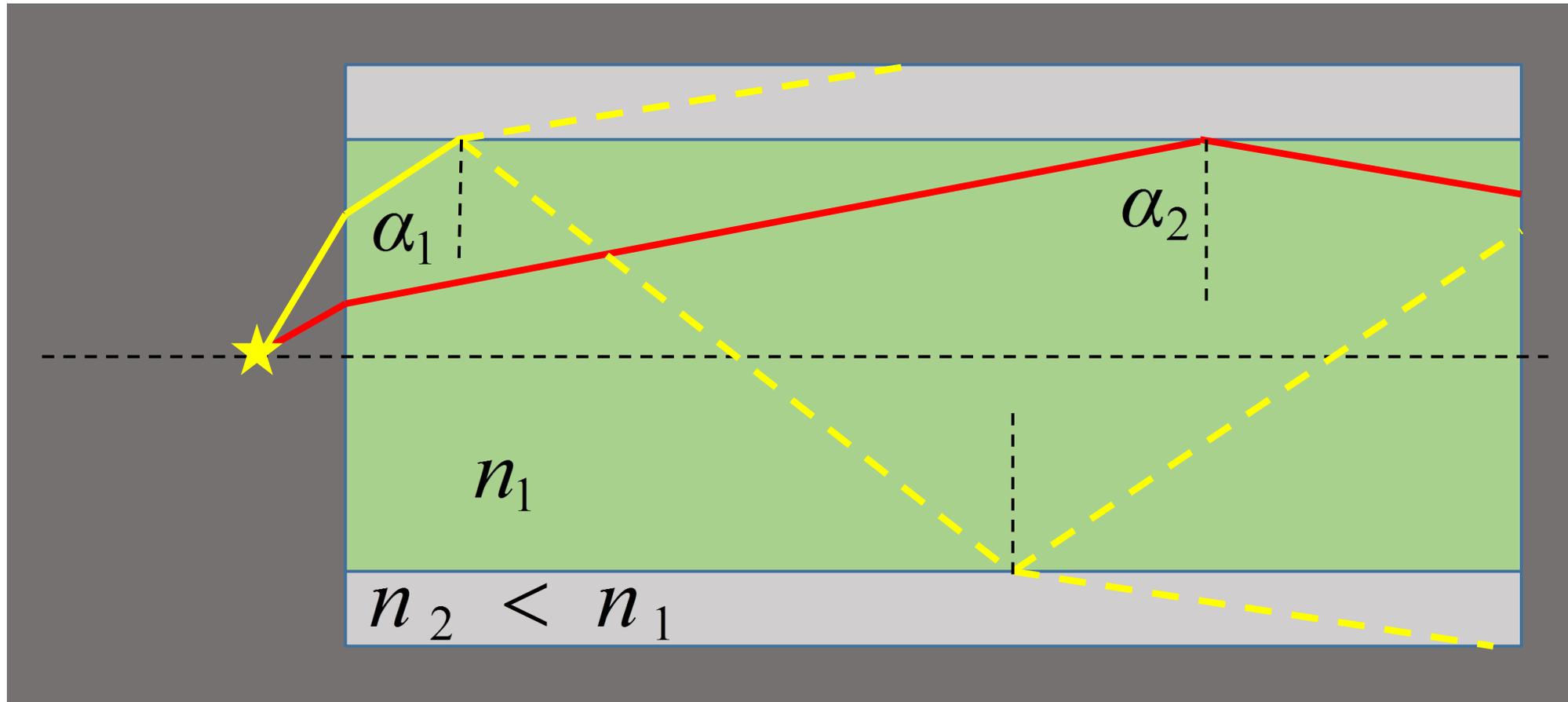
$$\gamma = \frac{\pi}{2}, \sin \alpha_{\text{ПВО}} = \frac{n_2}{n_1}$$

При $\alpha > \alpha_{\text{ПВО}}$ преломлённый луч не возникает, а свет отражается полностью.

Верхние и нижние миражи.

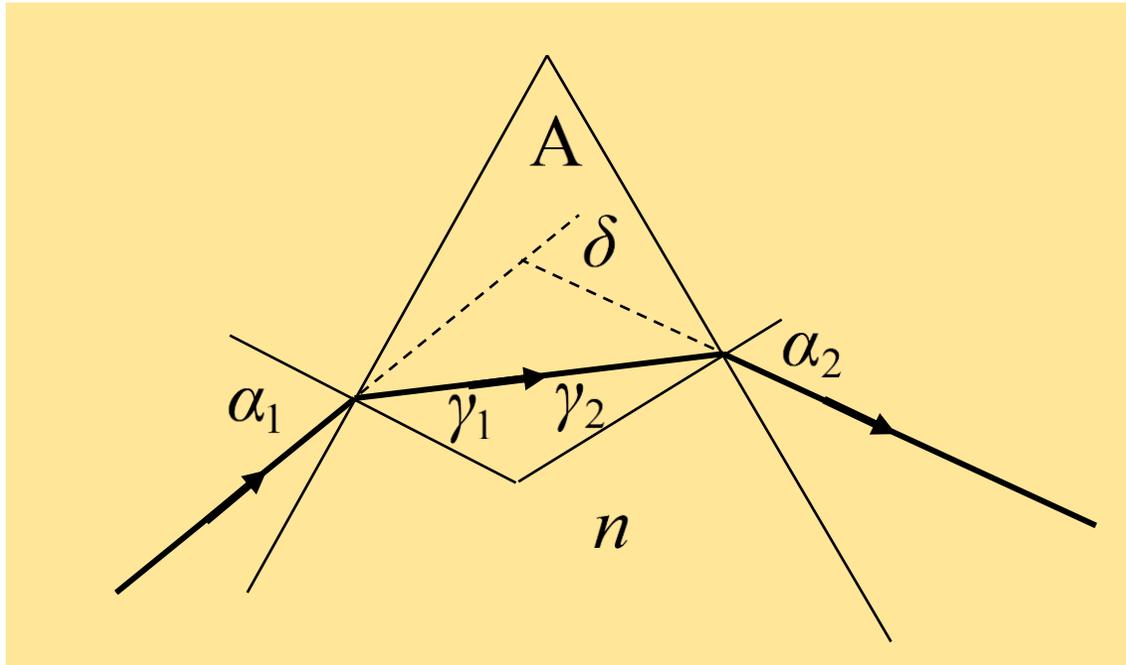


Оптоволокно



$$\sin \alpha_{\text{ПВО}} = \frac{n_2}{n_1}, \quad \alpha_1 < \alpha_{\text{ПВО}}, \quad \alpha_2 > \alpha_{\text{ПВО}}$$

Преломление луча призмой



$$\delta = (\alpha_1 - \gamma_1) + (\alpha_2 - \gamma_2)$$

$$\gamma_1 + \gamma_2 = A$$

$$\delta = \alpha_1 + \alpha_2 - A$$

$$\sin \alpha_1 = n \cdot \sin \gamma_1, \quad n \cdot \sin \gamma_2 = \sin \alpha_2$$

Угол отклонения δ минимален при $\alpha_1 = \alpha_2$ (симметричный ход луча).

При этом

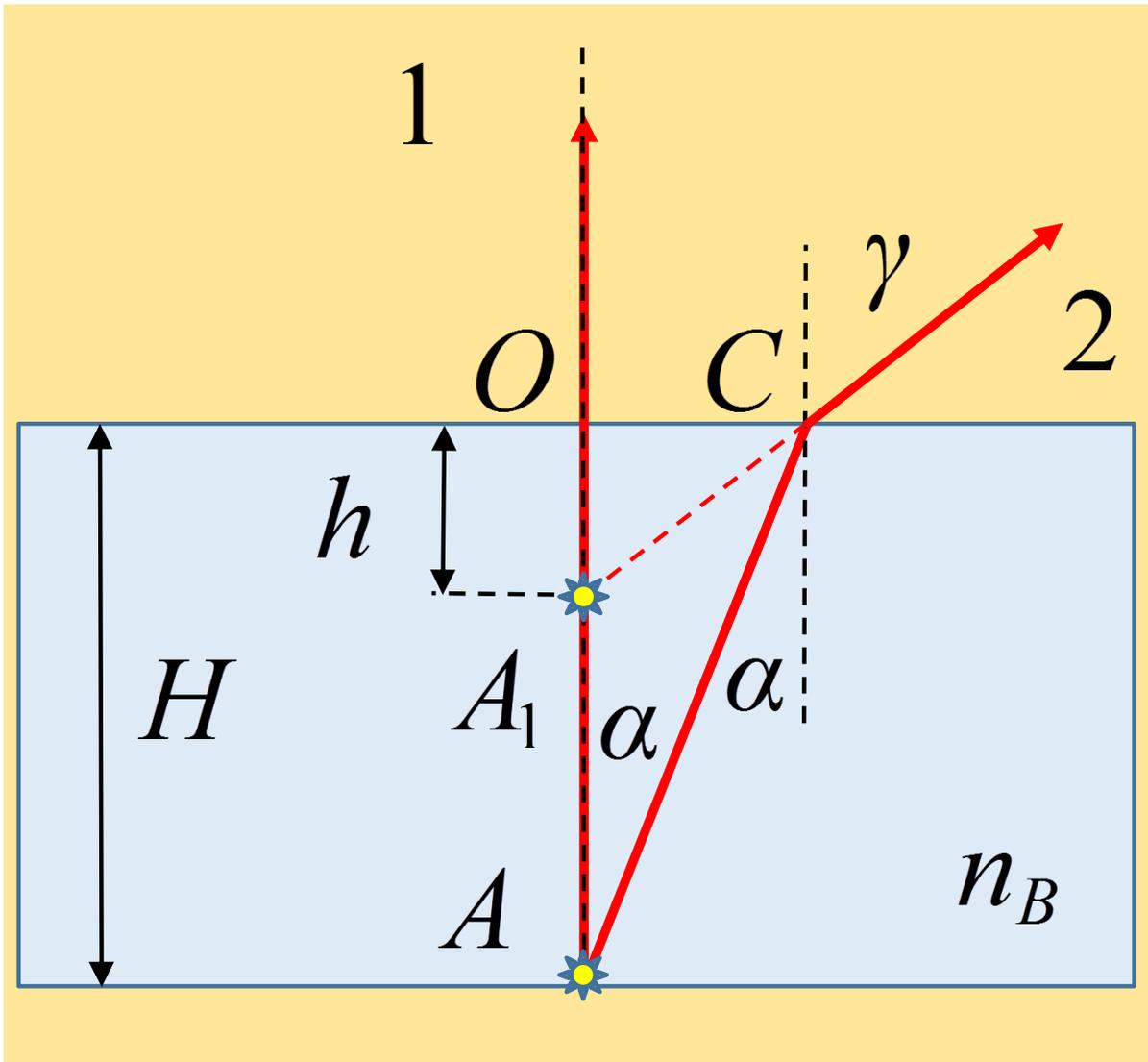
$$\alpha_1 = \alpha_2 = 0,5(A + \delta_{min}), \quad \gamma_1 = \gamma_2 = 0,5A, \quad n = \frac{\sin(0,5(A + \delta_{min}))}{\sin(0,5A)}$$

Для малых углов

$$\alpha_1 \approx n \cdot \gamma_1, \quad n \cdot \gamma_2 \approx \alpha_2, \quad \delta = (\alpha_1 - \gamma_1) + (\alpha_2 - \gamma_2) \approx (n - 1) \cdot (\gamma_1 + \gamma_2) = (n - 1)A$$

$$n_{кр} < n_{ор} < n_{жел} < n_{зел} < n_{гол} < n_{син} < n_{фиол}$$

Глубина водоёма



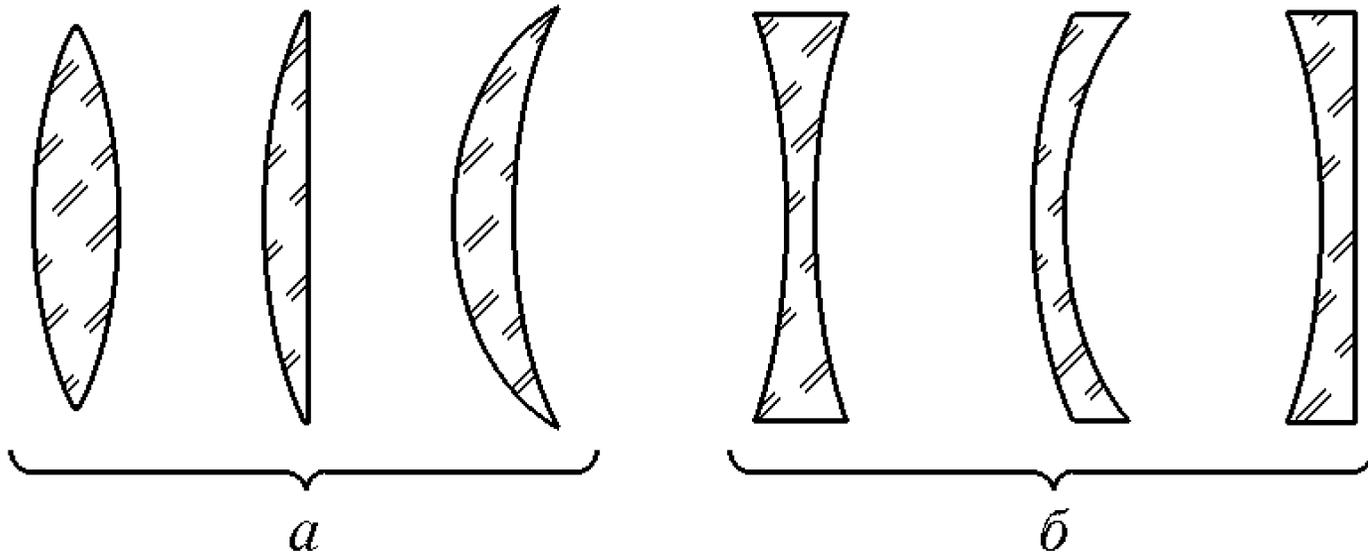
$$\alpha \ll 1, \quad OC \approx H \cdot \alpha,$$

$$n_B \cdot \sin \alpha \approx n_B \cdot \alpha \approx \gamma, \quad OC \approx h \cdot \gamma$$

$$h = H \cdot \frac{\alpha}{\gamma} = \frac{H}{n_B} = \frac{3}{4} H \quad \left(n_B = \frac{4}{3} \right)$$

Тонкие линзы

Линза - прозрачное тело, ограниченное выпуклыми, вогнутыми или плоскими поверхностями, и преобразующее форму светового пучка. Если линза преобразует пучок параллельных лучей в сходящийся, её называют *собирающей* или *положительной*. Если после прохождения линзы пучок параллельных лучей становится расходящимся, линзу называют *рассеивающей* или *отрицательной*.

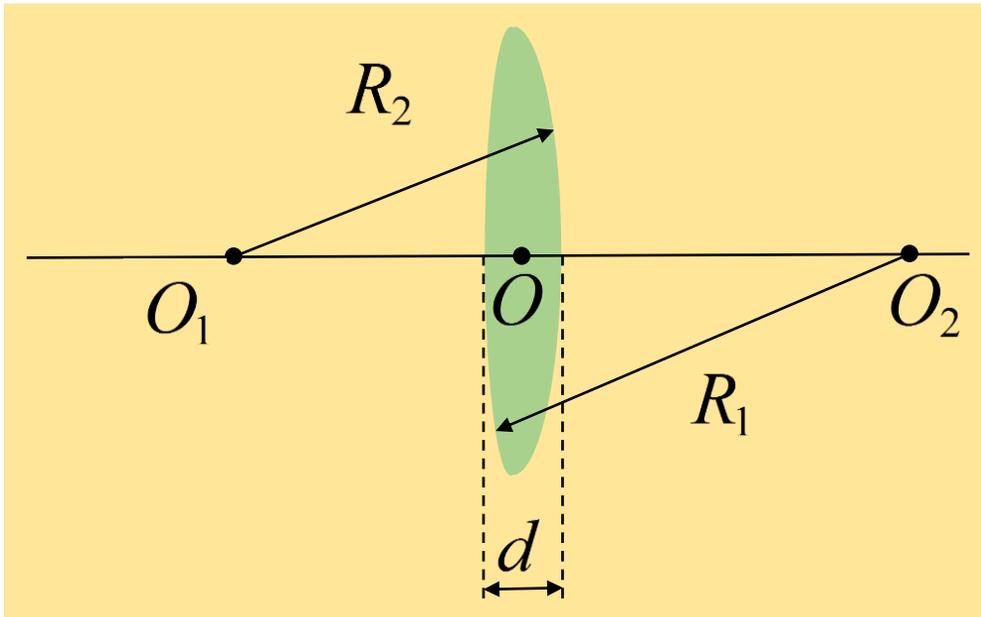


а – собирающие линзы

б – рассеивающие линзы

Принцип Ферма и формула тонкой линзы (на примере двояковыпуклой линзы со сферическими преломляющими поверхностями)

«Сферические» линзы - обе преломляющие поверхности представляют собой части **сфер**.



O_1, O_2 - центры кривизны сферических поверхностей

R_1, R_2 - радиусы кривизны поверхностей

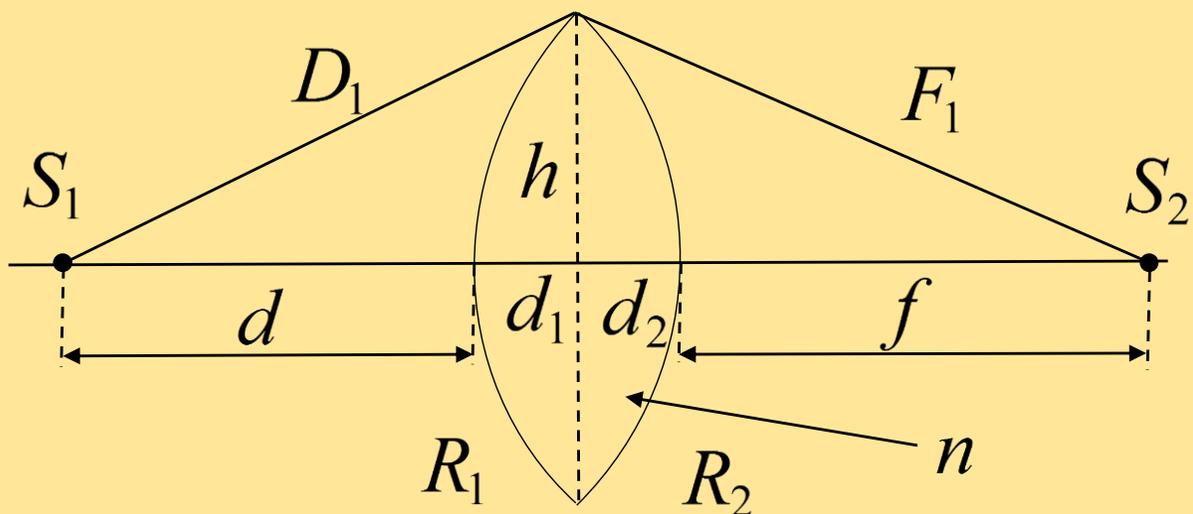
O_1O_2 - главная оптическая ось

O - оптический центр линзы

Линза считается **тонкой**, если

$$d \ll R_1, \quad d \ll R_2$$

Принцип Ферма и формула тонкой линзы



Оптическая длина:

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

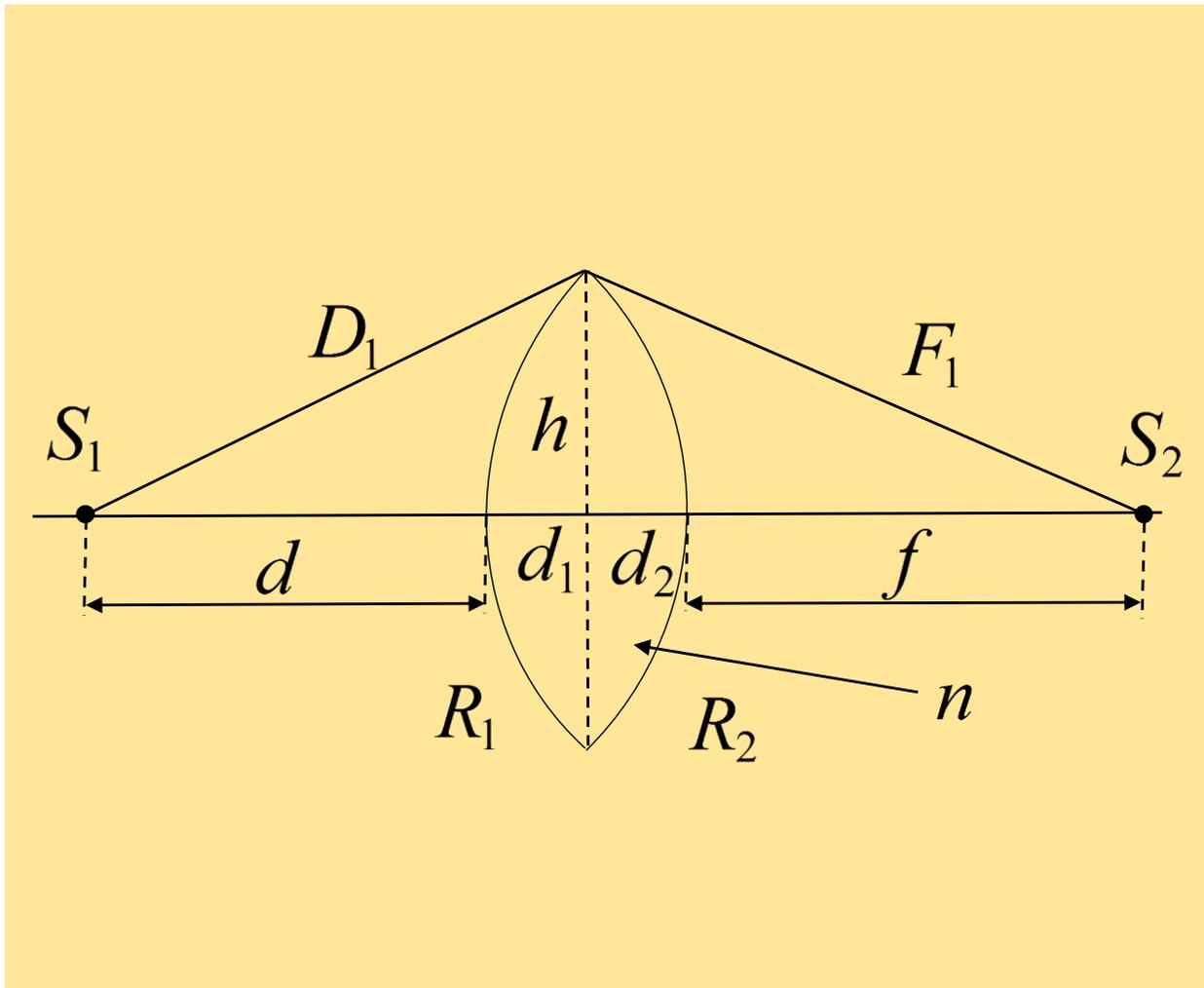
$$l_{opt,1} = D_1 + F_1,$$

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

Таутохронизм:

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

Принцип Ферма и формула тонкой линзы



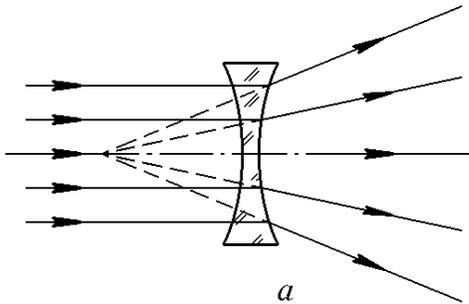
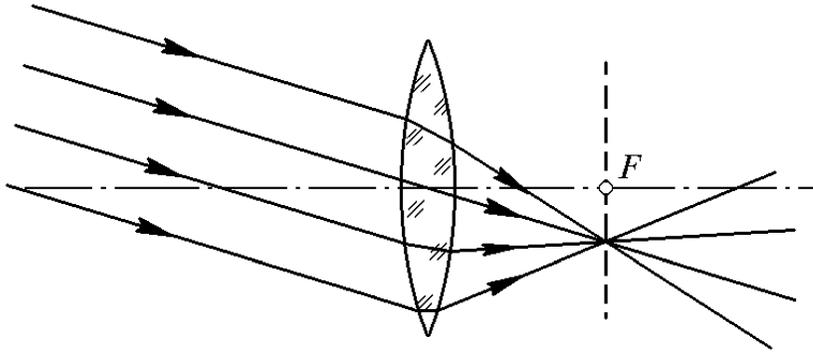
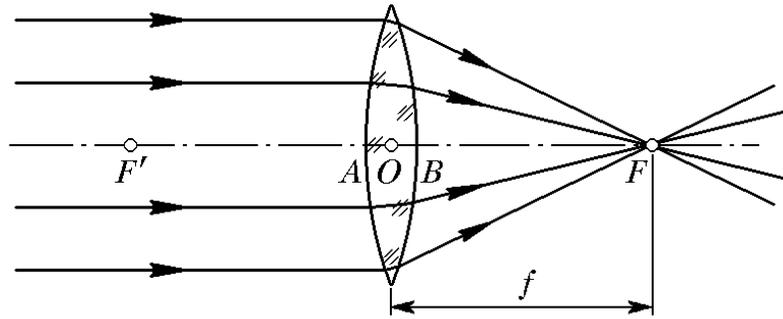
$$d_1 \approx \frac{h^2}{2R_1}, \quad d_2 \approx \frac{h^2}{2R_2}$$

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

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

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

Фокусное расстояние и оптическая сила тонкой линзы



Фокус линзы,

фокальная плоскость линзы

$$d \rightarrow \infty, \quad f \rightarrow F$$

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

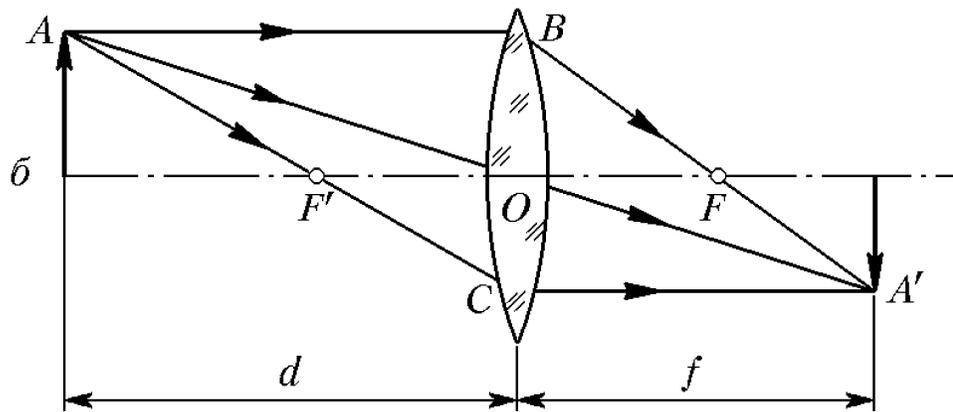
$$R_1 > 0, \quad R_2 > 0, \quad D > 0$$

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

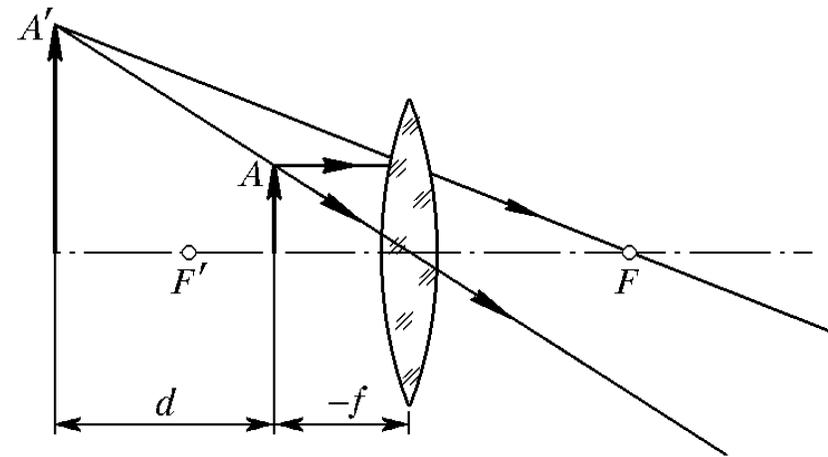
$$R_1 < 0, \quad R_2 < 0, \quad D < 0$$

$$[D] = 1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}, \quad D_{\Sigma} = D_1 + D_2 + \dots$$

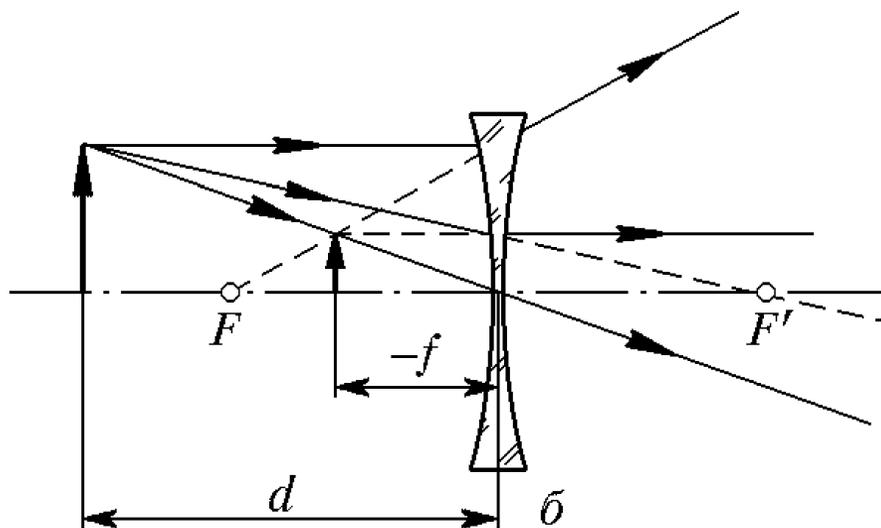
Построение изображений в тонких линзах



Фотоаппарат, проектор, глаз



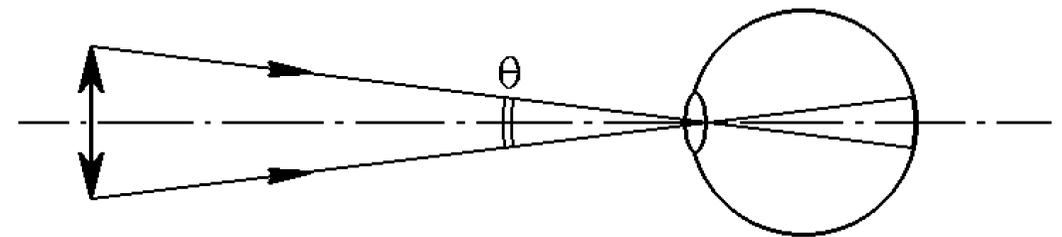
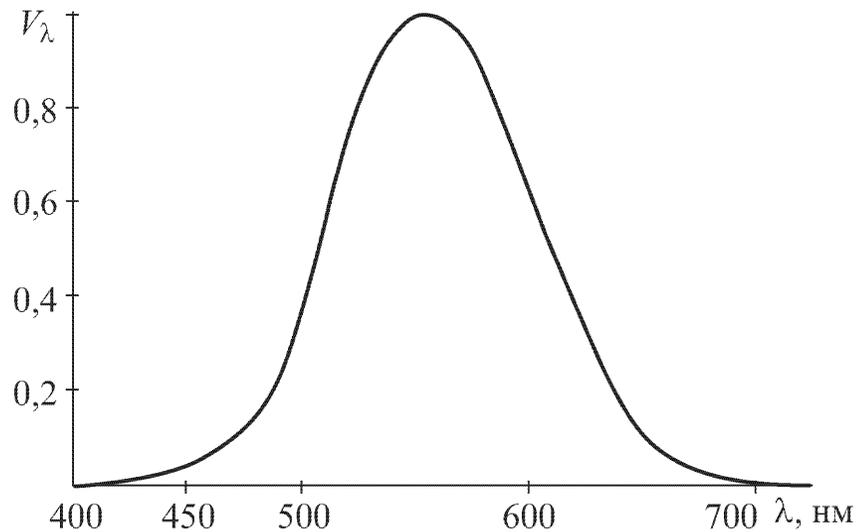
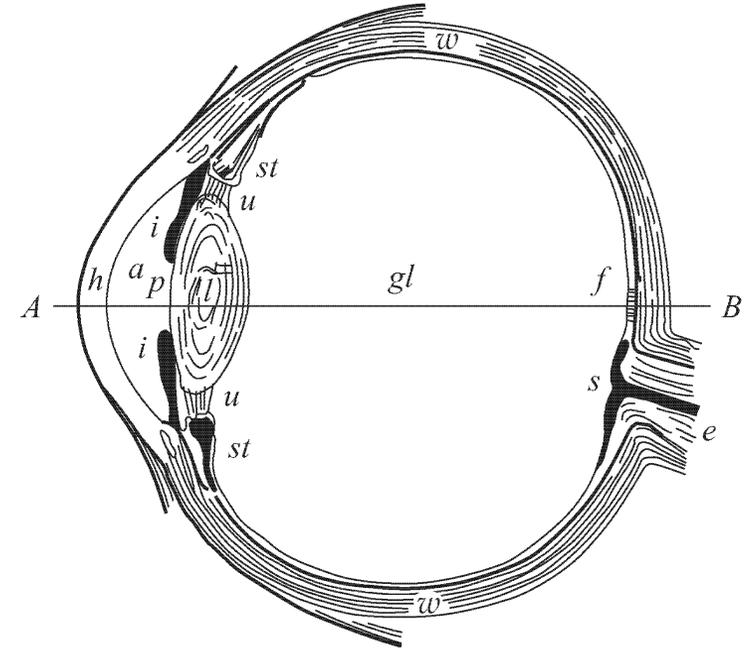
Увеличительное стекло (лупа)



Свойства изображения:
Действительное – мнимое
Прямое - перевернутое
Увеличенное - уменьшенное

Глаз

- Хрусталик
- Аккомодация
- Расстояние наилучшего зрения $d_0 = 25 \text{ см}$
- Близорукость и дальнозоркость



Угол зрения

Линейное и угловое увеличение

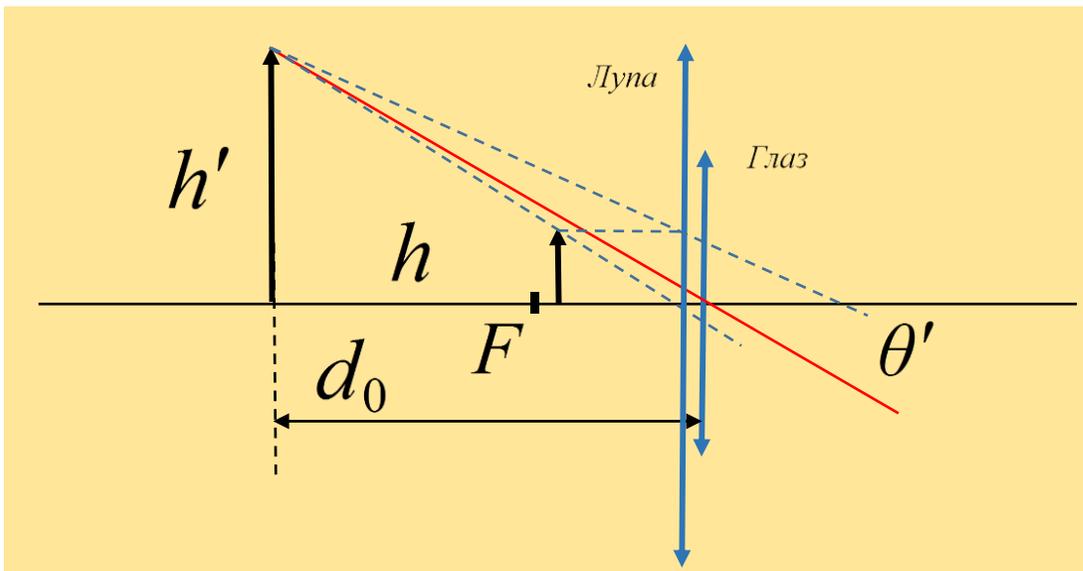
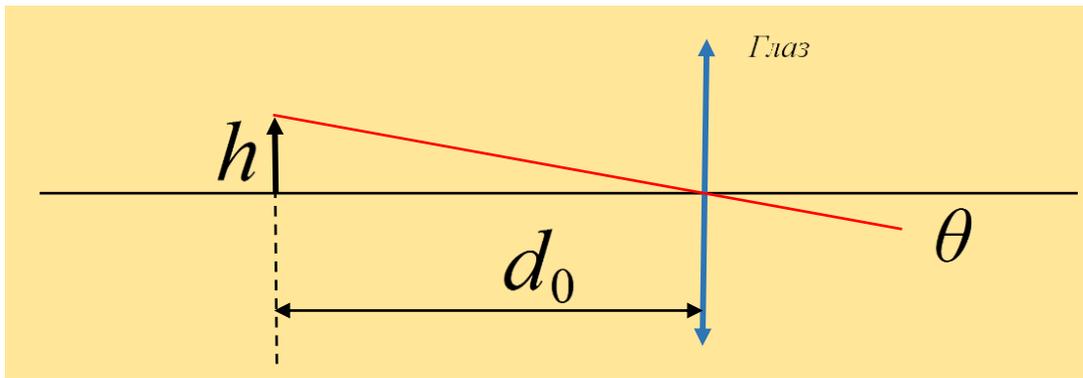
- **Линейное поперечное увеличение Γ линзы** – отношение поперечного размера изображения h' и предмета h

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

- **Угловое увеличение γ оптического прибора** – отношение угла зрения θ' при наблюдении предмета через оптический прибор к углу зрения θ при наблюдении предмета с расстояния наилучшего зрения

$$\gamma = \frac{\theta'}{\theta}$$

Увеличение лупы



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

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

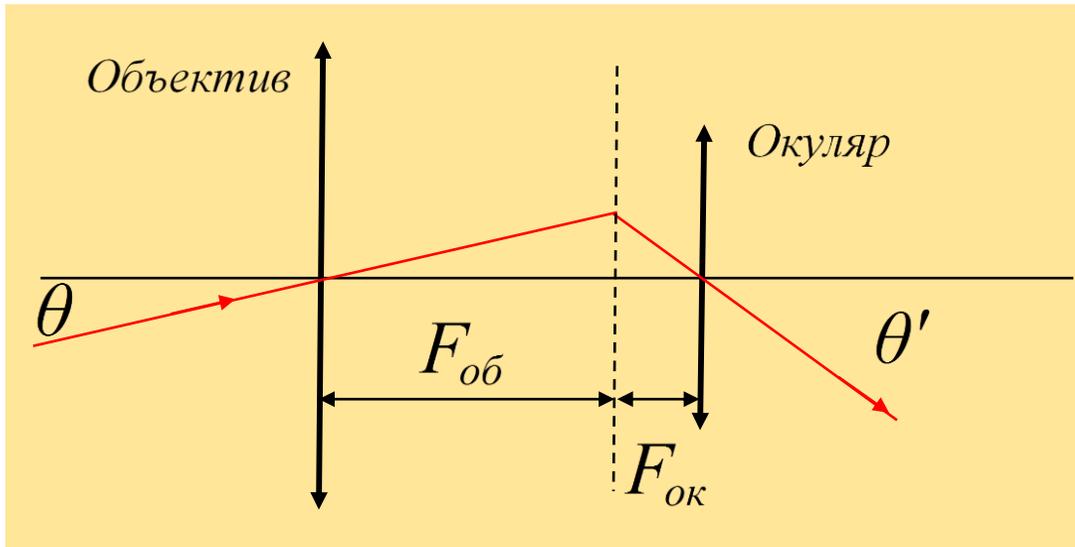
$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{1}{F}, \quad \frac{h'}{h} = \frac{f}{d}, \quad d \approx F, \quad f \approx d_0$$

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

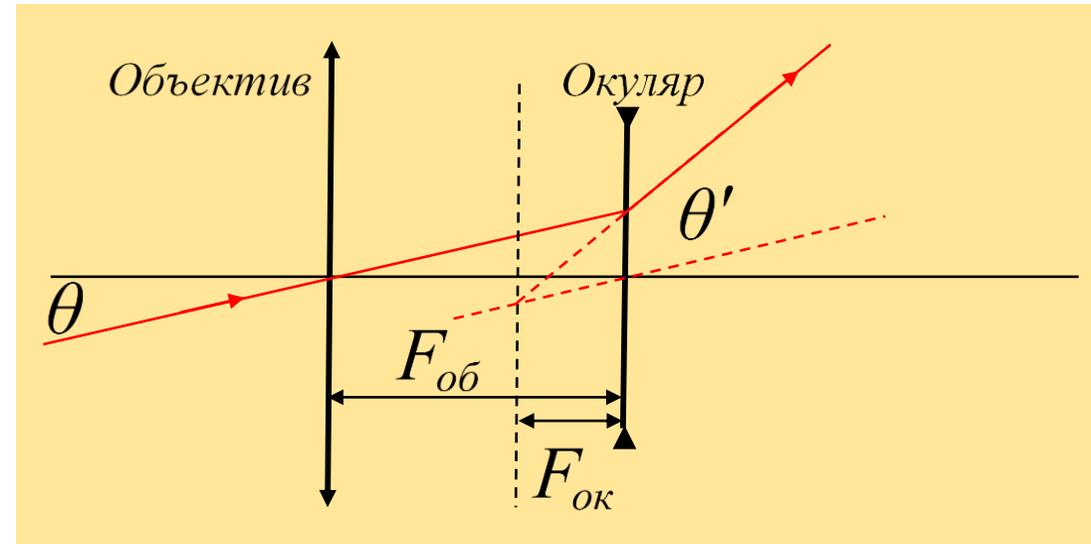
$$d_0 = 25 \text{ см}$$

Линза с фокусным расстоянием 5 см даёт увеличение 5х

Зрительные трубы



Зрительная труба
Кеплера

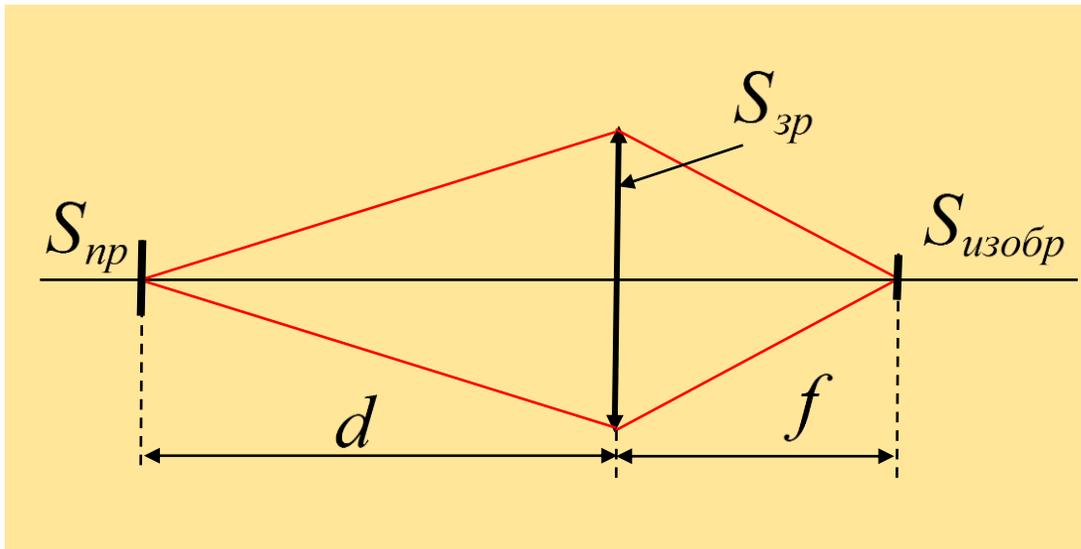


Зрительная труба
Галилея

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

Яркость изображения точечных и протяжённых ИСТОЧНИКОВ

$$\Phi = B_{np} \cdot S_{np} \cdot \Omega, \quad \Omega \approx \frac{S_{зр}}{d^2}, \quad S_{изобр} = S_{np} \cdot \frac{f^2}{d^2}$$



$$E_{изобр} = \frac{\Phi}{S_{изобр}} = \frac{B_{np} \cdot S_{np} \cdot \frac{S_{зр}}{d^2}}{S_{np} \cdot \frac{f^2}{d^2}} = \frac{B_{np} \cdot S_{зр}}{f^2},$$

$$B_{изобр} = \frac{\Phi}{S_{изобр} \Omega'}, \quad \Omega' = \frac{S_{зр}}{f^2}$$

$$B_{изобр} = B_{np}$$

Оптический прибор не увеличивает яркость изображения.

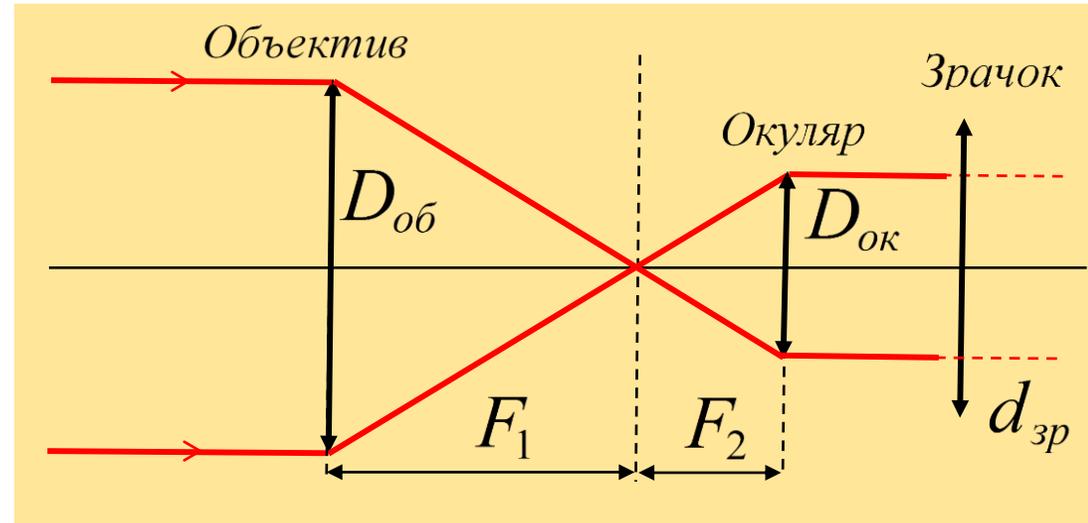
Яркость изображения точечных и протяжённых ИСТОЧНИКОВ.

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

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

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

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



Яркость изображения точечных и протяжённых ИСТОЧНИКОВ.

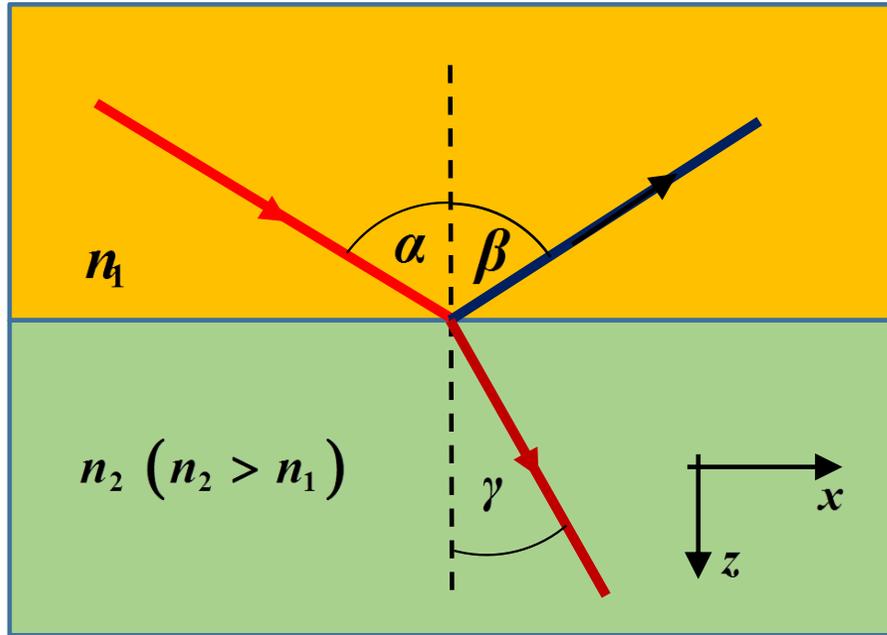
Размер изображения точечного источника света (удалённой звезды) на сетчатке глаза практически не изменяется при «вооружении» глаза телескопом.

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

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

Возможна ситуация, когда освещённость изображения звезды станет больше освещённости участка неба.

Отражение света. Формулы Френеля.



$$E_{1,t} = E_{2,t}, \quad H_{1,t} = H_{2,t}$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}, \quad \vec{H} = \vec{H}_0 \cdot e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}$$

$$E_{1,t} = E_{0,t} \cdot e^{i(k_x x + k_y y - \omega t)} + E'_{0,t} \cdot e^{i(k'_x x + k'_y y - \omega' t)} =$$

$$= E_{2,t} = E''_{0,t} \cdot e^{i(k''_x x + k''_y y - \omega'' t)}$$

$$\omega = \omega' = \omega''$$

$$k_x = k'_x = k''_x, \quad k_y = k'_y = k''_y = 0$$

$$k = k' = \frac{\omega}{c} n_1, \quad k'' = \frac{\omega}{c} n_2, \quad k_x = k \sin \alpha = k'_x = k' \sin \beta = k''_x = k'' \sin \gamma$$

$$\alpha = \beta, \quad n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \sin \gamma$$

Связь между компонентами \vec{E} и \vec{H}
в плоской волне

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad \text{rot}\vec{H} = \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad \varepsilon = n^2, \quad \mu = 1$$

1) *s*-поляризация (\vec{E} перпендикулярно плоскости падения)

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}, \quad \vec{E}_0 = (\mathbf{0}, E_{0,y}, \mathbf{0}),$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cdot e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}, \quad \vec{H}_0 = (H_{0,x}, \mathbf{0}, H_{0,z})$$

$$\left(\text{rot}\vec{E}\right)_x = \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -ik_z E_y, \quad -\frac{1}{c} \frac{\partial H_x}{\partial t} = i \frac{\omega}{c} H_x$$

$$H_x = \frac{k_z}{(\omega / c)} E_y$$

Связь между компонентами \vec{E} и \vec{H}
в плоской волне

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad \operatorname{rot}\vec{H} = \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad \varepsilon = n^2, \quad \mu = 1$$

2) *p*-поляризация (\vec{E} в плоскости падения)

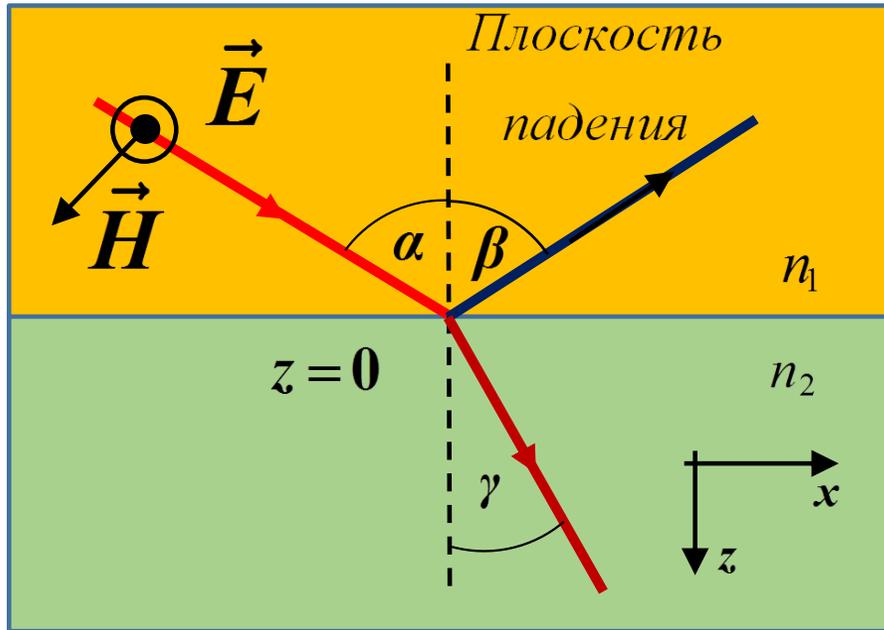
$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}, \quad \vec{E}_0 = (E_{0,x}, \mathbf{0}, E_{0,z}),$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cdot e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}, \quad \vec{H}_0 = (\mathbf{0}, H_{0,y}, \mathbf{0})$$

$$\left(\operatorname{rot}\vec{H}\right)_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = -ik_z H_y, \quad -\frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial E_x}{\partial t} = i\varepsilon \frac{\omega}{c} E_x$$

$$E_x = \frac{k_z}{\varepsilon(\omega/c)} H_y$$

Отражение s-поляризованной волны



$$E_{1,t} = E_{1,y} = E_0 + E_0' = E_{2,t} = E_0''$$

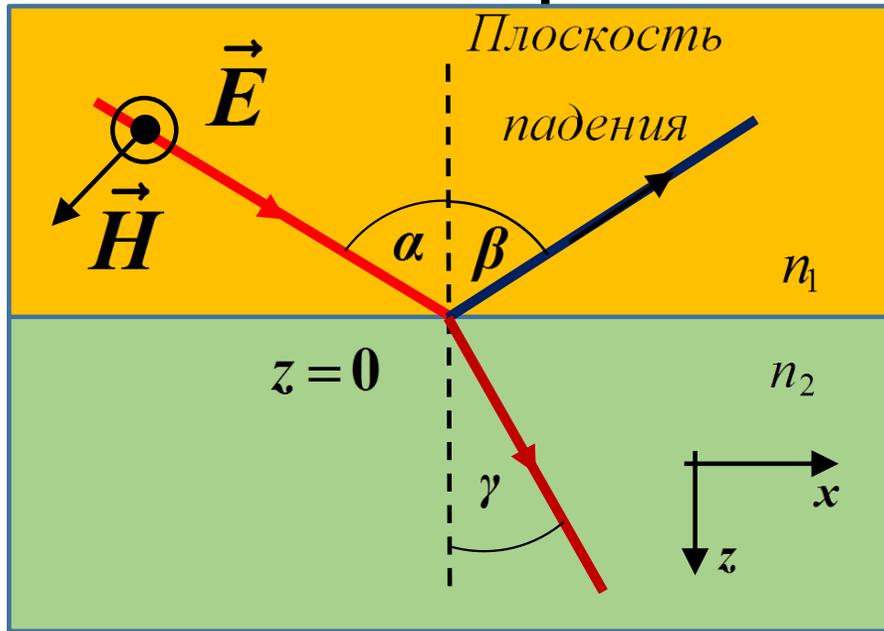
$$H_x = \frac{k_z}{(\omega / c)} E_y$$

$$H_{1,t} = H_{1,x} = \frac{k_z}{(\omega / c)} E_0 + \frac{k_z'}{(\omega / c)} E_0' = H_{2,t} = H_{2,x} = \frac{k_z''}{(\omega / c)} E_0''$$

$$E_0 + E_0' = E_0''$$

$$k_z E_0 + k_z' E_0' = k_z'' E_0''$$

Отражение s-поляризованной волны



$$E_0 + E'_0 = E''_0$$

$$k_z E_0 + k'_z E'_0 = k''_z E''_0$$

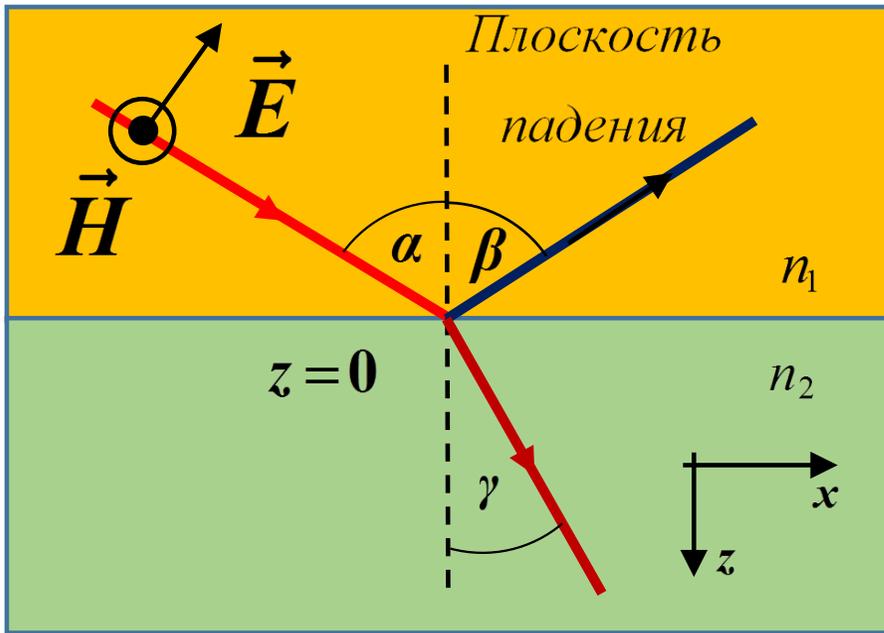
$$r = \frac{E'_0}{E_0}, \quad t = \frac{E''_0}{E_0}$$

$$r_{\perp} = \frac{k_z - k''_z}{k''_z - k'_z}, \quad t_{\perp} = \frac{k_z - k'_z}{k''_z - k'_z}$$

$$k_z = \frac{\omega}{c} n_1 \sin \alpha, \quad k'_z = -\frac{\omega}{c} n_1 \sin \alpha, \quad k''_z = \frac{\omega}{c} n_2 \sin \gamma$$

$$r_{\perp} = \frac{n_1 \cos \alpha - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha}}{n_1 \cos \alpha + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha}}, \quad t_{\perp} = \frac{2n_1 \cos \alpha}{n_1 \cos \alpha + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha}}$$

Отражение p -поляризованной волны



$$H_{1,t} = H_{1,y} = H_0 + H'_0 = H_{2,t} = H''_0$$

$$E_x = \frac{k_z}{\varepsilon(\omega/c)} H_y$$

$$\varepsilon(\omega/c) E_0 = k H_0, \quad k^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \varepsilon, \quad H_0 = n E_0, \quad \mu = 1$$

$$E_{1,t} = E_{1,x} = \frac{k_z}{\varepsilon_1(\omega/c)} H_0 + \frac{k'_z}{\varepsilon_1(\omega/c)} H'_0 = E_{2,t} = E_{2,x} = \frac{k''_z}{\varepsilon_2(\omega/c)} H''_0$$

$$n_1 E_0 + n_1 E'_0 = n_2 E''_0$$

$$\frac{k_z}{n_1} E_0 + \frac{k'_z}{n_1} E'_0 = \frac{k''_z}{n_1} E''_0$$

Отражение p -поляризованной волны

$$n_1 E_0 + n_1 E'_0 = n_2 E''_0$$

$$\frac{k_z}{n_1} E_0 + \frac{k'_z}{n_1} E'_0 = \frac{k''_z}{n_1} E''_0$$

$$r_{\parallel} = \frac{E'_0}{E_0}, \quad t_{\parallel} = \frac{E''_0}{E_0}$$

$$r_{\parallel} = \frac{n_1^2 k''_z - n_2^2 k_z}{n_2^2 k'_z - n_1^2 k''_z}, \quad t_{\parallel} = \frac{n_1 n_2 (k'_z - k_z)}{n_2^2 k'_z - n_1^2 k''_z}$$

$$k_z = \frac{\omega}{c} n_1 \sin \alpha, \quad k'_z = -\frac{\omega}{c} n_1 \sin \alpha, \quad k''_z = \frac{\omega}{c} n_2 \sin \gamma$$

$$r_{\parallel} = -\frac{n_2^2 \cos \alpha - n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha}}{n_2^2 \cos \alpha + n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha}}, \quad t_{\parallel} = \frac{2n_2 \cos \alpha}{n_2^2 \cos \alpha + n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha}}$$

Энергетические коэффициенты отражения

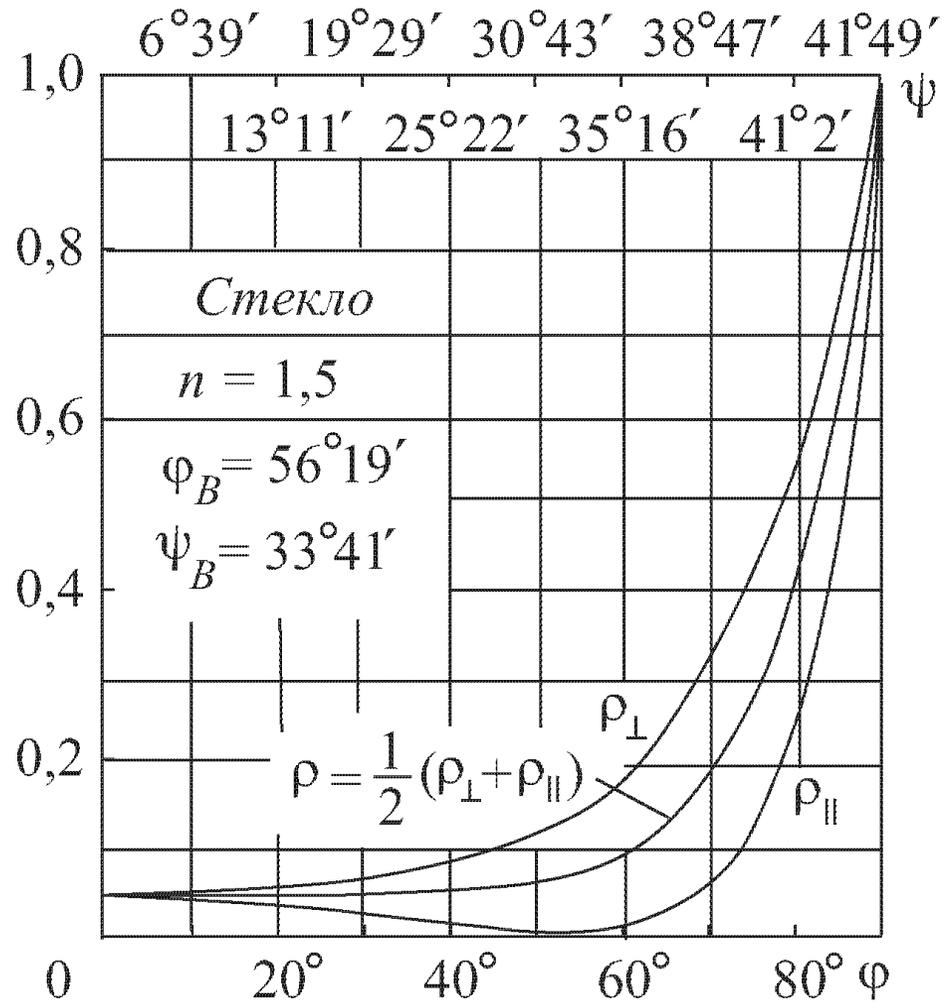
$$\vec{S} = \frac{c}{4\pi} [\vec{E}, \vec{H}], \quad I_z = \overline{S_z} = \frac{c}{4\pi} n E_0^2 \cdot \cos \theta$$

$$R = \frac{I_{omp,z}}{I_{nad,z}}, \quad T = \frac{I_{np,z}}{I_{nad,z}}$$

$$I_{nad,z} = I_{omp,z} + I_{np,z}, \quad R + T = 1$$

$$R = r^2, \quad T = \frac{n_2 \cos \gamma}{n_1 \cos \alpha} t^2$$

Зависимость коэффициентов отражения от угла падения



Нормальное падение ($\alpha = 0$)

$$r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad t = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}$$

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2, \quad D = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}$$

Воздух-стекло $n_1 = 1, n_2 = 1,5 \quad R = 4\%$

Воздух-вода $n_1 = 1, n_2 = 4 / 3 \quad R = 2\%$

Угол Брюстера $R_{\parallel} = 0, \quad \operatorname{tg} \alpha_{Br} = \frac{n_2}{n_1}$



Давление света

Импульс релятивистской частицы

$$\vec{p} = \frac{Wv}{c^2}, \quad W = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad \vec{p} = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

При $v = c, \quad p = \frac{W}{c}$

Плотность импульса и плотность энергии
Для электромагнитной волны

$$S = wc, \quad g = \frac{S}{c^2}, \quad \vec{g} = \frac{1}{4\pi c} [\vec{E}, \vec{H}]$$

Давление света

Давление излучения при нормальном падении и полном поглощении излучения веществом

$$P = c\bar{g} = \bar{w} = \frac{\overline{E^2}}{4\pi} = \frac{I}{c}$$

При наличии отражения

$$P = (1 + R)\frac{I}{c}, \quad R = \frac{I_{отр}}{I}$$

Интенсивность солнечного света на поверхности Земли

$$I = 1,4 \text{ кВт} / \text{м}^2$$

Давление солнечного света при полном отражении

$$P = 9,4 \cdot 10^{-6} \text{ Н} / \text{м}^2 = 9,4 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$$