

Оптика

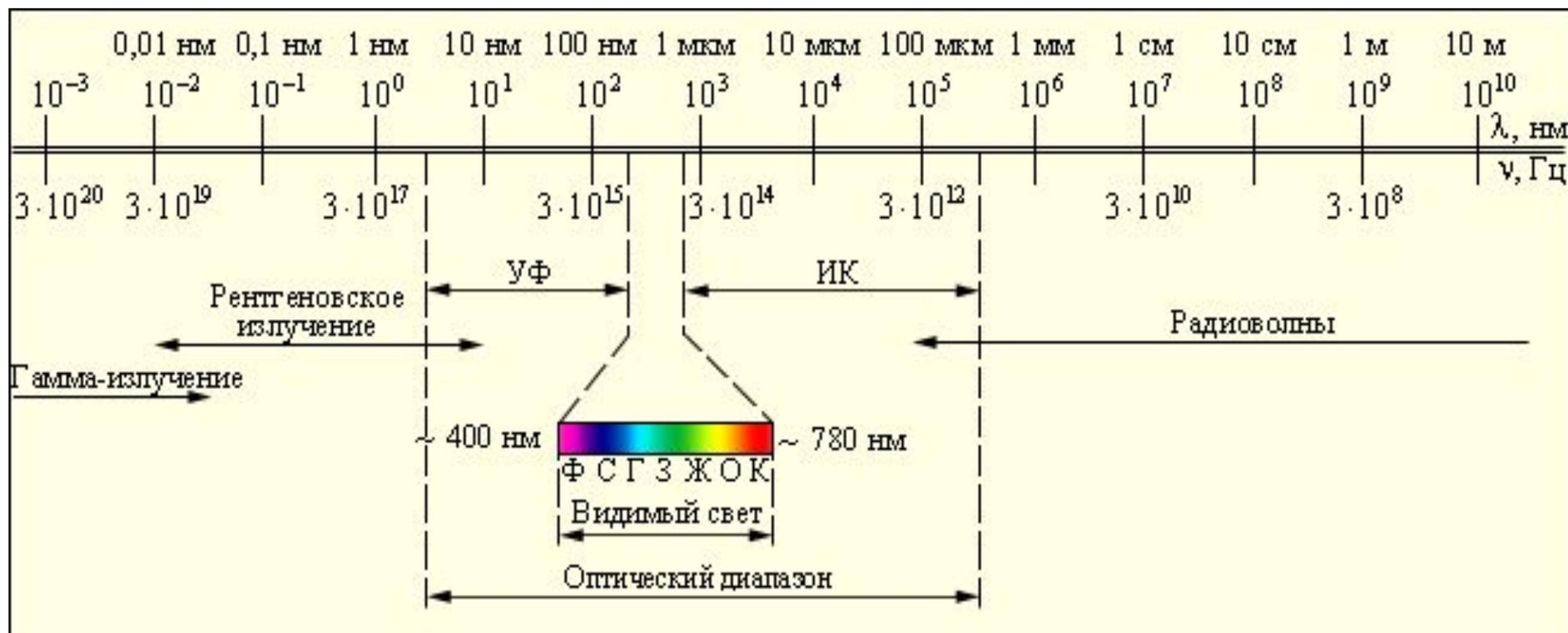
Лекция 1

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)).

	радиоволны	оптика	рентген	гамма
λ	Км - мм	2 мм – 10 нм	10^{-10} - 10^{-2} нм	< 0.01 нм
ν (Гц)	$< 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{11}$ – $3 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{16}$ – $3 \cdot 10^{19}$	$> 3 \cdot 10^{19}$
$\varepsilon = h\nu$		10^{-3} – 100 эВ	20 эВ – 0,1 МэВ	$> 0,1$ МэВ

Спектр электромагнитного излучения



- Инфракрасное излучение: 2 мм – 760 нм
- Видимый свет: 400 – 760 нм
- Ультрафиолет: 400 – 10 нм
- Энергия кванта видимого света $\varepsilon = hc/\lambda$
 $\varepsilon(\text{эВ}) = 1.23/\lambda(\text{мкм}) = 1.6 - 3 \text{ эВ}$

Электромагнитные волны

- Волновое уравнение:
$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = u^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$$
- Решение волнового уравнения $\xi = a \cos \omega(t - \tau) = a \cos \omega \left(t - \frac{x}{u} \right)$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\mu}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \qquad \operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

- Из уравнений Максвелла:
 $\mathbf{E} = E_x(z); \mathbf{H} = H_y(z)$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{\mu}{c} \frac{\partial H}{\partial t}$$

- $\frac{\partial H}{\partial z} = -\frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial E}{\partial t}$ Исключаем H: умножаем на $-\frac{\mu}{c}$
 дифференцируем по t

Волновое уравнение

- Волновое уравнение:
$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

- Решение волнового уравнения:

$$v = c / \sqrt{\varepsilon\mu}$$

$$E = E_0 \cos(\omega t - kz)$$

$$H = H_0 \cos(\omega t - kz)$$

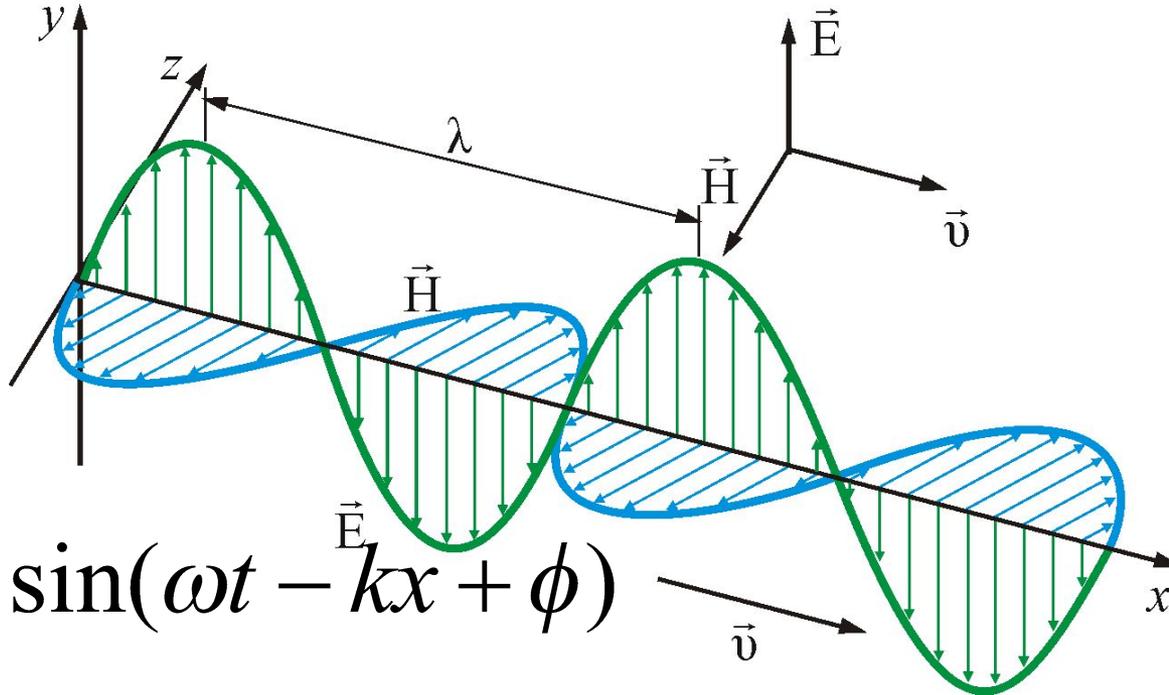
- Для трех координат

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

Решением дифференциальных уравнений является гармоническая функция:

• $E = E_m \cdot \sin\omega(t-x/v) = E_m \cdot \sin(\omega t - kx)$

$H = H_m \cdot \sin\omega(t-x/v)$



$$E = E_0 \sin(\omega t - kx + \phi)$$

$$k = \frac{\omega}{v}$$

— волновое число,

ω — круговая частота,

ϕ — начальная фаза колебаний в точках с координатой

$x = 0$, v — фазовая скорость.

векторы \vec{E} \vec{H} \vec{U} взаимно перпендикулярны, т. к.
 \vec{k} и \vec{U} направлены одинаково;

электромагнитная волна является поперечной;

Электрическая и магнитная составляющие распространяются в одном направлении;

векторы \vec{E} \vec{H} колеблются в одинаковых фазах.

и их величины связаны соотношением.

$$\sqrt{\epsilon_a} \cdot E = \sqrt{\mu_a} \cdot H \quad (\sqrt{\epsilon} \sqrt{\epsilon_0} \cdot E = \sqrt{\mu} \sqrt{\mu_0} \cdot H)$$

Фазовая скорость ЭМ волны определяется выражением

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

где $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ — скорость света в вакууме;

$$\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$$

$$\mu_0 = 1,256637061 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$$

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$$

В веществе скорость распространения электромагнитных возмущений меньше в $n = \sqrt{\epsilon \mu}$ раз.

Сферическая волна

Волновая поверхность имеет форму сферы.

На расстоянии r амплитуда во всех точках A .

Уравнение сферической волны $s = A \sin [\omega t - \kappa (r - R) + \alpha]$,

Уравнение незатухающей
сферической волны

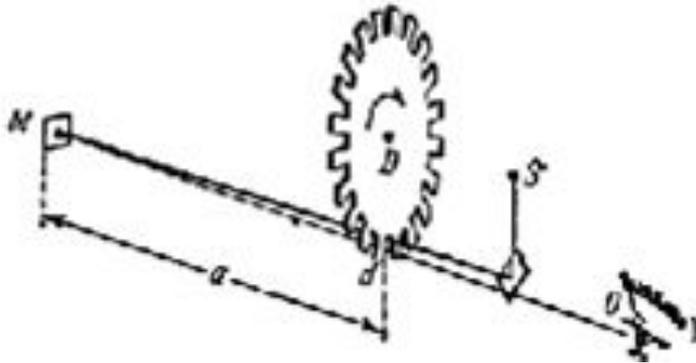
$$s = \frac{a_0}{r} \sin [\omega t - \kappa (r - R) + \alpha]$$

a_0 амплитуда волны на расстоянии 1 м от источника

$\kappa = 2\pi/\lambda$ волновой вектор

$$k = \omega/v = 2\pi/T \cdot v$$

Опыт Физо (1849)



$t = 1/mn$ m число зубцов, n – число оборотов в секунду

$c = \frac{2a}{t} = 4 mn \cdot a$ a расстояние между зеркалом и диском

$$c = 313\,300 \text{ км/сек}$$

Шкала ЭМ волн

В оптике условно рассматривается три области:

Длина волны (λ) $<$ размеров приборов;

геометрическая оптика.

λ сравнима с размеров приборов;

волновая оптика.

$\lambda <$ размеров приборов;

квантовая оптика.

Геометрическая оптика

1. Закон прямолинейного распространения света
2. Закон независимости световых пучков
3. Закон отражения
4. Закон преломления

Основные законы геометрической оптики

Закон прямолинейного распространения света

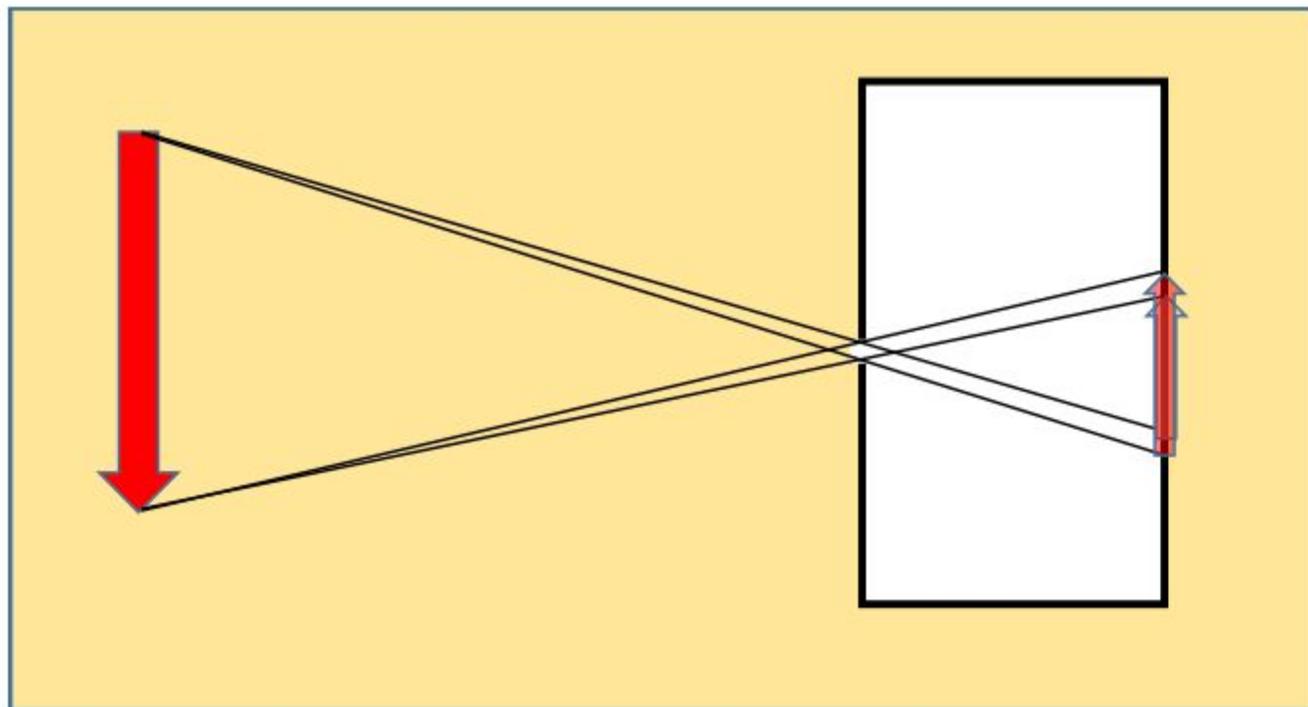
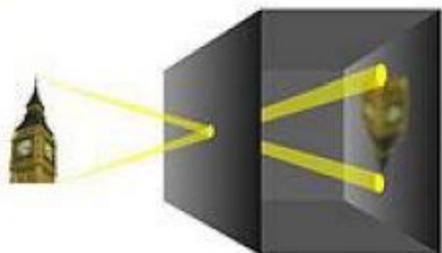
В прозрачной однородной среде свет распространяется по прямым линиям.

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.

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.

Законы отражения и преломления

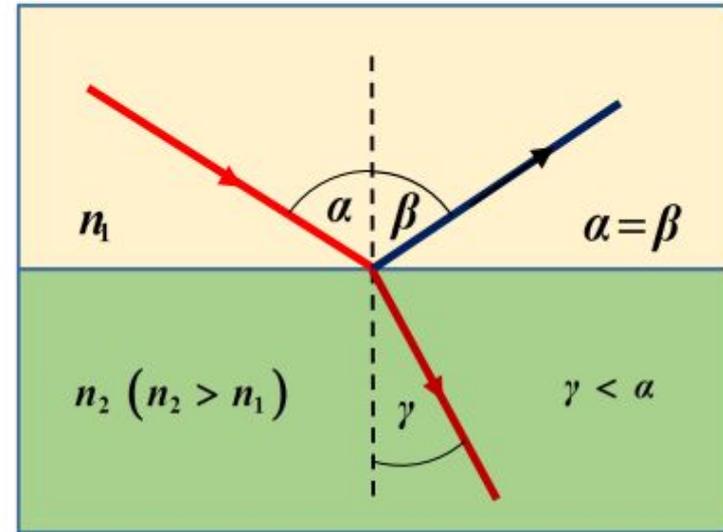
- При падении на границу двух сред свет частично отражается, а частично проникает во вторую среду (преломляется)
- Падающий и отражённый лучи лежат в одной плоскости с нормалью к границе раздела в точке падения (эта плоскость называется плоскостью падения), и угол падения равен углу отражения.

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:

$$\alpha = \beta$$



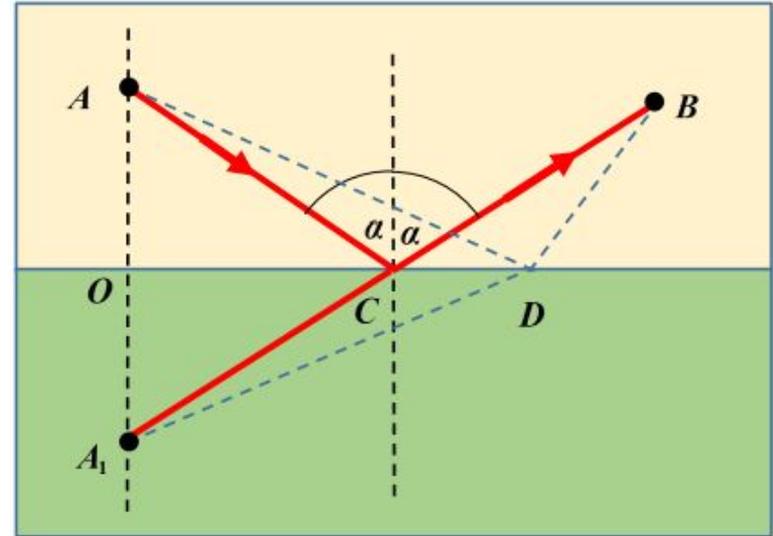
Принцип Ферма – принцип наименьшего времени

- Свет при распространении из одной точки в другую выбирает путь, которому соответствует наименьшее время распространения.
- Свет выбирает самый короткий *оптический путь*:
$$s = \int n d\ell$$
- *Свет выбирает один путь из множества близлежащих, требующих почти одинакового времени для прохождения: любое малое изменение этого пути не приводит в первом порядке к изменению времени прохождения.*

принцип Ферма́

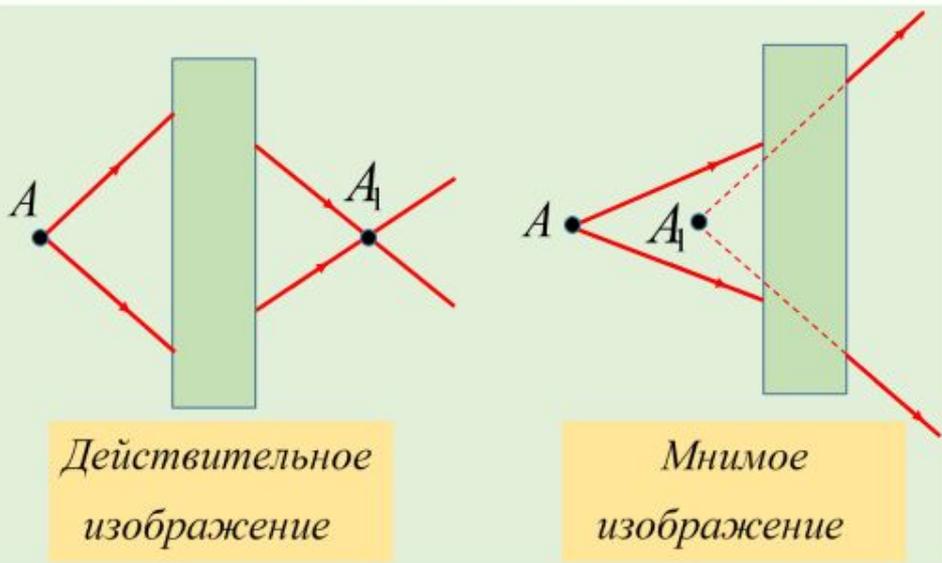
Свет при распространении из одной точки в другую «выбирает» путь, которому соответствует **наименьшее** время распространения.

$$AC + CB < AD + DB$$



При зеркальном отражении путь ACB - кратчайший

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 .

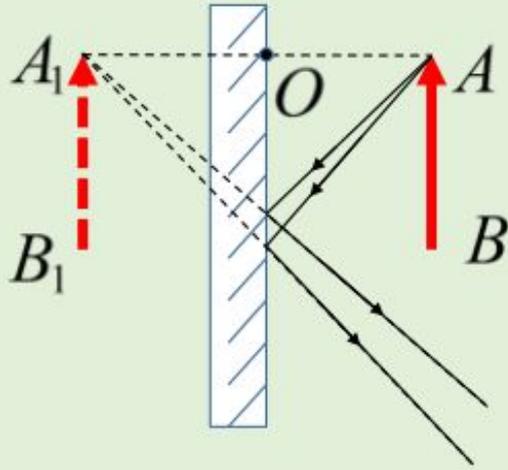
Изображение A_1 называют **действительным**, если световые лучи **действительно пересекаются** в точке A_1 .

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.

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



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).

•Закон Снеллиуса (закон преломления)

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

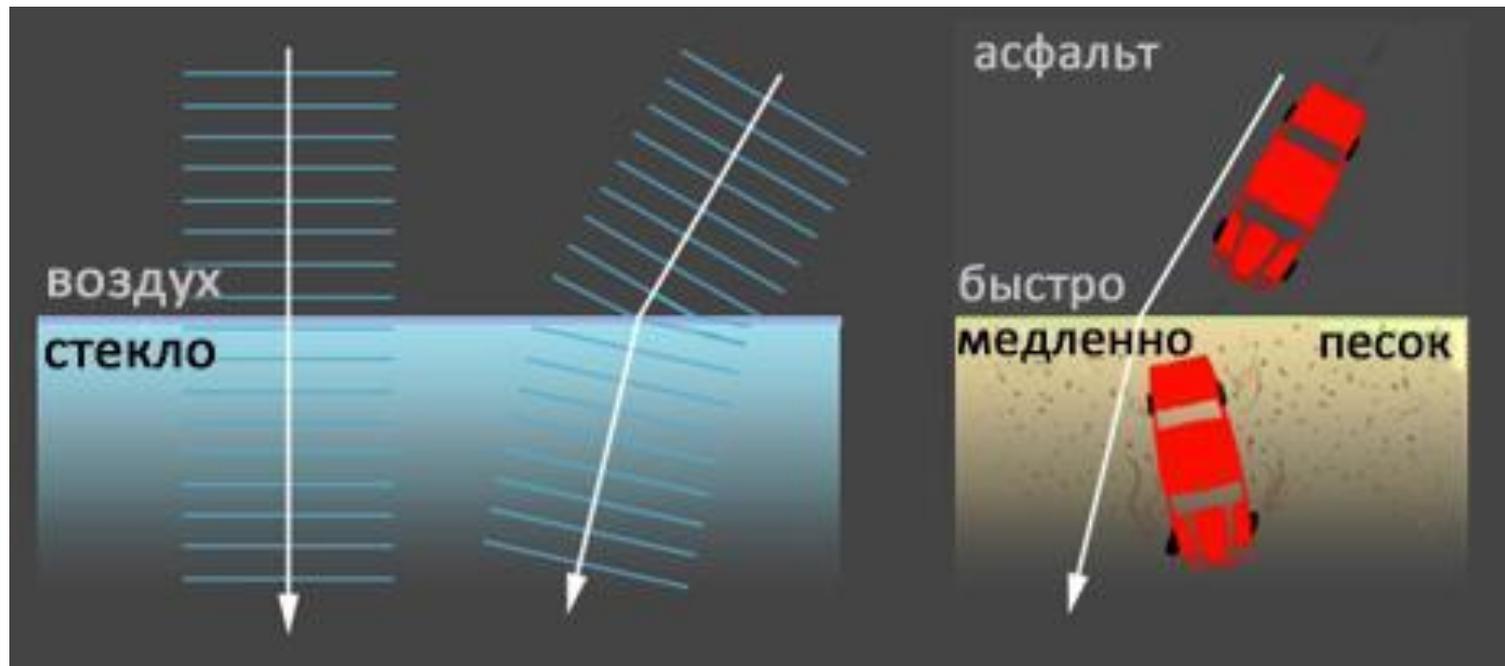


Иллюстрация преломления света

Показатель преломления

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

- *Преломлённый луч лежит в плоскости падения, причём синус угла падения к синусу угла преломления не зависит от угла падения, т.е.* $\sin\alpha/\sin\beta = n_{21}$
- n_{21} – относительный показатель преломления второй среды относительно первой.
- **Показатель преломления относительно вакуума называется абсолютным показателем преломления n .**
- Относительный показатель преломления выражается через абсолютные по формуле $n_{21} = n_2/n_1$

Скорость распространения электромагнитных волн в среде зависит от ее электрической и магнитной проницаемостей.

Величину $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ называют **абсолютным показателем преломления**. С учетом последнего имеем:

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

Следовательно, **показатель преломления** есть **физическая величина, равная отношению скорости электромагнитных волн в вакууме к их скорости в среде**.

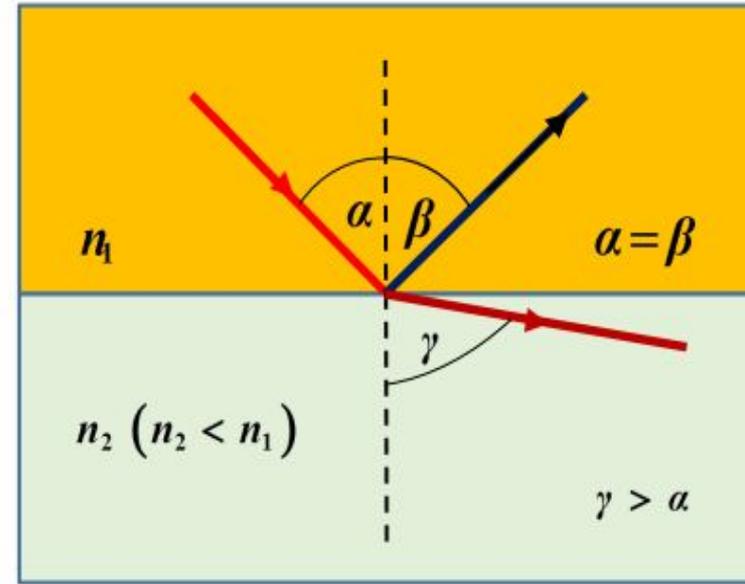
Полное внутреннее отражение

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

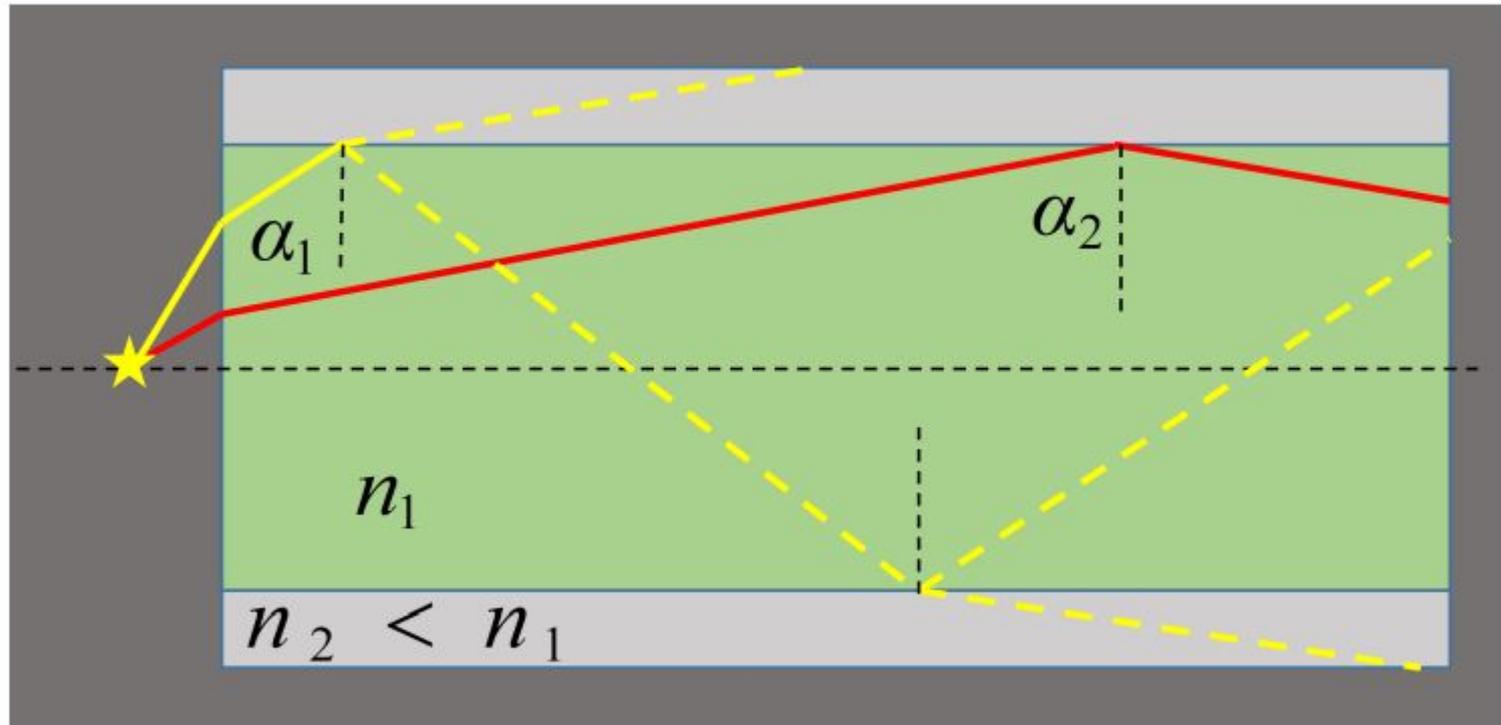
Предельный угол полного отражения

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

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

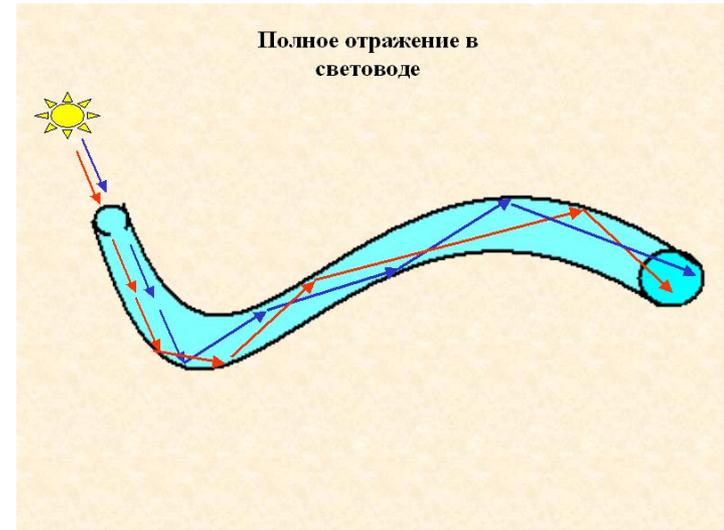
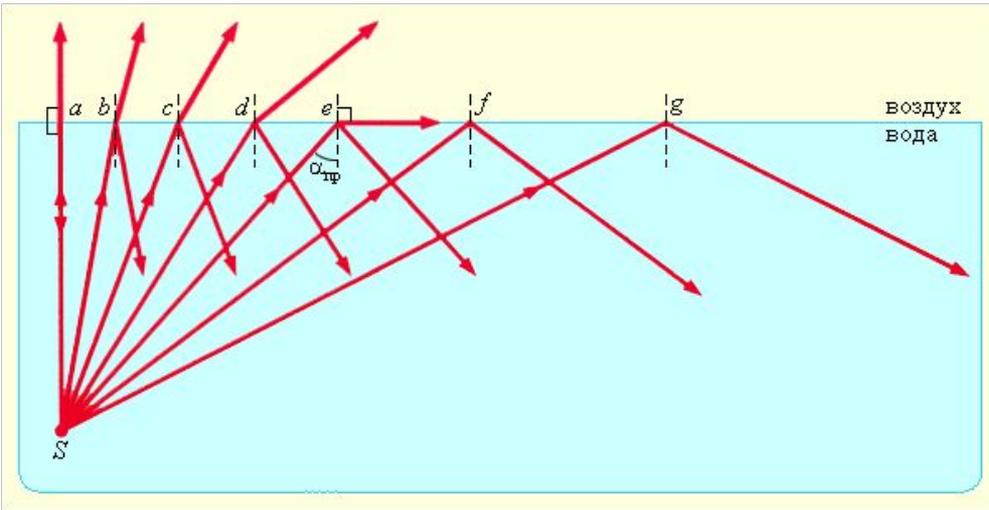


Оптическое волокно



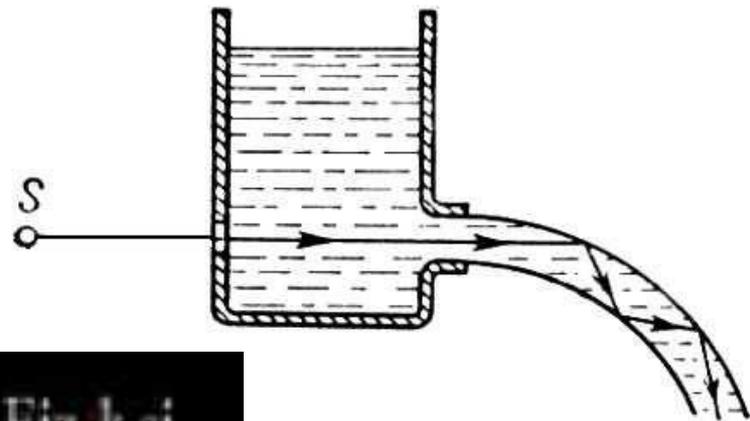
$$\sin \alpha_{\text{ПВО}} = \frac{n_2}{n_1}, \quad \alpha_1 < \alpha_{\text{ПВО}}, \quad \alpha_2 > \alpha_{\text{ПВО}}$$

Полное внутреннее отражение



- Если $n_{21} < 1$ (луч переходит в оптически менее плотную среду, т.е. с меньшим показателем преломления), то при $\alpha > \alpha_{кр}$: $\sin \alpha_{кр} = n_{21}$ преломлённый луч не возникает.
- $\alpha_{кр}$ – предельный угол полного внутреннего отражения

Струя воды световод



Fiz_k.si



Импульс электромагнитного поля. Давление света

- Импульс релятивистской частицы: $\mathbf{p} = (W/c^2)\mathbf{v}$
- Плотность импульса

электромагнитного поля:

$$\mathbf{g} = \frac{w\mathbf{v}}{c^2} = \frac{\mathbf{S}}{c^2} = \frac{1}{4\pi c} \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

- Давление света:

$$P = c\bar{g} = \bar{w} = \frac{\bar{w}c}{c} = \frac{I}{c}$$

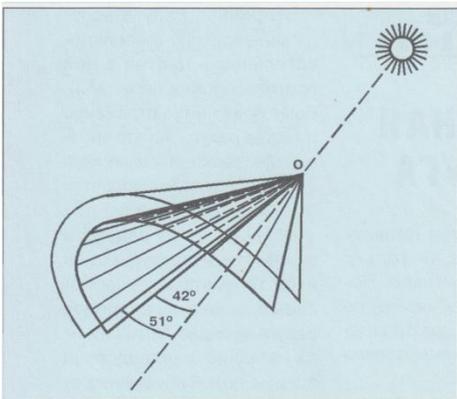
- Если коэффициент отражения R , то: $P = (1 + R)\frac{I}{c}$
- Давление солнечного света:

$$I_c = 1,5 \text{ кВт/м}^2$$

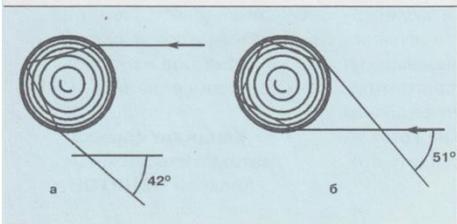
$$P = I/c = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$$

Радуга





Схема, поясняющая геометрию радуги в небе.



Первое и второе кольца радуги появляются вследствие однократного (а) и двукратного (б) отражения солнечных лучей от границы капля—воздух.

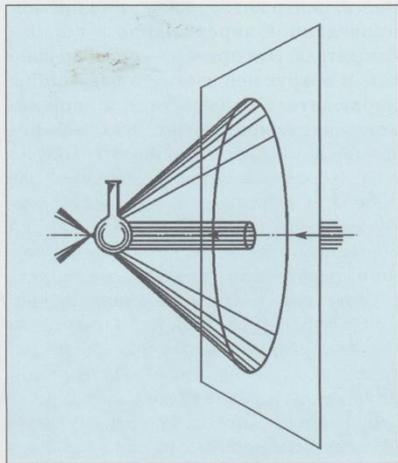


Схема опыта, в котором радугу можно воспроизвести в лаборатории.