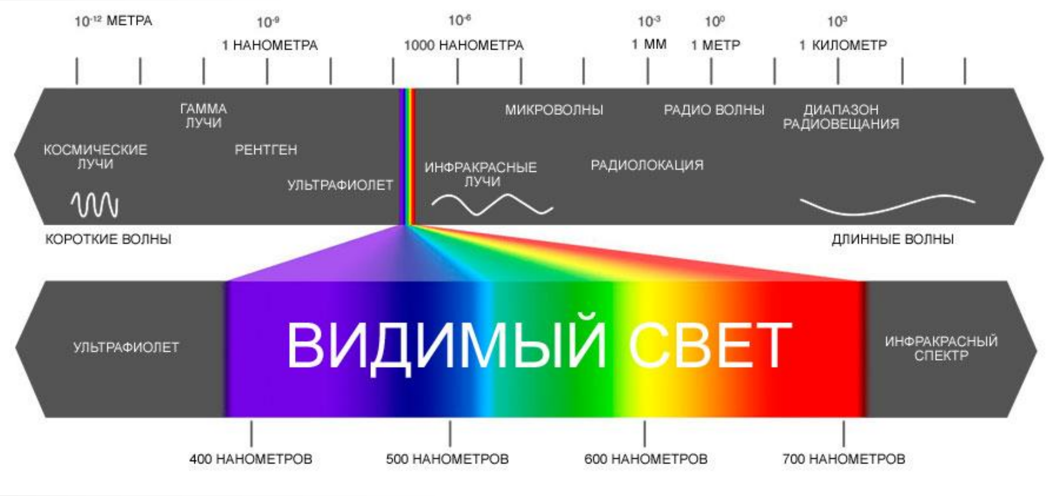
**Сегодня: воскресенье, 18 февраля 2024 г.**

**Общая физика**

**Модуль: Волновая оптика**

# *Лекция 3.* Оптические явления на границе раздела сред




- ✓ **Волны**
- ✓ **Шкала ЭМВ**
- ✓ **Оптические явления на границе раздела сред**

доцент КОФ ФТИ ТПУ, к.физ.-мат.н Купрекова Елена Ивановна

# Энергия электромагнитной волны

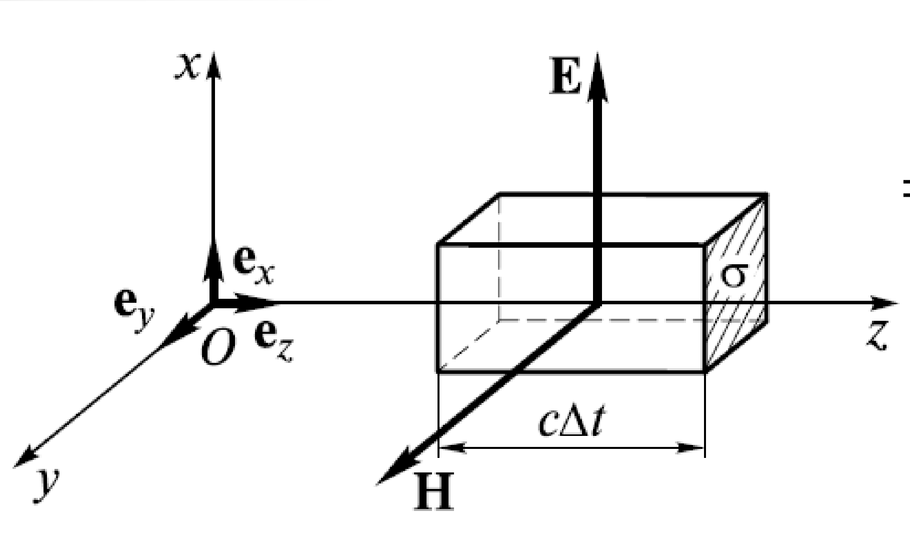
**Посчитаем поток энергии, переносимый плоской волной через сечение, ориентированное перпендикулярно направлению распространения волны (ось Oz). Объемная плотность энергии ЭМП**

$$\boxed{\omega = \frac{1}{2}\left[\varepsilon_0 \varepsilon E^2 + \mu_0 \mu H^2\right]}$$

$$\boxed{\omega = \frac{dW}{dt dS}, \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}\right]}$$

**Считаем, что волна плоскополяризована:** $\vec{E} = \vec{e}_x E_x, \vec{H} = \vec{e}_y H_y$

**Через заштрихованную поверхность площади σ за время Δt будет перенесена энергия, заключенная в параллелепипеде длиной cΔt:**




$$\Delta W = \omega \sigma c \Delta t =$$

$$= \frac{1}{2}\left(\varepsilon\varepsilon_0 E_x^2 + \mu\mu_0 H_y^2\right)\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}\sigma \Delta t =$$

$$= \left\{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} E_0 = \sqrt{\mu\mu_0} H_0\right\} =$$

$$= \left\{\varepsilon = 1, \mu = 1\right\}$$

$$= \varepsilon_0 E_x^2 \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \sigma \Delta t = \underbrace{E_x H_y}_{=S_z} \sigma \Delta t$$

**вектор Пойнтинга** - **количество энергии, переносимой волной за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярно распространяющейся волне.**
**Сейчас вектор Пойнтинга имеет одну компоненту вдоль Oz**

$$S_z = \frac{\Delta W}{\sigma \Delta t} = E_x H_y$$

$$\boxed{\vec{S} = \left[\vec{E}, \vec{H}\right]}$$

**Вектор Умова-Пойнтинга –**

- ✓ **равен по модулю плотности энергии,**
- ✓ **направленный в сторону распространения волны**
- ✓ **количественная характеристика потока энергии**

**В бегущей плоской волне**

$$S = EH = \left\{ \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon} E = \sqrt{\mu \mu_0} H \right\} =$$

$$= \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\mu \mu_0}} E^2 = \left\{ \omega = \varepsilon \varepsilon_0 E^2 \right\} = \frac{\omega}{\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon \mu \mu_0}} = \omega \cdot \upsilon_\phi$$

$$\boxed{S = \omega \cdot \upsilon_\phi}$$

**Если волна гармоническая**

$$E_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz),$$

$$H_y = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_x = c \varepsilon_0 E_x$$

$$\boxed{S_z = c \varepsilon_0 E_{0x}^2 \cos^2(\omega t - kz)}$$

**Поток энергии «пульсирует» с течением времени**

**Интенсивность волны –** энергия, переносимая волной в единицу времени через единичную площадку, нормальную к скорости распространения волны - усредненная за период величина плотности потока энергии

$$\boxed{I = \langle S_z \rangle = \frac{1}{T}\int_0^T S_z dt = \frac{1}{2} c\varepsilon_0 E_{0x}^2}$$

$$\boxed{[I] = 1\,\text{Вт/м}^2,\ [E_{0x}] = 1\,\text{В/м}}$$

$$\boxed{I\left(\text{Вт/м}^2\right) = 1{,}32\cdot 10^{-3}\left(E_{0x}\ (\text{В/м})\right)^2}$$

$$\boxed{I = E_{0x}^2}$$

**В оптике интенсивность определяют, как квадрат амплитуды электрической компоненты ЭМП**

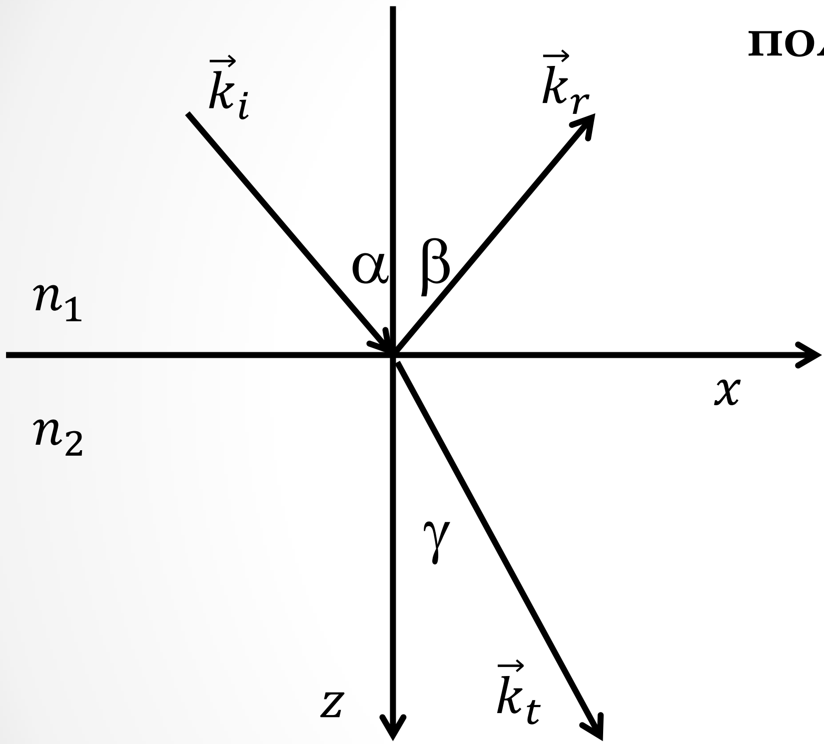
# Шкала электромагнитных волн

| *Диапазон* | *Длина волны* | *Способ получения* |
|---|---|---|
| Радиоволны | $> 5 \cdot 10^{-5}$ м | Излучение диполя, вибратор |
| Оптическое излучение:<br>инфракрасное излучение<br>видимый свет<br>ультрафиолетовое излучение | <br>1 мм ÷ 770 нм<br>(770 ÷ 380) нм<br>(380 ÷ 10) нм | Внутриатомные переходы |
| Рентгеновское излучение | (10 ÷ 100) нм – (0,01 ÷ 1) нм | Взаимодействие заряженных частиц с веществом |
| Гамма-излучение | < 0,1 нм | Радиоактивные превращения, ядерные реакции, распад частиц и т. п. |

# Оптические явления на границе раздела изотропных немагнитных диэлектриков

$$\mu_1 \cong \mu_2 \cong 1, \vec{j} = 0, \varepsilon_1, \varepsilon_2$$

# Законы геометрической оптики




**Плоская монохроматическая линейно поляризованная световая волна:**

$$\vec{E} = \vec{A} e^{i(\omega t - \mathbf{k}\cdot\mathbf{r})}$$

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_i + \vec{E}_r, \quad \vec{E}_2 = \vec{E}_t$$

**Граничное условие:**

$$\vec{E}_{1\tau} = \vec{E}_{2\tau}$$

$$A_{i\tau} e^{i(\omega_i t - \mathbf{k}_i\cdot\mathbf{r})} + A_{r\tau} e^{i(\omega_r t - \mathbf{k}_r\cdot\mathbf{r})} =$$

$$= A_{t\tau} e^{i(\omega_t t - \mathbf{k}_t\cdot\mathbf{r})}$$

**На границе раздела двух сред:**

$$\omega_i = \omega_r = \omega_t$$

**Плоскость падения луча** – плоскость, образованная волновым вектором падающей волны и нормалью к поверхности раздела сред

$$\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} = \left(\mathbf{k}_n + \mathbf{k}_\tau\right)\cdot\mathbf{r}_\tau$$

$$\mathbf{k}_{i\tau} = \mathbf{k}_{r\tau} = \mathbf{k}_{t\tau}$$

$$k_i \sin\alpha = k_r \sin\beta = k_t \sin\gamma$$

$$k_0 n_1 \sin\alpha = k_0 n_1 \sin\beta = k_0 n_2 \sin\gamma$$

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

1. **Частоты падающей, отраженной и преломленной волн равны.**

$$\boxed{\omega_i = \omega_r = \omega_t}$$

2. **Волновые вектора падающей, отраженной и преломленной волн лежат в одной плоскости с нормалью к поверхности раздела двух сред в точке падения.**

$$\boxed{\alpha = \beta}$$

3. **Угол падения равен углу отражения**
4. **Закон Снеллиуса:**

$$\boxed{\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{n_2}{n_1} \equiv n_{21}}$$

**Принцип Ферма:** Свет распространяется по такому пути, для прохождения которого требуется минимальное время.

Время, необходимое для прохождения участка пути $ds$

$$dt = \frac{ds}{\upsilon} = n\frac{ds}{c}$$

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

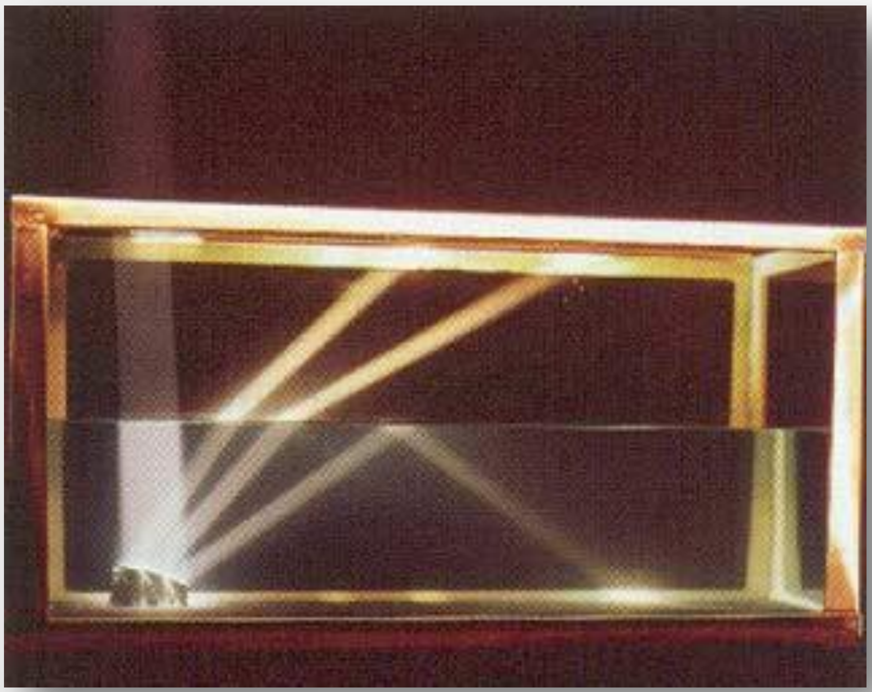
$$t = \frac{1}{c}\int_1^2 n\,ds$$

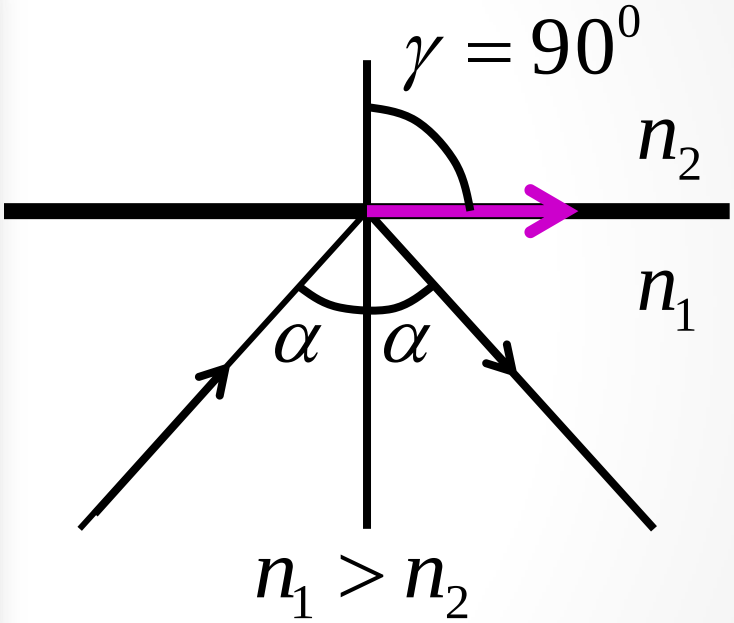
время, затрачиваемое светом на путь от точки 1 до точки 2

$$\boxed{L = \int_1^2 n\,ds}$$

Свет распространяется по такому пути, оптическая длина которого минимальна.

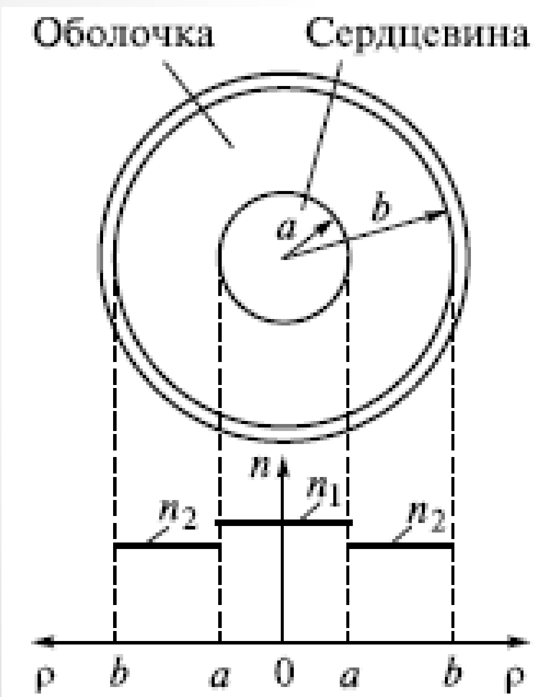
Если направить луч света из оптически более плотной в оптически менее плотную среду, то возможна ситуация, когда падающий луч будет полностью отражаться





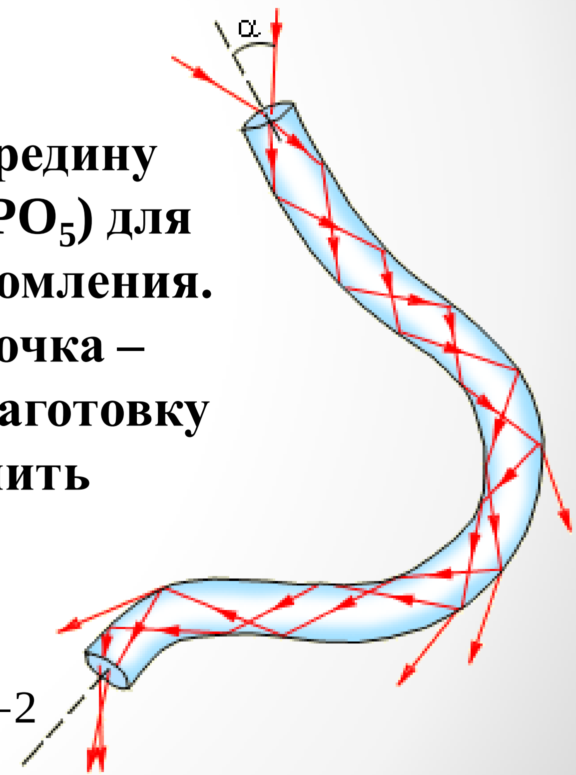

**Предельный угол** – угол падения, которому соответствует угол преломления $90^0$.

**Явление полного внутреннего отражения реализуется в волоконных световодах, предназначенных для канализации и передачи информации и световой энергии на большие расстояния.**




**$SiO_2$ (*d* ~ 1 см, *l* ~ 1 м). В середину добавляют примеси ($GeO_2$, $PO_5$) для увеличения показателя преломления. В остальную часть – оболочка – добавляют фториды. Затем заготовку вытягивают в тонкую нить**

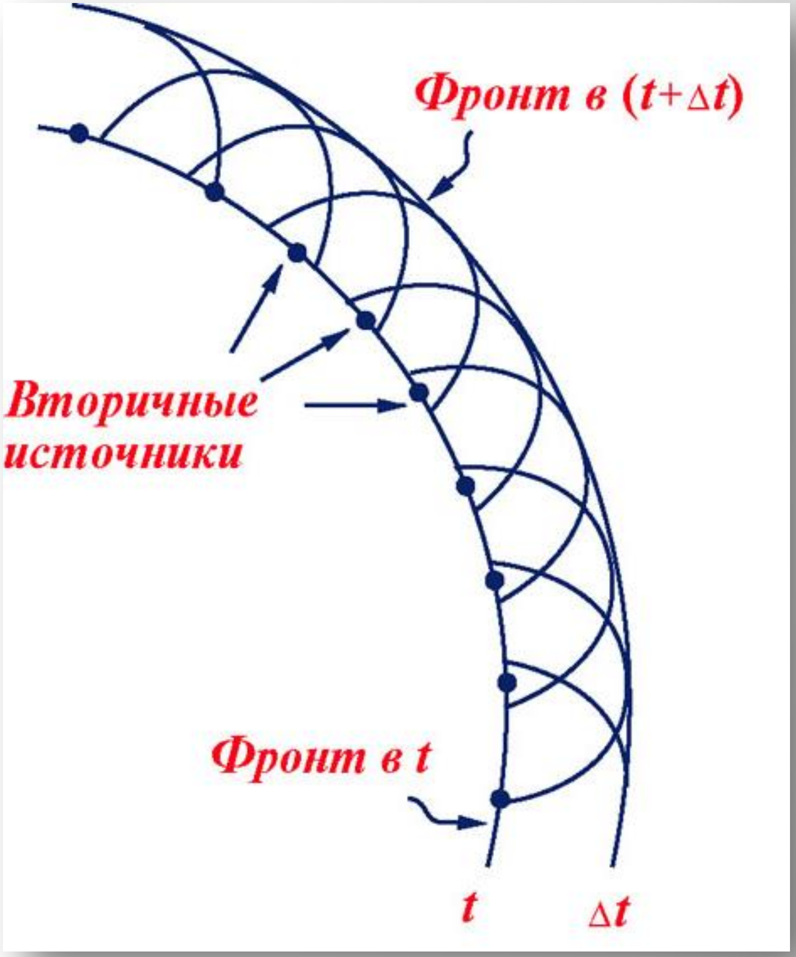
$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \approx 3 \cdot 10^{-2}$$



# Принцип Гюйгенса

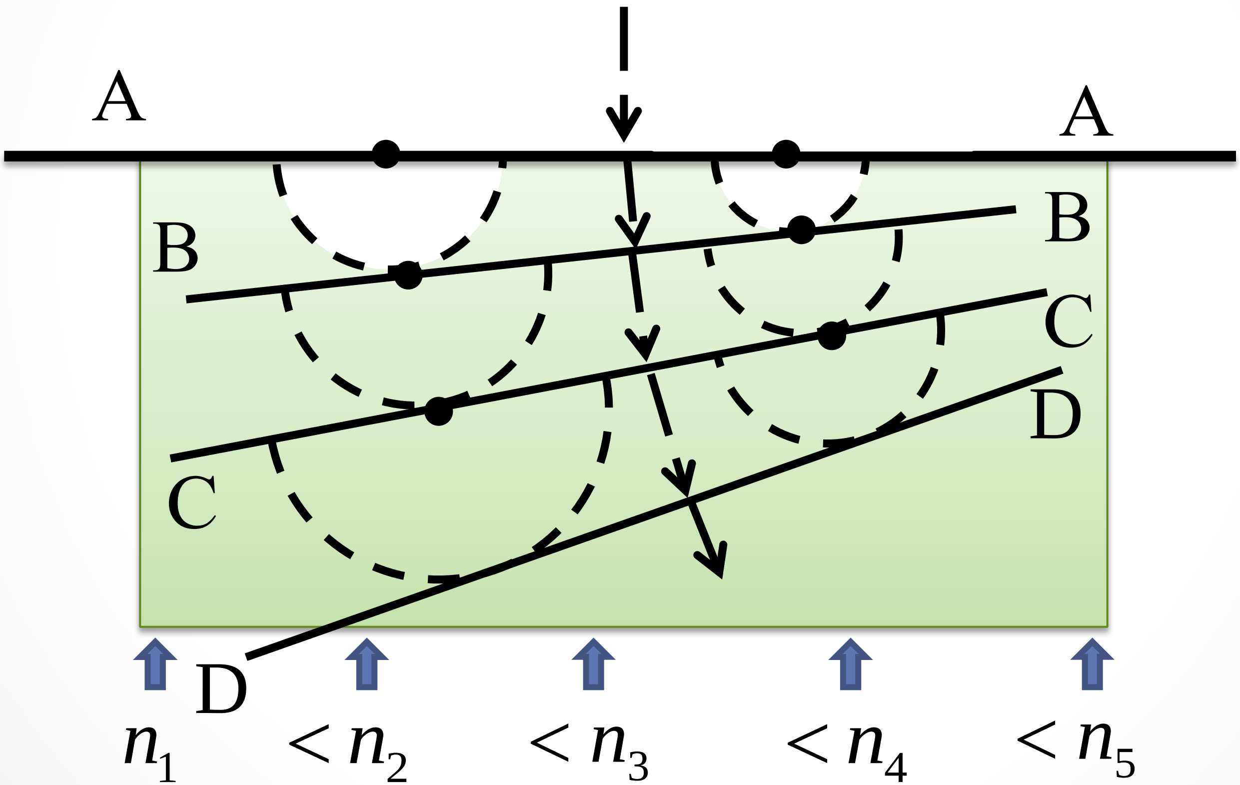
Каждая точка среды, до которой доходит световое возбуждение, является центром вторичных волн.

• Поверхность, огибающая вторичные волны, указывает действительное положение фронта распространяющейся волны в данный момент времени




**Волновой фронт –** геометрическое место точек, колеблющихся в одной фазе

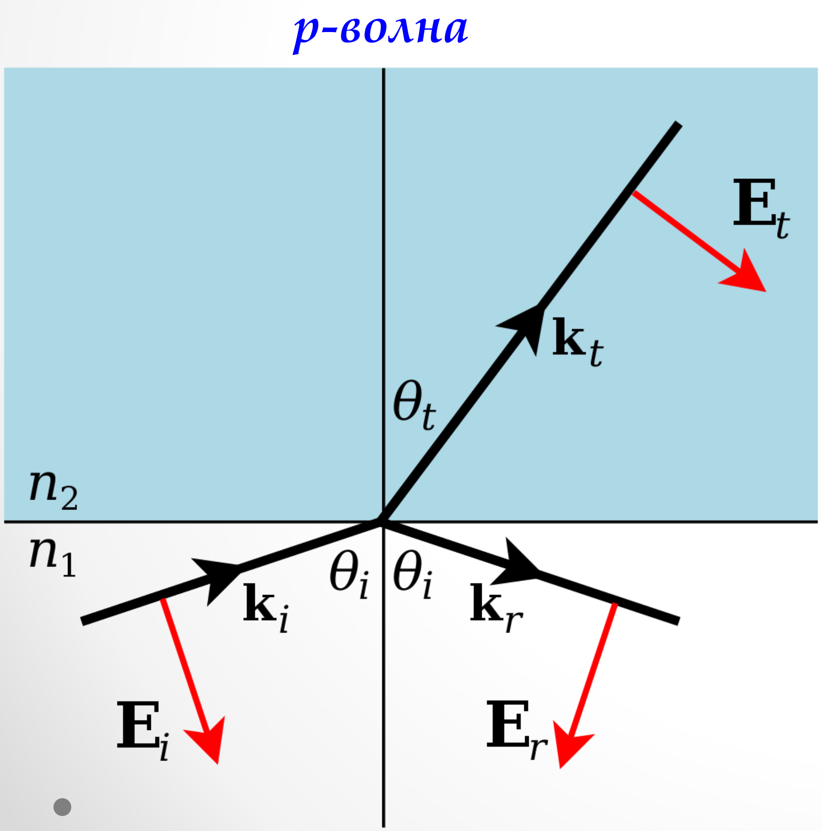
**Задача:** На плоскую границу раздела двух сред падает нормально луч света. Показатель преломления среды непрерывно увеличивается от ее левого края к правому. Как будет идти луч света в среде?

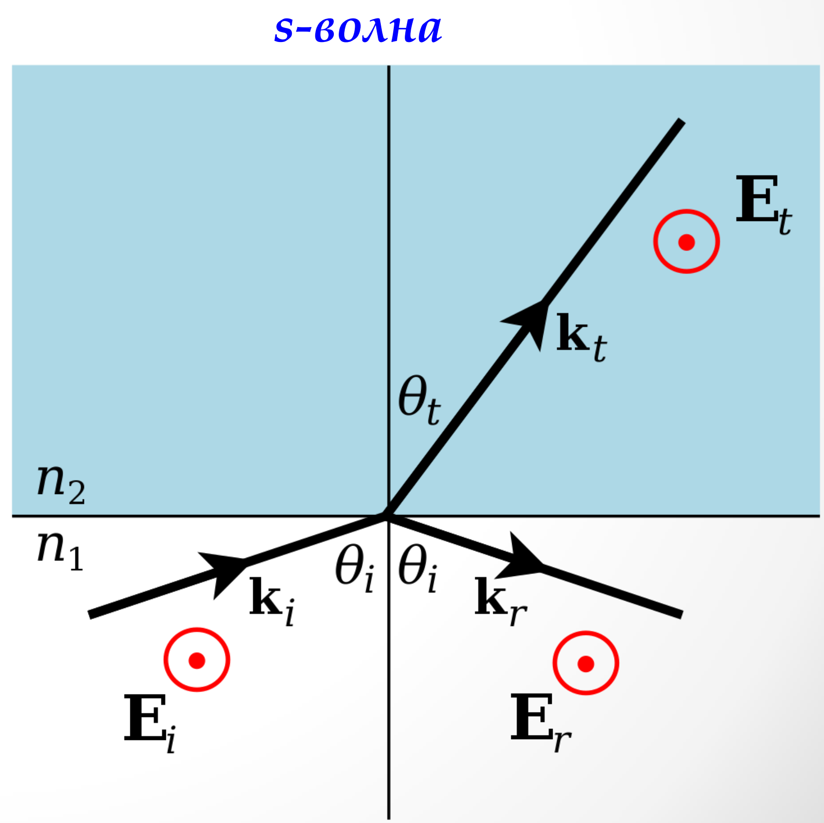


# Формулы Френеля

выражения для амплитуд поля в отражённой и преломлённой волне при известных амплитудах падающей волны

В падающей волне выделим **p-волну** — колебания E в плоскости и **s-волну** — колебания E , перпендикулярные плоскости падения.



Решая совместно получаем **формулы Френеля:**

$$E_{ip}^{\max} = -E_{0p}^{\max} \frac{tg(\theta_i - \theta_t)}{tg(\theta_i + \theta_t)}$$

$$E_{rp}^{\max} = E_{0p}^{\max} \frac{2\cos\theta_i \sin\theta_t}{\sin(\theta_i + \theta_t)\cos(\theta_i - \theta_t)}$$

$$E_{is}^{\max} = -E_{0s}^{\max} \frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$

$$E_{rs}^{\max} = E_{0s}^{\max} \frac{2\cos\theta_i \sin\theta_t}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$

**Коэффициент отражения** — отношение интенсивности отражённой волны к интенсивности падающей волны:

$$\rho = \frac{I_i}{I_0} = \left(\frac{E_i^{\max}}{E_0^{\max}}\right)^2 = \frac{tg^2(\theta_i - \theta_t)}{tg^2(\theta_i + \theta_t)} = \frac{n^2\cos\vartheta_i - \sqrt{n^2 - \sin^2\vartheta_i}}{n^2\cos\vartheta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\vartheta_i}}$$

**Коэффициент пропускания** — отношение интенсивности преломлённой волны к интенсивности падающей волны:

$$t = \frac{I_r}{I_0} = \left(\frac{E_r^{\max}}{E_0^{\max}}\right)^2 = \frac{4\sin^2\theta_t\cos^2\theta_i}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)\cos^2(\theta_i - \theta_t)} = \frac{2n\cos\theta_i}{n^2\cos\theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}}$$

# Фазовые соотношения

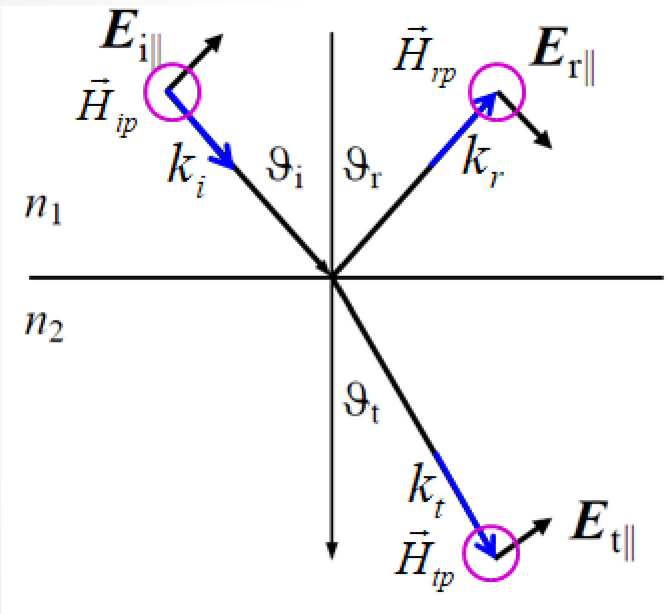
$$\rho_{\parallel} = -\frac{tg(\theta_i - \theta_t)}{tg(\theta_i + \theta_t)}$$

Коэффициент может изменять знак при изменении угла падения:

• если $\rho_{\parallel} > 0$, то отраженная волна находится фазе с падающей (рис)

• если $\rho_{\parallel} < 0$, то $E_{r\parallel}$ направлен в другую сторону.

**Отраженная волна приобретает по отношению к падающей волне скачок фазы, равный π**




1. Пусть свет падает из менее в более плотную среду: $n_1 < n_2$. Тогда $\theta_i > \theta_t$ При малых углах, когда $\theta_i + \theta_t \le \pi/2$, $\rho_{\parallel} < 0$ и $\rho_{\perp} < 0$

**Обе волны находятся в противофазе с падающей, приобретают по отношению к падающей волне скачок фазы, равный π**

(кольца Ньютона)

$$\rho_{\perp} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$

$$\rho_{\parallel} = -\frac{tg(\theta_i - \theta_t)}{tg(\theta_i + \theta_t)}$$

2. **При $\theta_i + \theta_t = \pi/2$, одна из компонент не отражается $\rho_{\parallel} = 0$**

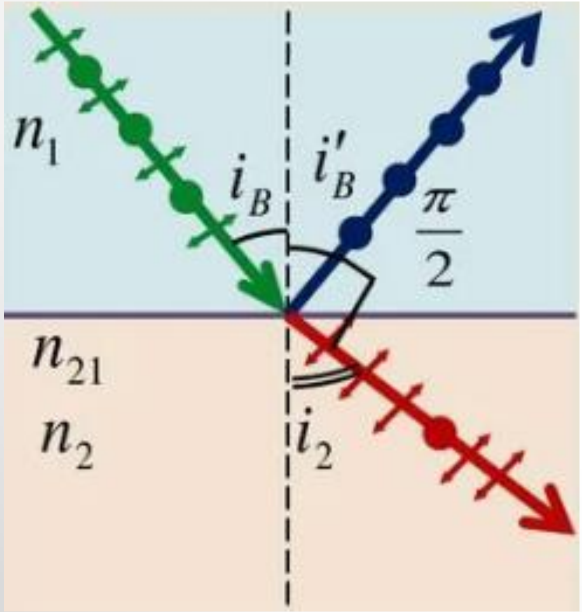
**Закон Брюстера ($\theta_i = \theta_Б$)**

$$\rho_{\perp} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$

$$\frac{\sin\theta_Б}{\sin\theta_t} = \frac{\sin\theta_Б}{\sin(\pi/2 - \theta_Б)} = tg\theta_Б = \frac{n_2}{n_1} < 1$$

**При $\theta_i > \theta_Б$, уже**

**$\rho_{\parallel} > 0$ и $\rho_{\perp} < 0$**




**При падении под углом Брюстера света, поляризованного в плоскости падения, его отражения не происходит**

$$\rho_{\parallel} = -\frac{tg\left(\theta_i - \theta_t\right)}{tg\left(\theta_i + \theta_t\right)}$$

$$\rho_{\perp} = -\frac{\sin\left(\theta_i - \theta_t\right)}{\sin\left(\theta_i + \theta_t\right)}$$

**3. Свет падает из более в менее плотную среду:**

$$n_1 > n_2.$$

**Каждая из компонент отраженной волны всегда будет в фазе с соответствующей компонентой падающей волны, т.к.**

**$\rho_{\parallel} > 0$ и $\rho_{\perp} > 0$ при всех углах падения**