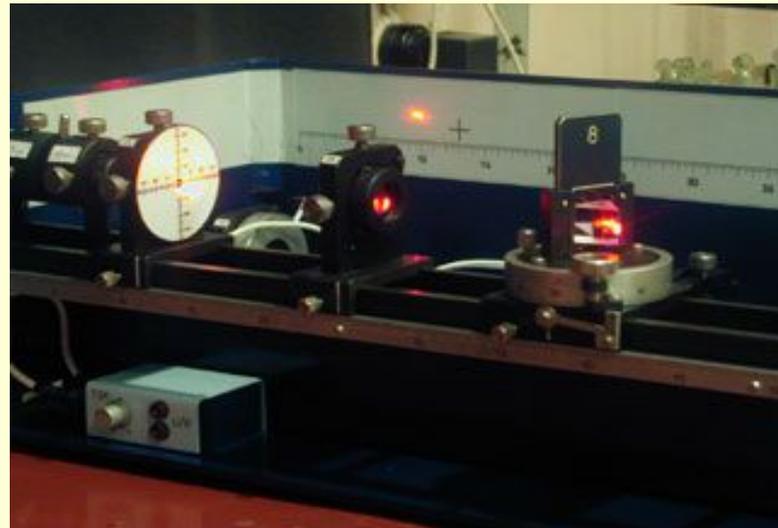


Оптика и квантовая физика

для студентов
2 курса ФТФ и ГГФ



Кафедра общей физики



Поляризация волн

- ✓ Форма и степень поляризации монохроматических волн
- ✓ Получение и анализ линейно-поляризованного света
- ✓ Отражение и преломление света на границе раздела двух диэлектриков. Формулы Френеля. Закон Брюстера
- ✓ Полное отражение и его применение в технике

Лекция 5



Структура плоской волны

$$E_y = E_m \cos(\omega t - kx)$$

$$H_z = H_m \cos(\omega t - kx)$$

плоская гармоническая волна

$$E = E_m e^{i(\omega t - kx)}$$

$$H = H_m e^{i(\omega t - kx)}$$

в комплексной форме

E_m и H_m – амплитуды колебаний векторов напряженности электрического и магнитного полей волны;

$\omega = 2\pi/T$ – круговая частота колебаний;

$k = \omega/v = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

T – период колебаний,

λ – длина волны,

v – скорость распространения волны.

Основные свойства волны

$\mathbf{E} \perp \mathbf{H} \perp \mathbf{u}$ (\mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{u} – правая тройка векторов)

Колебания электрического и магнитного полей происходят в одной фазе.

$$\sqrt{\epsilon\epsilon_0} \mathbf{E} = \sqrt{\mu\mu_0} \mathbf{H}$$

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

- скорость электромагнитных волн зависит от диэлектрических и магнитных свойств среды

$$\mathbf{c} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$$

- скорость электромагнитной волны в вакууме

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{c}}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$



Перенос энергии характеризуется *вектором плотности потока энергии* (вектор Умова-Пойнтинга):

$$\mathbf{S} = [\mathbf{E} ; \mathbf{H}]$$

Направление вектора \mathbf{S} определяет направление переноса энергии, т.е. светового луча.

$$\mathbf{S} = \omega \mathbf{v}$$

$$\omega = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}^2$$

– объемная плотность энергии электромагнитного поля

Интенсивность (\mathbf{I}) волны - среднее значение плотности потока энергии \mathbf{S} –

$$\mathbf{I} = \langle \mathbf{S} \rangle$$

$$\mathbf{I} = \varepsilon \varepsilon_0 \nu \tilde{\mathbf{E}}^2$$

$$\mathbf{I} = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 \nu \mathbf{E}_m^2$$

$$\mathbf{I} \sim \mathbf{E}_m^2$$

$$\mathbf{I} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c \mathbf{E}_m^2$$

– в вакууме



Для слабых полей $\mathbf{E}_m \approx 10^{-2}$ В/см.
В лазерных пучках $\mathbf{E}_m \approx 10^6$ В/см

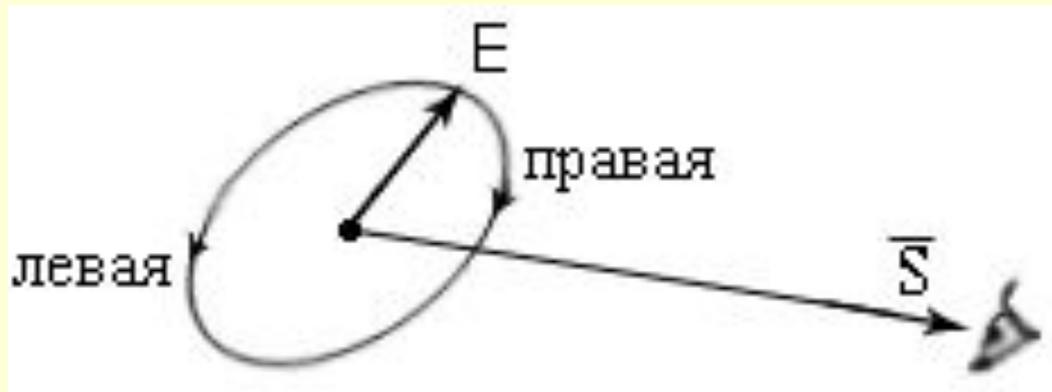
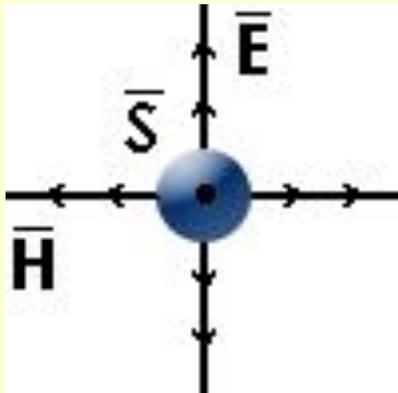
Поляризация света



Свет, электрический вектор которого колеблется вдоль некоторого фиксированного направления, называется **линейно-поляризованным (ЛПС)**.



Циркулярно-поляризованным (ЦПС) называется свет, у которого конец вектора **E** в каждой точке на луче описывает со временем окружность. Направление вращения определяется с точки зрения наблюдателя, смотрящего навстречу лучу.



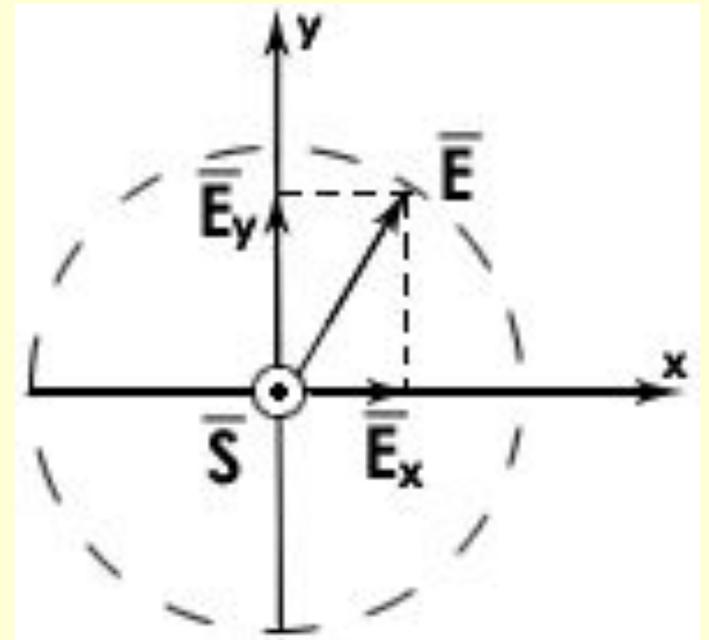
ЦПС можно представить как сумму 2-х пучков **ЛПС** с взаимно перпендикулярными направлениями колебаний **E**:

$$E_x = E_m \cos(\omega t - kz)$$

$$E_y = E_m \sin(\omega t - kz)$$

тогда $E_x^2 + E_y^2 = E_m^2$

Амплитуды E_x и E_y одинаковы, сдвиг фаз $\Delta\phi = \pi/2$.

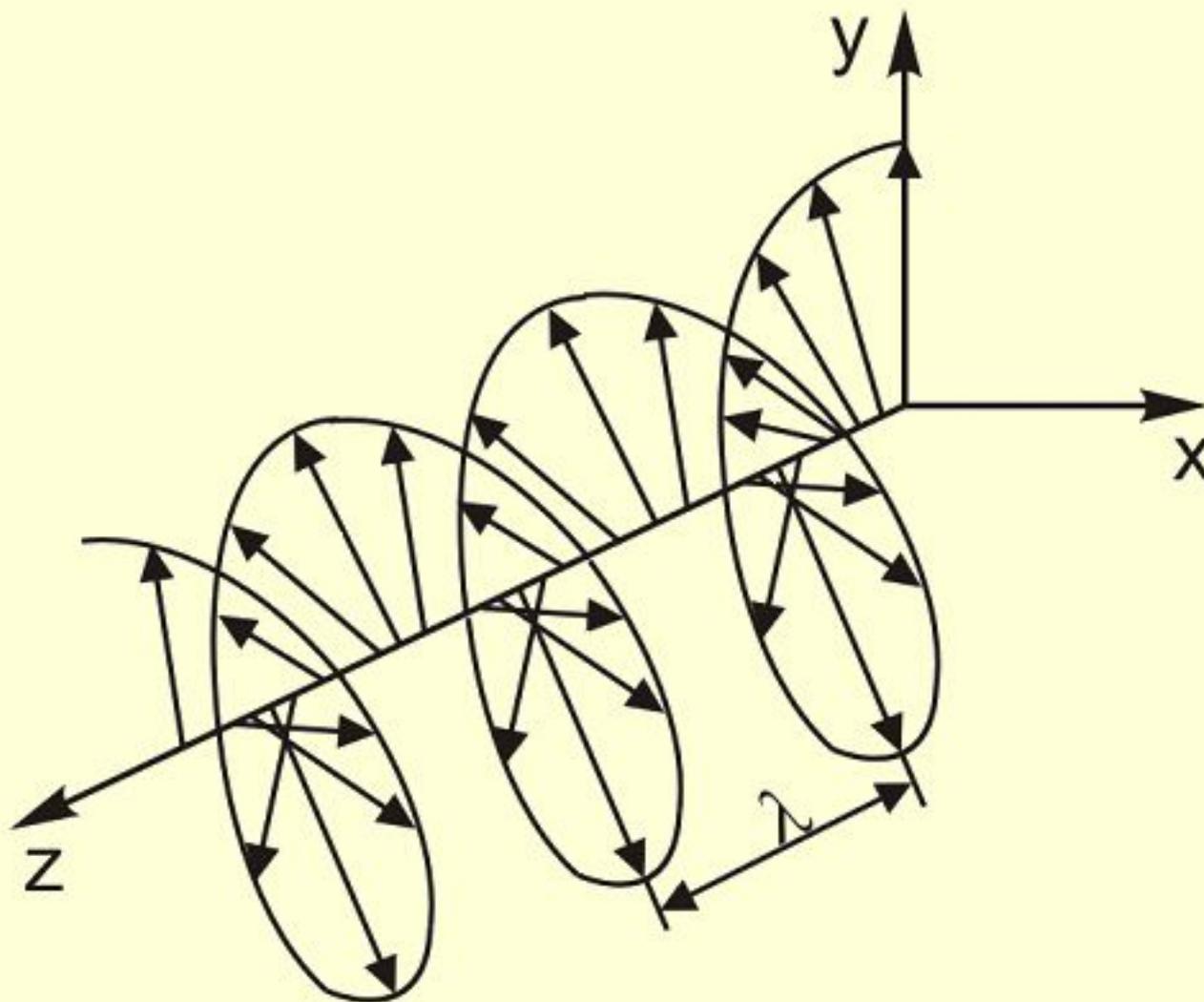


ЦПС.

Вектор **E** в точке **z** на луче:



Круговая поляризация



Демонстрация: "круговая и линейная поляризация"





Эллиптически-поляризованным (ЭПС) называется свет, у которого конец вектора **E** в каждой точке на луче со временем описывает эллипс.

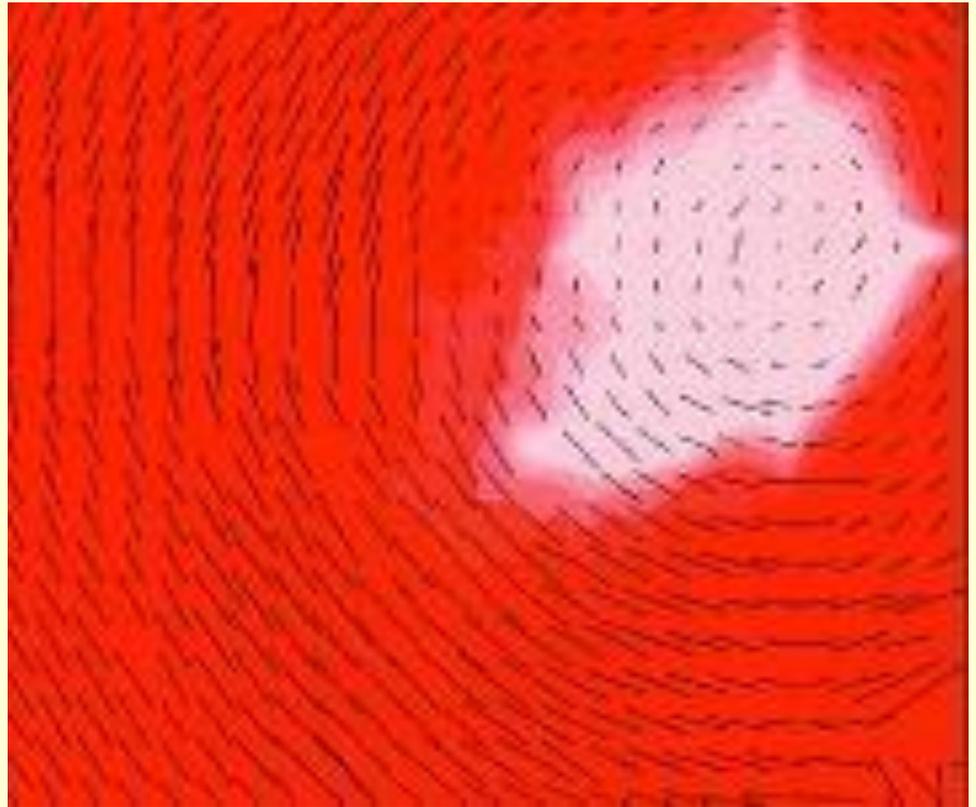


Если два пучка **ЛПС** со взаимно перпендикулярным направлениями колебаний вектора **E** распространяются вдоль определённого направления, и у них $\Delta\varphi \neq \pi/2, 0, \pi$ или их амплитуды не равны, то в сумме они дадут **ЭПС**.



Свет звезд

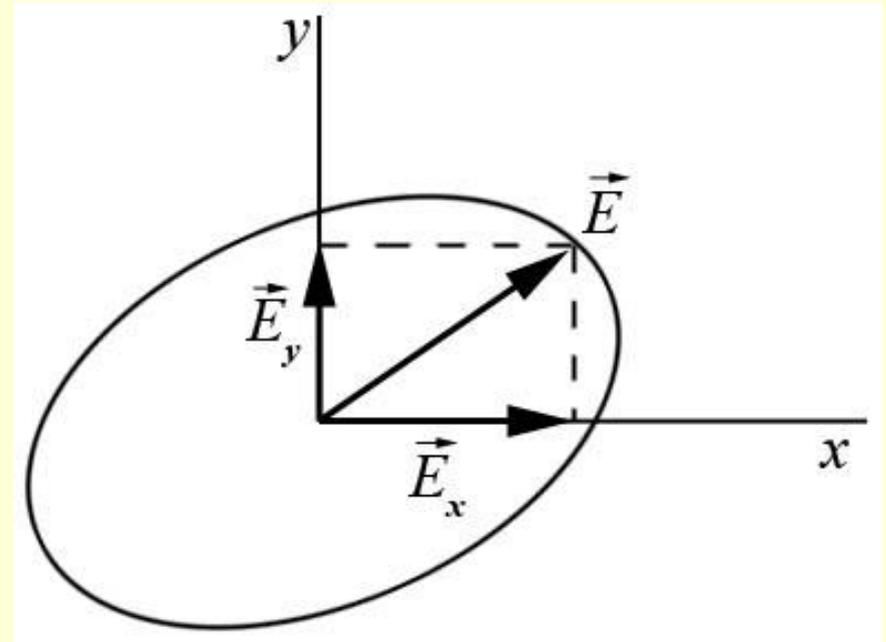
- Звездный свет, рассеянный пылевыми частицами, имеет линейную поляризацию. Нанеся на снимок направление поляризации, получают серию концентрических окружностей, в центре которых расположена звезда.



Образование поляризованного света

Рассмотрим 2 взаимно перпендикулярных колебания, отличающихся по фазе на α :

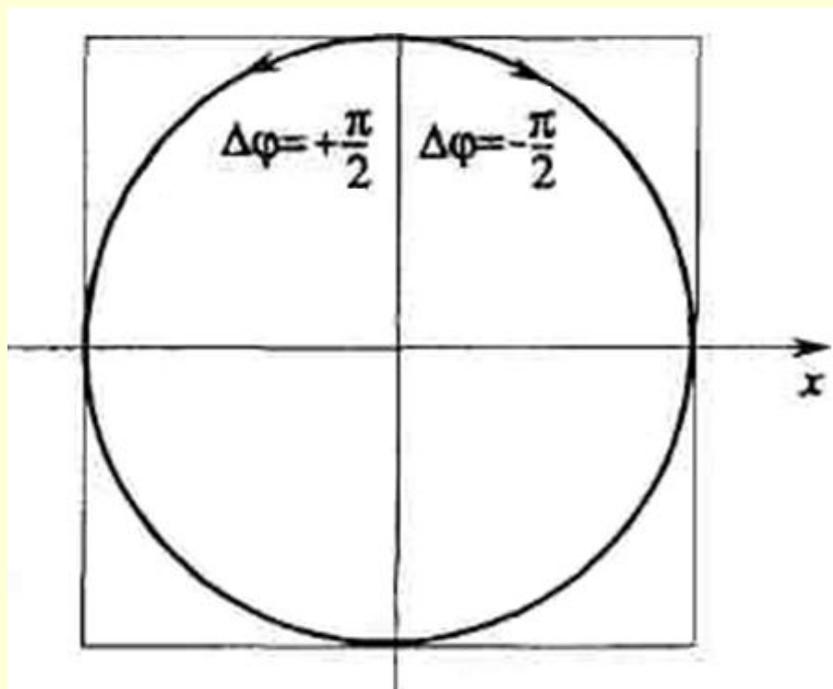
$$\begin{cases} E_x = A_1 \cos \omega t \\ E_y = A_2 \cos(\omega t + \alpha) \end{cases}$$



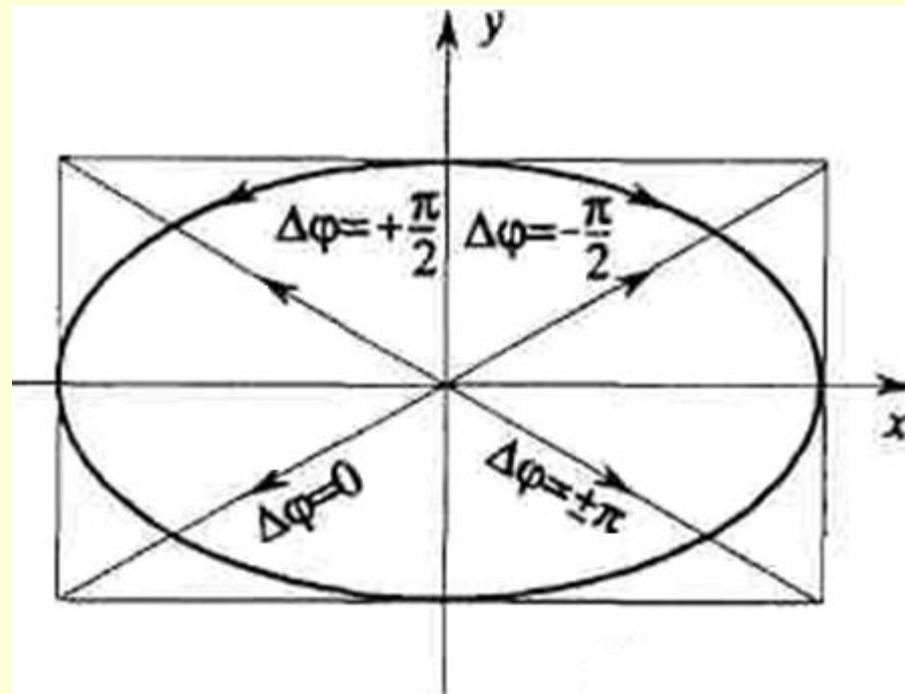
Результат сложения:

- 1) $\alpha = 0$ или π – плоскополяризованный свет;
- 2) $A_1 = A_2$ и $\alpha = \pm \frac{\pi}{2}$ – свет, поляризованный по кругу;
- 3) произвольные A и α – эллиптически поляризованный свет.

Поляризация электромагнитной волны



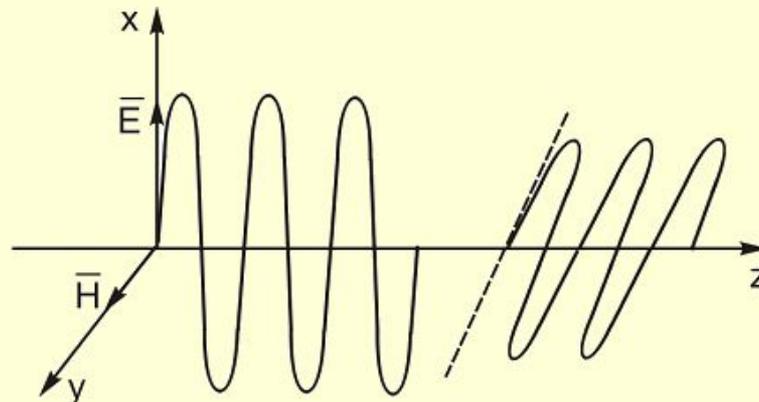
Круговая



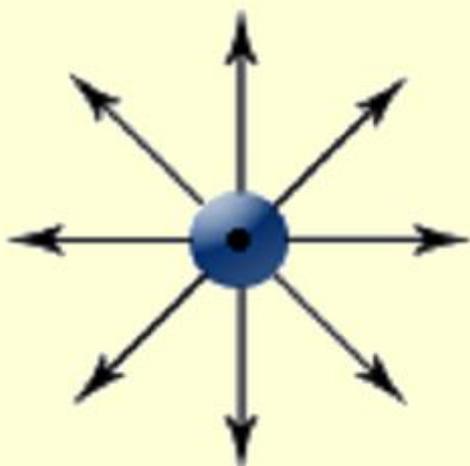
Эллиптическая

Естественный свет

😊 Кванты естественного света

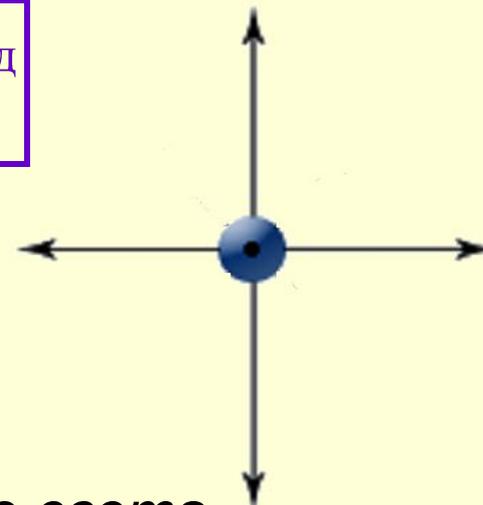


Свет, у которого направление колебаний вектора **E** хаотически меняется со временем, называется *естественным*.



$$I_{\text{ест}}^{\text{пад}} = I_{\perp}^{\text{пад}} + I_{\boxtimes}^{\text{пад}}$$

==



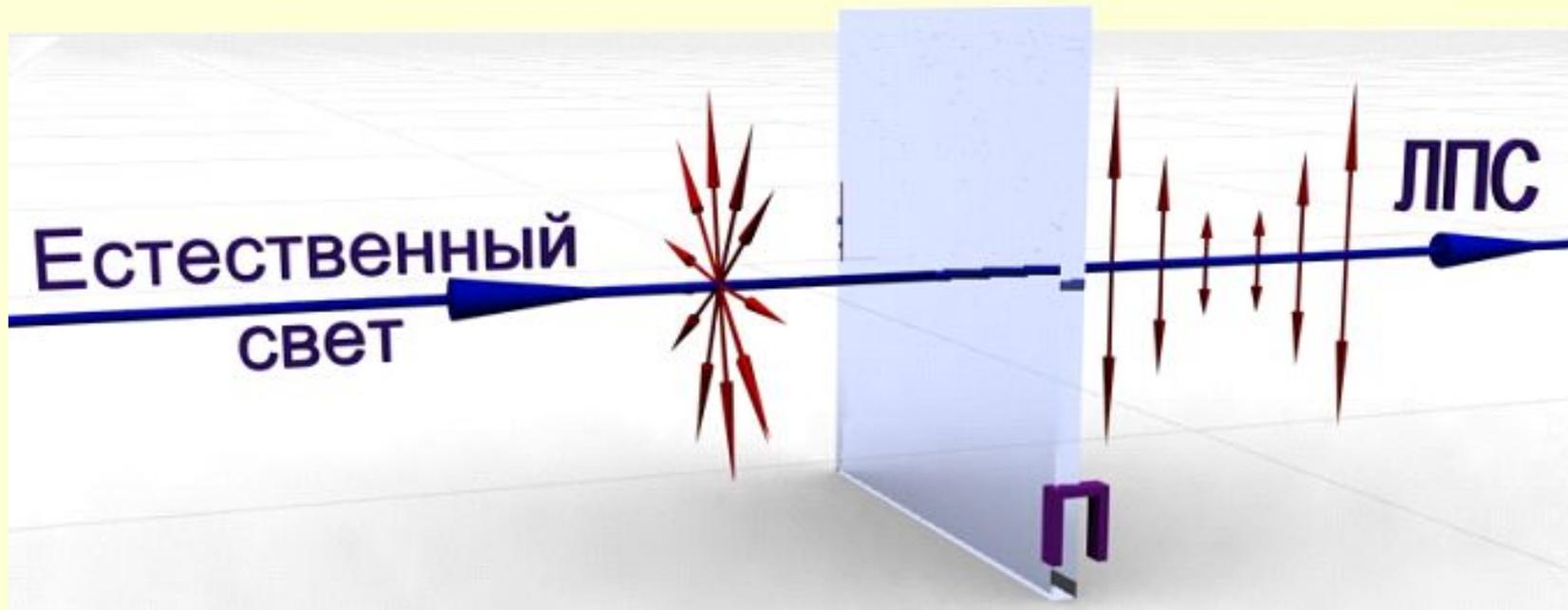
Направления векторов **E** естественного света



Получение и анализ линейно-поляризованного света

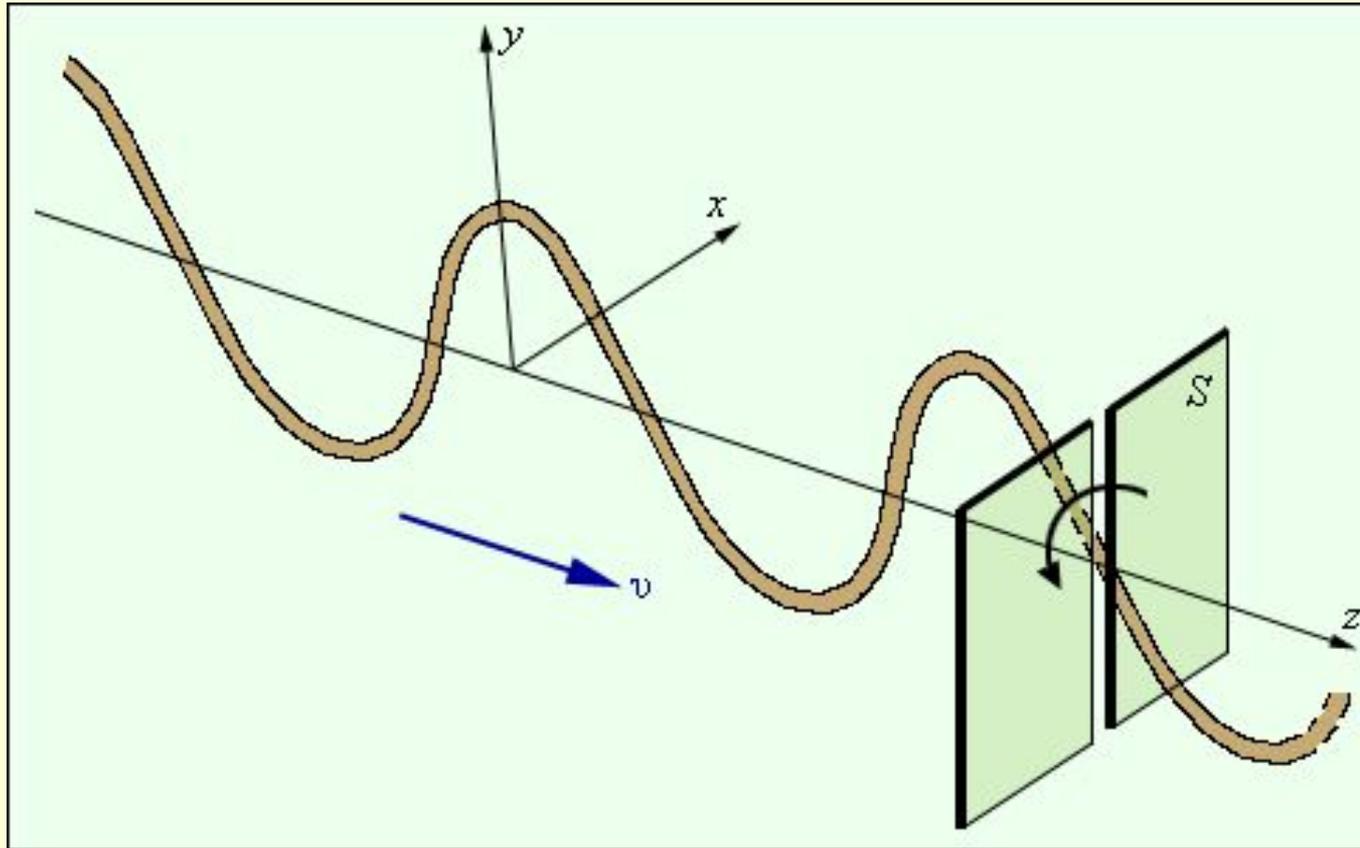
Поляризаторы - устройства, превращающие неполяризованный (естественный) свет в линейно поляризованный (ЛП).

Плоскость, в которой колеблется вектор \mathbf{E} в волне, прошедшей через поляризатор, называется **плоскостью пропускания** или **главной плоскостью** поляризатора.



Действие поляризатора. П – плоскость пропускания поляризатора

Получение и анализ линейно-поляризованного света



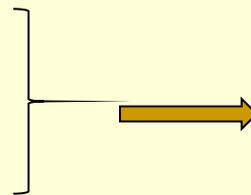
*Поперечная волна в резиновом жгуте.
Частицы колеблются вдоль оси y .
Поворот щели S вызовет затухание волны.*

Закон Малюса



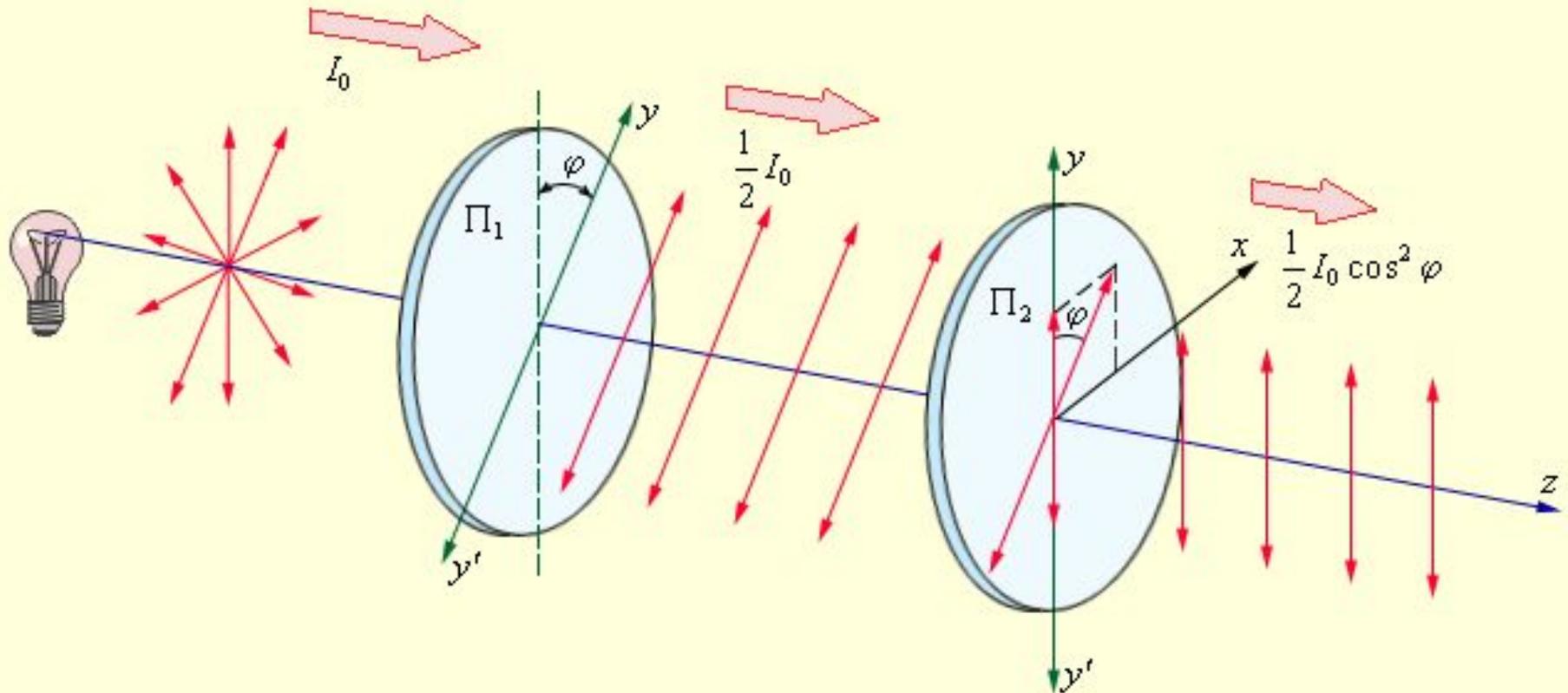
$$E_1 = E_0 \cos \varphi$$

$$I \sim E_m^2$$



$$I_1 = I_0 \cos^2 \varphi$$

Закон Малюса



Прохождение естественного света через два идеальных поляроида

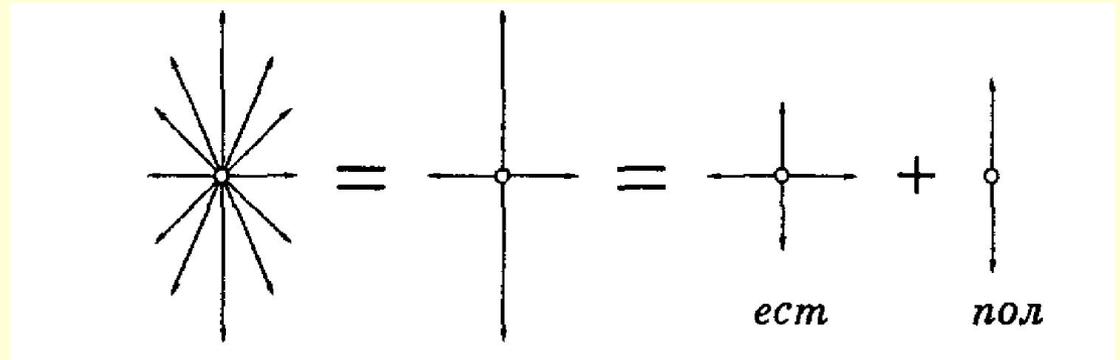
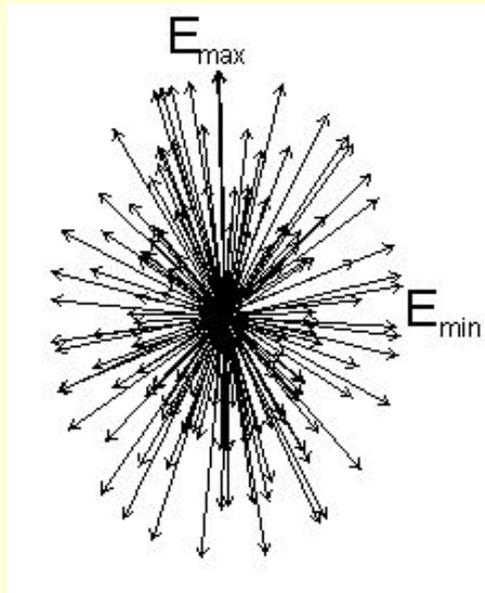
Закон Малюса



Степень поляризации



Частично поляризованная - волна, в которой какое-либо направление колебаний имеет преимущество по сравнению с другими



Степень поляризации

$$P = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

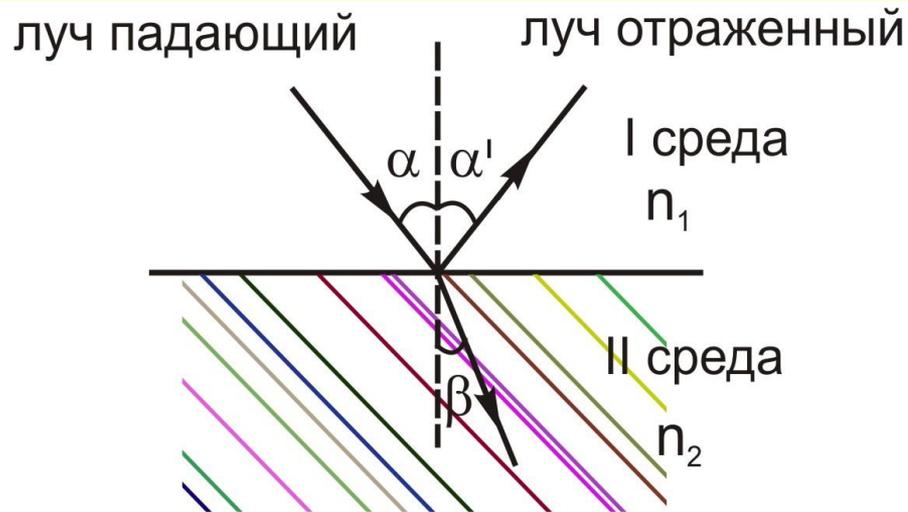
– степень
поляризации

Естественный свет	$I_{\perp} = I_{\parallel}$	$P = 0$
Линейно поляризованный	$I_{\parallel} = 0$	$P = 1$

Отражение и преломление света на границе раздела двух диэлектриков. Формулы Френеля. Закон Брюстера



Законы отражения и преломления света



Лучи падающий, отраженный, преломленный и перпендикуляр, восстановленный к границе раздела двух сред в точке падения, лежат в одной плоскости.

Угол падения равен углу отражения: $\alpha = \alpha'$.

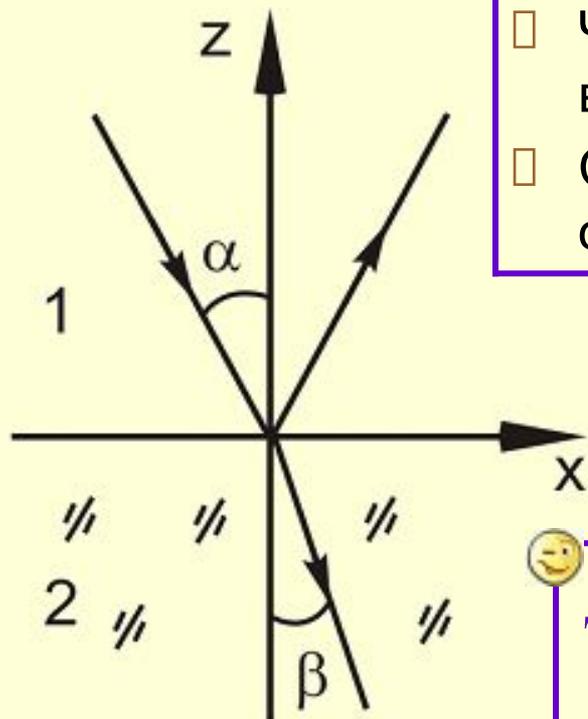
Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления является постоянной величиной, называемой относительным показателем преломления двух сред:

$$\sin\alpha/\sin\beta = n_{21}, \quad \text{где } n_{21} = n_2/n_1$$

n_2 и n_1 – абсолютные показатели преломления.

Механизм формирования отраженной и преломленной волн

- Электрическое поле падающей волны возбуждает вынужденные колебания входящих в состав вещества заряженных частиц.
- Частицы становятся источником вторичных волн.
- Суперпозиция вторичных волн формирует отраженную и преломленную волны.



$$R = \frac{I_{\text{отр}}}{I_{\text{пад}}}$$

- коэффициент отражения

$$T = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{пад}}}$$

- коэффициент пропускания

$$T = 1 - R$$

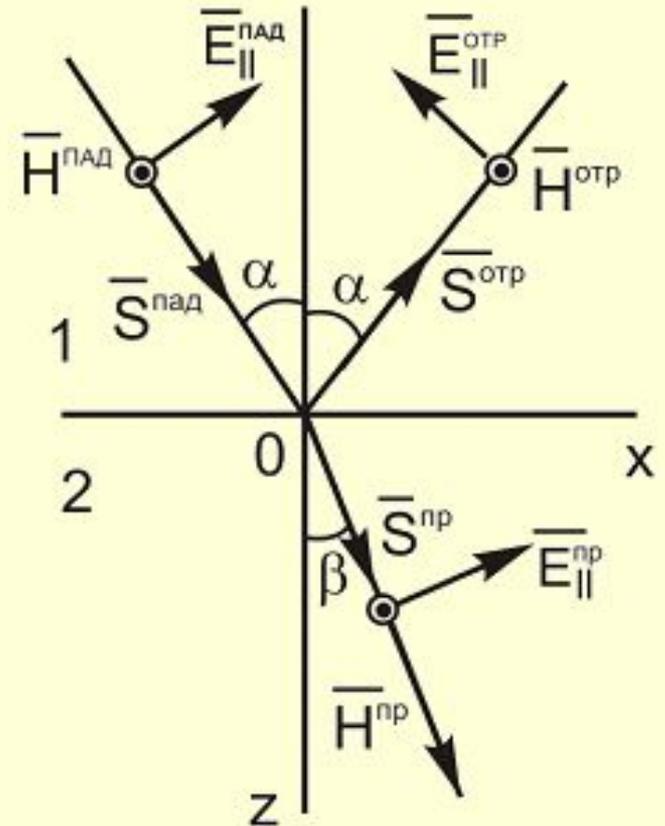


Формулы Френеля

Отражение и преломление линейно поляризованных волн

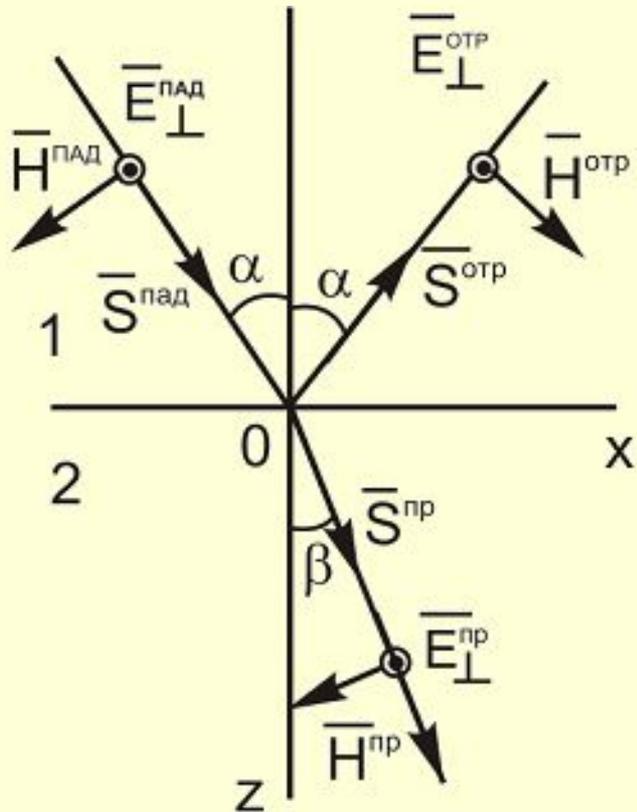
1. \vec{E} лежит в плоскости падения (xz),
 $n_1 < n_2$

$$R_{\parallel} = \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)}$$



Отражение и преломление линейно поляризованных волн

2. $\vec{E} \perp$ плоскости падения, $n_1 < n_2$



$$R_{\perp} = \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)}$$

Нормальное падение света ($\alpha \rightarrow 0$)

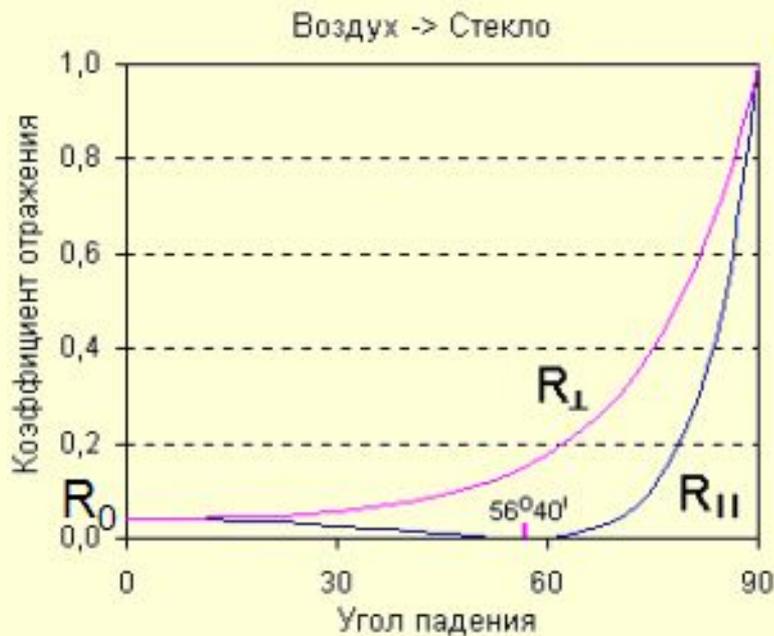
$$R_{\perp} = R_{\parallel} = \frac{(\alpha - \beta)^2}{(\alpha + \beta)^2}$$

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

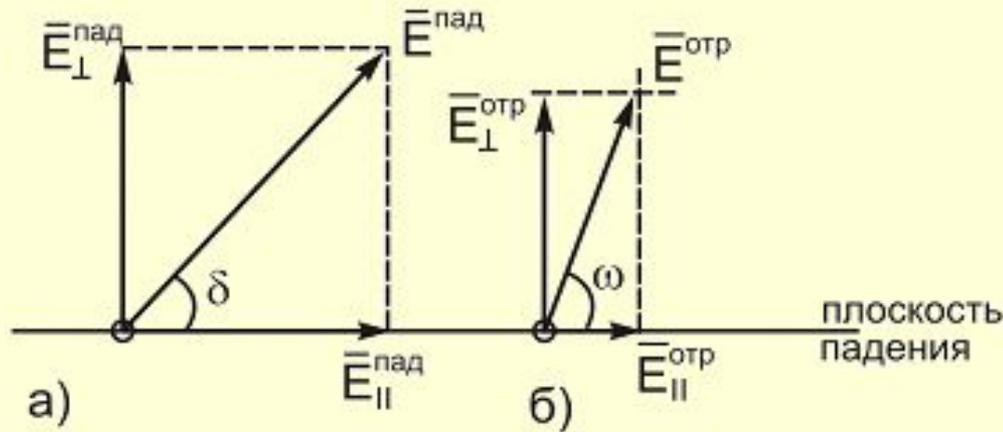
$$R_{\perp} = R_{\parallel} = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} = R_0$$

Падение света под углом
 $\alpha = \pi/2$

$$R_{\perp} = R_{\parallel} = 1$$



3. Волна поляризована в произвольном направлении



$$E_{\parallel}^{\text{пад}} = E^{\text{пад}} \cdot \cos \delta$$

$$E_{\perp}^{\text{пад}} = E^{\text{пад}} \cdot \sin \delta$$

$$I_{\parallel}^{\text{пад}} = I^{\text{пад}} \cdot \cos^2 \delta$$

$$I_{\perp}^{\text{пад}} = I^{\text{пад}} \cdot \sin^2 \delta$$

δ – азимут колебания падающей волны

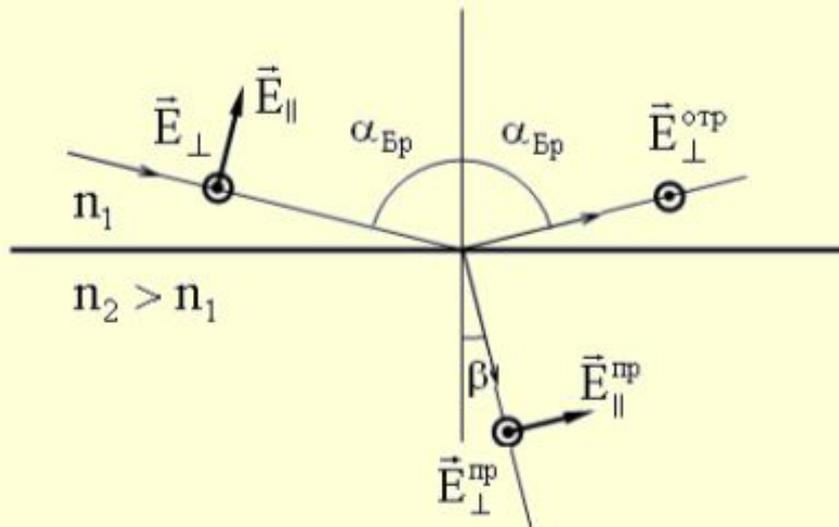
ω – азимут колебания отраженной волны

$$R_{\perp} > R_{\parallel} \implies \omega > \delta$$

$$R = \frac{I^{\text{отр}}}{I^{\text{пад}}} = \frac{I_{\perp}^{\text{отр}} + I_{\parallel}^{\text{отр}}}{I^{\text{пад}}} = \frac{I_{\perp}^{\text{пад}} R_{\perp} + I_{\parallel}^{\text{пад}} R_{\parallel}}{I^{\text{пад}}}$$

$$R_{\text{ЛПВ}} = R_{\perp} \sin^2 \delta + R_{\parallel} \cos^2 \delta$$

Закон Брюстера



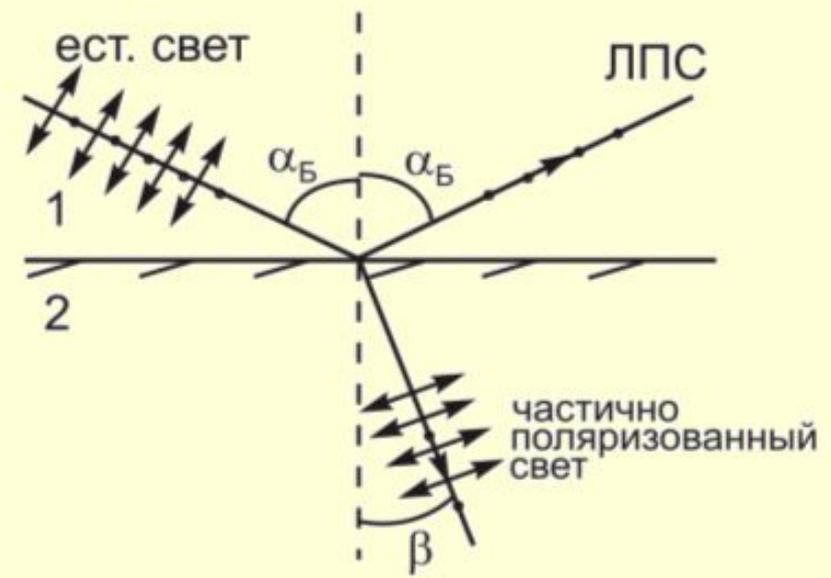
$$R_{\perp} = \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)}$$

При $(\alpha_B + \beta) = \pi/2$ $R_{\perp} = 0$

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{n_2}{n_1}$$



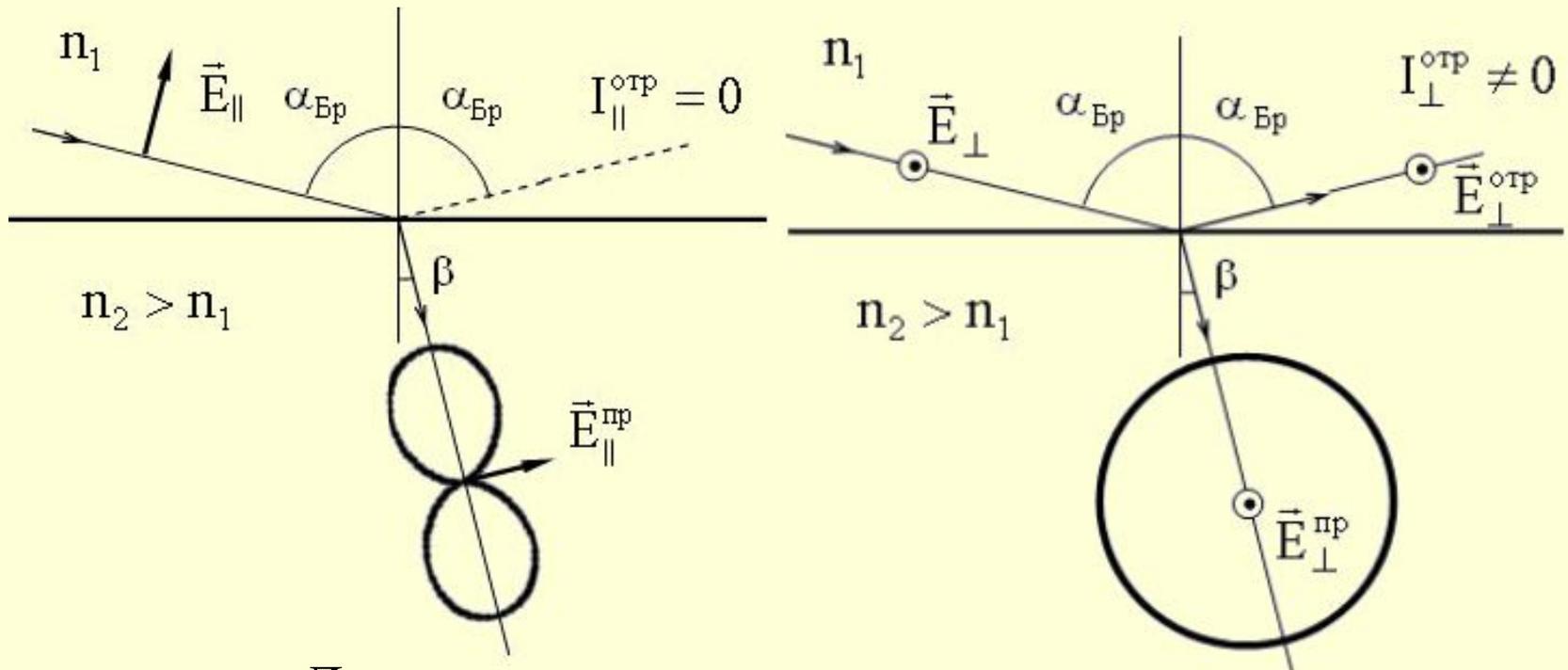
При падении света под углом Брюстера отраженный свет будет полностью поляризован в плоскости, перпендикулярной плоскости падения.



Закон Брюстера

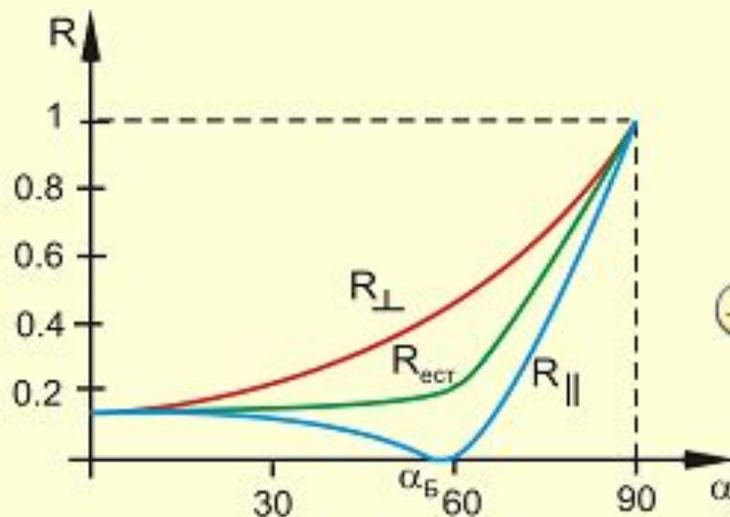
Объяснение

Отраженная световая волна появляется за счет излучения электронов среды, совершающих вынужденные колебания под действием вектора преломленной волны. $I = 0$ в направлении колебаний зарядов.



*Диаграмма направленности
излучения*

Отражение и преломление естественного света



$$I_{\text{ест}}^{\text{пад}} = I_{\perp}^{\text{пад}} + I_{\boxtimes}^{\text{пад}} \quad R_{\text{ест}} = \frac{1}{2}(R_{\perp} + R_{\boxtimes})$$

$$R_{\perp} \geq R_{\boxtimes} \longrightarrow I_{\perp}^{\text{отр}} \geq I_{\boxtimes}^{\text{отр}}$$



Частично поляризованная - волна, в которой какое-либо направление колебаний имеет преимущество по сравнению с другими

$$P = \frac{I_{\perp} - I_{\boxtimes}}{I_{\perp} + I_{\boxtimes}}$$

– степень
поляризации

Естественный свет	$I_{\perp} = I_{\boxtimes}$	$P = 0$
Отраженный свет	$I_{\perp}^{\text{отр}} \geq I_{\boxtimes}^{\text{отр}}$	$P > 0$
Преломленный свет	$I_{\perp}^{\text{отр}} \leq I_{\boxtimes}^{\text{отр}}$	$P < 0$
Отраженный под углом Брюстера	$I_{\boxtimes} = 0$	$P = 1$

Заключение

1. Перераспределение энергии между отраженным и преломленным пучками зависит от:

- угла падения;
- характера поляризации волны.

2. При отражении и преломлении может происходить изменение поляризации волны.



Полное отражение и его применение в технике

Изучается самостоятельно

О. Я Березина, С. А. Чудинова. Физический практикум. Ч. IV. Оптика: учебно-методич. пособие / – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2011. – стр. 7 - 9.