

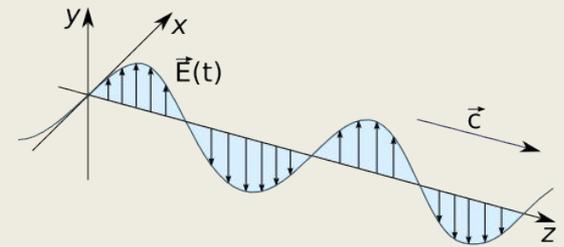
Конфуций: «Обучение
начинается, когда человек
начинает задавать вопросы.»

3. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

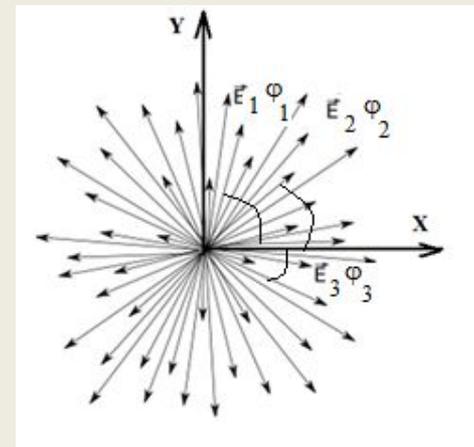
3.1 Естественный свет. Виды поляризации света

Поляризованным называется свет, в котором направления колебаний светового вектора упорядочены каким-либо образом.

Плоско-поляризованный свет – колебания вектора \mathbf{E} и направление распространения волны образуют одну плоскость, положение которой в пространстве относительно направления распространения не меняется со временем.

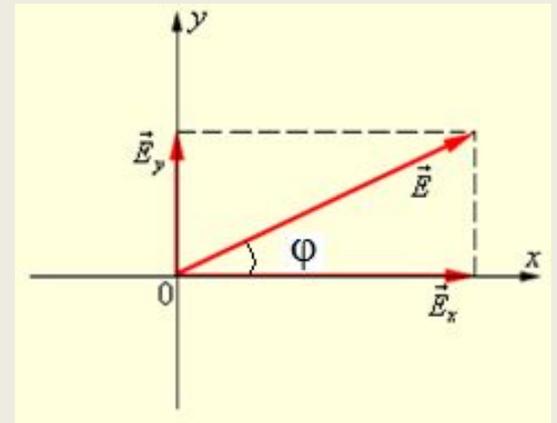


В **естественном** свете колебания разных направлений быстро и беспорядочно сменяют друг друга.



Рассмотрим две волны, в которых световой вектор совершает колебания вдоль взаимно перпендикулярных осей Ox и Oy со сдвигом фаз δ :

$$E_x = A_1 \cos(\omega t), \quad E_y = A_2 \cos(\omega t + \delta).$$



Результирующее поле является суммой исходных волновых полей, то есть

$$\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y = E_x \vec{i} + E_y \vec{j}.$$

Угол φ между \vec{E}_y и \vec{E}_x определяется так:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{E_y}{E_x} = \frac{A_2 \cos(\omega t + \delta)}{A_1 \cos(\omega t)}.$$

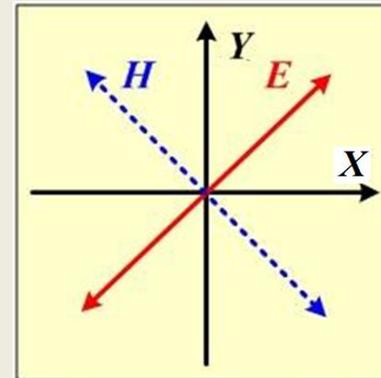
В зависимости от δ можно классифицировать виды поляризации света.

1. Если разность фаз претерпевает случайные (хаотические) изменения, то угол то есть направление светового вектора, будет испытывать скачкообразные неупорядоченные изменения.

Это означает что **естественный (неполяризованный)** монохроматический свет можно считать наложением двух некогерентных электромагнитных волн одной частоты, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях.

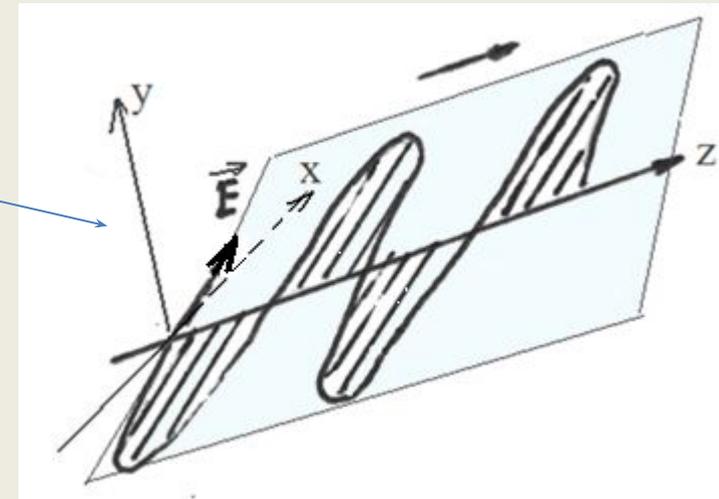
2. Если волны являются когерентными, разность фаз постоянна $\delta \quad \text{tg} \varphi = \pm \frac{A_2}{A_1} = \text{const}$
 $= 0, \pi$

Световая волна – **плоско-поляризована**.



Плоскость, в которой колеблется световой вектор в плоскополяризованной волне, называется **плоскостью колебаний (плоскостью поляризации)**.

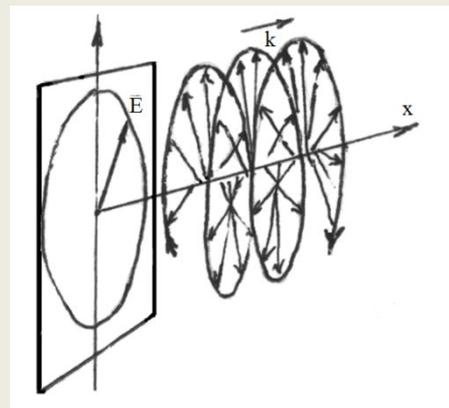
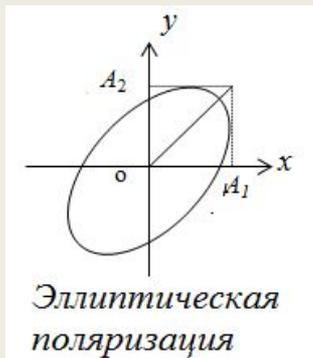
Эта плоскость образована направлением колебаний E и направлением распространения волны.



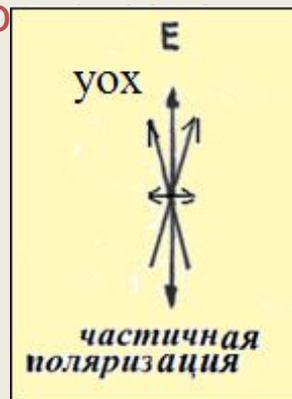
3. $\delta = \pm \frac{\pi}{2}$ и постоянна, $\text{tg } \varphi = \frac{A_2}{A_1} \text{tg } \omega t$ угол φ в процессе распространения волны

меняется все время. Вектор \vec{E} все время поворачивается относительно направления распространения с угловой скоростью ω . Это эллиптическая поляризация. Если $A_1 = A_2$ – круговая (циркулярная) поляризация.

Если смотреть навстречу волне и вращение вектора \vec{E} происходит по часовой стрелке – правосторонняя поляризация;
против часовой стрелки – левосторонняя поляризация.



4. Смешанный случай: на фоне поляризованной волны есть частично неполяризованная волна. Это частично по й свет.



Поляризация волны количественно характеризуется степенью поляризации K.

Обозначим интенсивность света, соответствующую двум взаимно перпендикулярным компонентам вектора \vec{E} , как

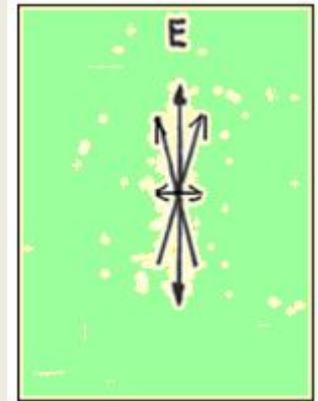
$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Естественный свет: $K = 0$, т.к. $I_{\max} = I_{\min}$.

Плоскополяризованный свет: $K = 1$, т.к. $I_{\min} = 0$.

Частично поляризованный свет: $0 < K < 1$

К эллиптически поляризованному свету эта характеристика – степень поляризации - неприменима, у него колебания вектора \vec{E} полностью упорядочены.

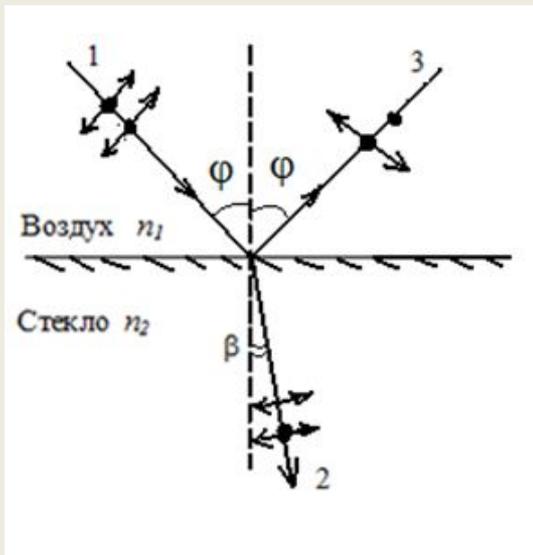


Поляризованный свет получается из естественного при его отражении от поверхности диэлектрика или прохождении через слой диэлектрика. Приборы, позволяющие получить поляризованный свет, называются поляризаторами. Простейшим поляризатором является зеркало.

3.2 Поляризация при отражении. Закон Брюстера.

При падении естественного света, например, из воздуха на поверхность стекла под произвольным углом часть света отражается, а часть преломляется и распространяется во второй среде, при этом отраженный и преломленный лучи частично поляризованы. На рис. а схематически изображены колебания светового вектора \vec{E} в падающем, отраженном и преломленном лучах при произвольном угле падения луча. Колебания , перпендикулярные плоскости падения, обозначены на рис. точками, а колебания в плоскости падения – стрелками. В падающем луче 1 естественного света равновероятны оба вида колебаний, в преломленном луче 2 преобладают колебания в плоскости падения, в отраженном луче 3 –

колебания, перпендикулярные плоскости падения.



а

(Плоскость падения – плоскость, образованная падающим, отраженным и преломленным лучами)

Существует такой угол падения φ_B , при котором

отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны (рис. *b*), при этом **отраженный луч полностью поляризован и электрический вектор в нем колеблется перпендикулярно плоскости падения**, преломленный луч тоже

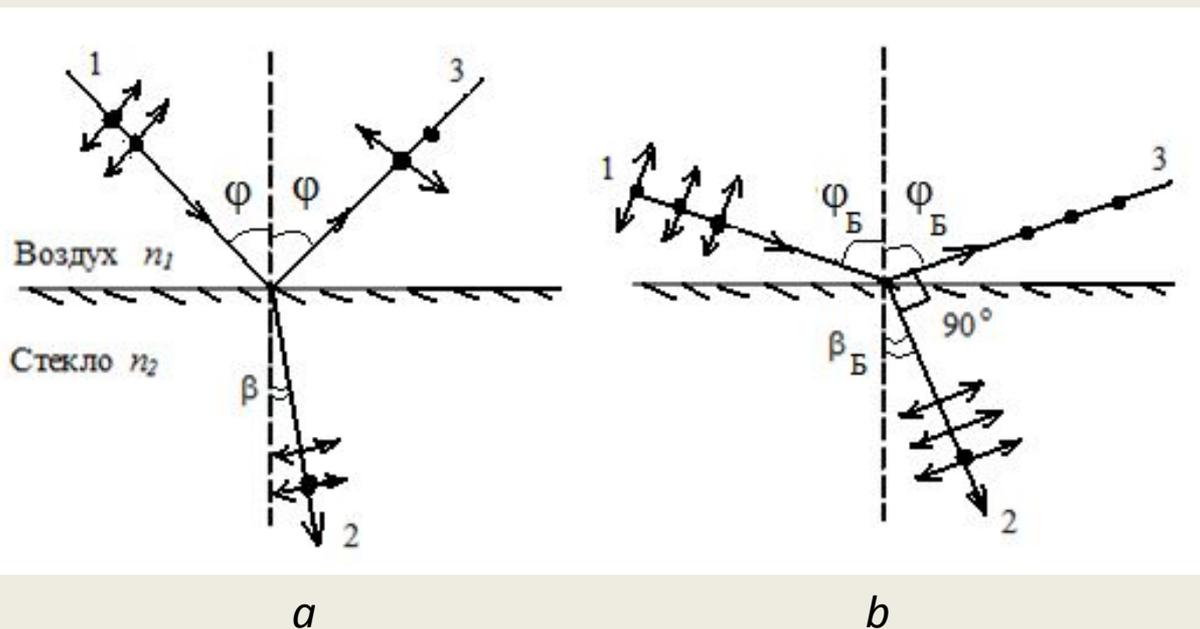
максимально поляризован.

Закон преломления света при угле падения φ_B :

$$\frac{\sin \varphi_B}{\sin \beta_B} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\varphi_B + \beta_B = \frac{\pi}{2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_B = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (3.1)$$



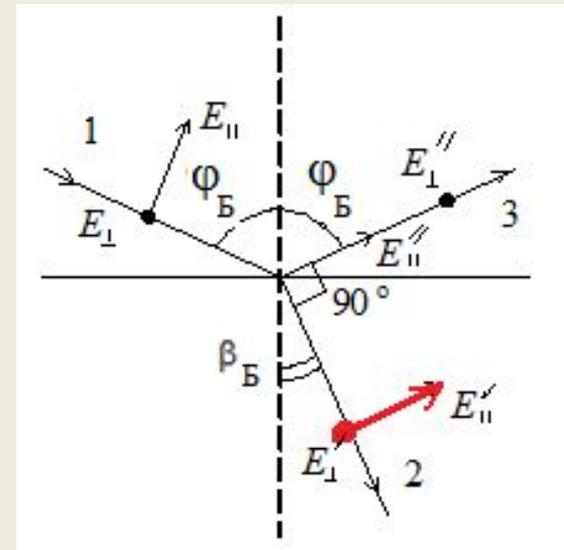
закон Брюстера (3.1): отраженный луч будет полностью поляризован, если тангенс угла падения луча на границу раздела двух сред равен относительному показателю преломления второй среды относительно первой.

φ_B - угол
Брюстера

Рассмотрим качественно **механизм поляризации света на поверхности диэлектрика.**

Запишем вектор естественного света \vec{E} в любой момент времени как векторную сумму $\vec{E} = \vec{E}_{\perp} + \vec{E}_{\parallel}$, где \vec{E}_{\perp} и \vec{E}_{\parallel} – световые векторы одинаковых по интенсивности плоско- поляризованных световых волн, колеблющиеся соответственно перпендикулярно и параллельно плоскости падения луча. Когда электромагнитное излучение попадает во вторую среду, под действием светового вектора преломленного луча 2 валентные электроны вещества начинают колебаться около положений равновесия **в направлении \vec{E}'_{\perp} , перпендикулярных этому лучу,** и \vec{E}'_{\parallel} . Вынужденные колебания электронов вещества формируют вторичное электромагнитное излучение – луч отраженного света 3.

При угле падения φ_B \vec{E}'_{\parallel} параллельна отраженному лучу и ее вклад в излучение в этом направлении равен нулю. Потому отраженный φ_B под углом φ_B луч полностью поляризован и электрический вектор в нем колеблется **перпендикулярно** плоскости чертежа.





без поляризатора



с поляризатором

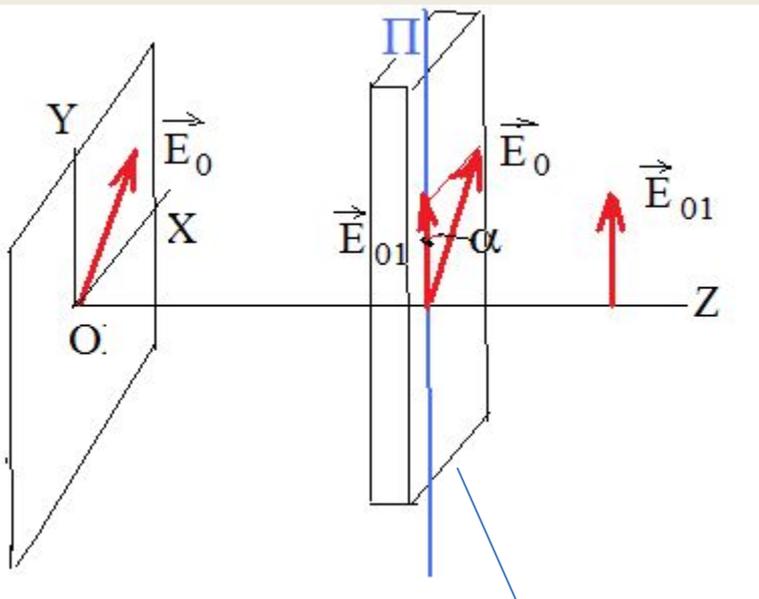
Рис. 8. Встав под углом Брюстера к оконному стеклу, вы можете с помощью поляризатора убрать отражения

Проверьте! Для стекла угол Брюстера равен 57°

3.3 Поляризация при прохождении. Закон Малюса.

Направление, вдоль которого пропускаются колебания поляризатором – это **главная плоскость поляризатора** (на рис. она обозначена как Π).

При падении плоско-поляризованного света на поляризатор через него проходит только "часть" светового вектора – проекция его на "разрешенное" направление Π (рис.):



поляризатор
р

Пусть E_0 - амплитуда светового вектора падающей волны, E_{01} - амплитуда светового вектора прошедшей волны.

$$E_{01} = E_0 \cos \alpha$$

ил
и

$$I_1 = I_0 \cos^2 \alpha \quad (3.4)$$

(3.4) – закон

Малюса
 I_0 - интенсивность падающего плоскополяризованного света;

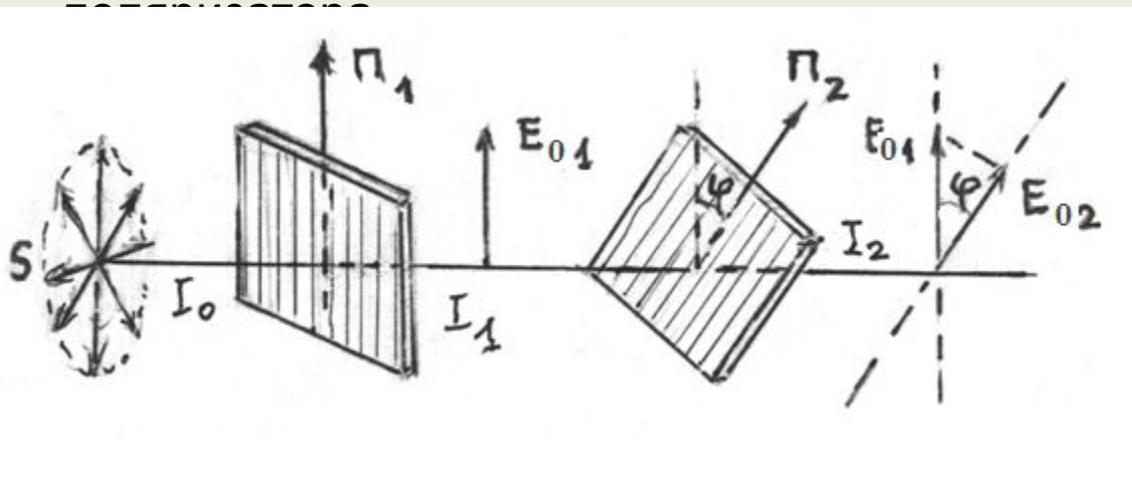
I_1 - интенсивность прошедшего света;

α - угол между плоскостью поляризатора и вектором \vec{E} в исходной волне.

Анализатор – 2-й поляризатор , который ставят за 1-м поляризатором для анализа света.

Поставим на пути естественного света два поляризатора, плоскости которых скрещены под углом φ .

Интенсивность света после первого



$$I_1 = E_{01}^2 = E_0^2 \left\langle \cos^2 \alpha \right\rangle = \frac{I_0}{2} = \frac{1}{2} (n_{pu} t \gg T)$$

Амплитуда вектора \vec{E} после второго поляризатора:

$$E_{02} = E_{01} \cos \varphi$$

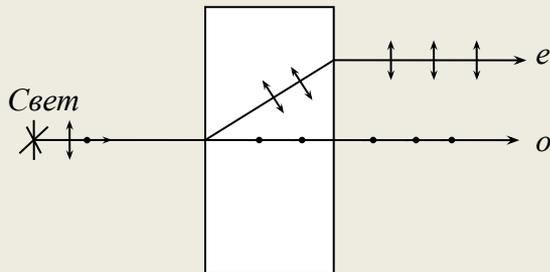
Интенсивность света после второго поляризатора:

$$I_2 = E_{02}^2 = E_{01}^2 \cos^2 \varphi = \frac{I_0}{2} \cos^2 \varphi$$

Оптические поляризаторы изготавливают из **анизотропных кристаллов**.

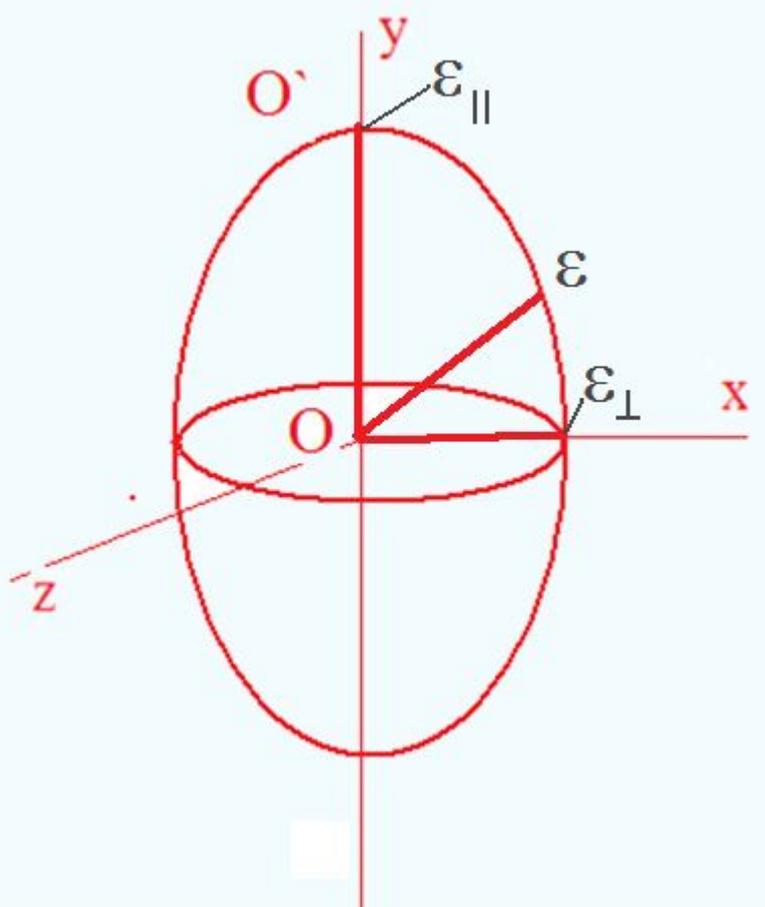
3.4 Распространение света в анизотропной среде. Двойное лучепреломление.

При прохождении света через все прозрачные кристаллы, за исключением принадлежащих к кубической системе, наблюдается явление, получившее название **двойного лучепреломления**. Это явление заключается в том, что упавший на кристалл луч разделяется внутри кристалла на два плоскополяризованных луча, распространяющихся с разными скоростями и в различных направлениях. Эти два луча называются **обыкновенным** – обозначается буквой *o* и **необыкновенным** – обозначается буквой *e*. Обыкновенный луч подчиняется закону преломления, он лежит в плоскости падения. Необыкновенный луч не лежит, как правило, в плоскости падения. Кроме того, \vec{E}_0 \perp \vec{E}_e . Примером таких кристаллов могут служить: **исландский шпат, кварц, турмалин**.



\vec{E}_e - лежит в плоскости
падающего.
 \vec{E}_o - перпендикулярен плоскости
падающего.

Оптическая ось кристалла – это определенное направление в кристалле, вдоль которого обыкновенный и необыкновенный лучи распространяются, не разделяясь и с одинаковой скоростью. **Оптическая ось** – не линия, а направление, и может быть проведена через любую точку кристалла.



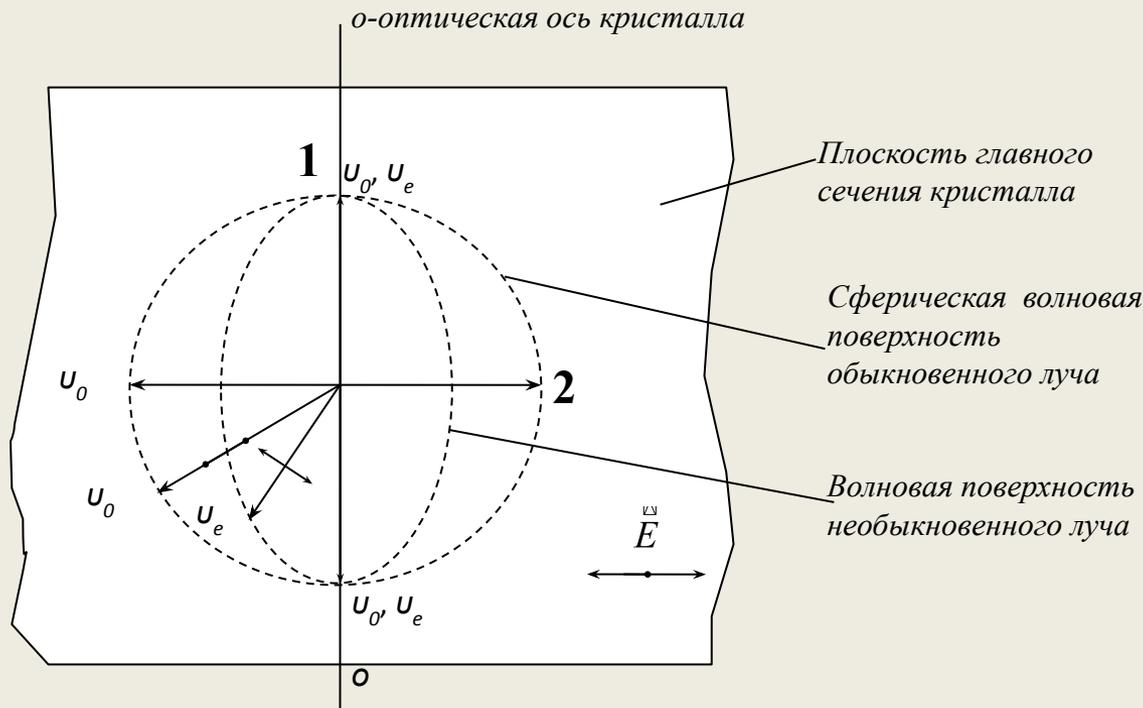
Типичным примером анизотропной среды являются наиболее простые по строению одноосные кристаллы.

У одноосных кристаллов физические свойства обладают симметрией вращения (OO') относительно направления, называемого оптической осью

Так, диэлектрическая проницаемость ϵ , отложенная по различным направлениям из начала координат, образует воображаемый эллипсоид:
 $\epsilon_{||} \neq \epsilon \neq \epsilon_{\perp}$

$n = \sqrt{\epsilon}$, $v = \frac{c}{n}$ - фазовая скорость электромагнитных волн в таких кристаллах будет по разным направлениям разная.

Главное сечение или **главная плоскость кристалла** – любая плоскость, проходящая через оптическую ось.



⊕ $v_o > v_e$ $n_o < n_e$ оптически положительный кристалл

$$n = \sqrt{\varepsilon}, \quad \varepsilon = \varepsilon(\varepsilon_{\perp}, \varepsilon_{11})$$

$$n = \frac{c}{v} \quad n_o = \frac{c}{v_o} \quad n_e = \frac{c}{v_e}$$

По форме волновой поверхности необыкновенного луча различают кристаллы :

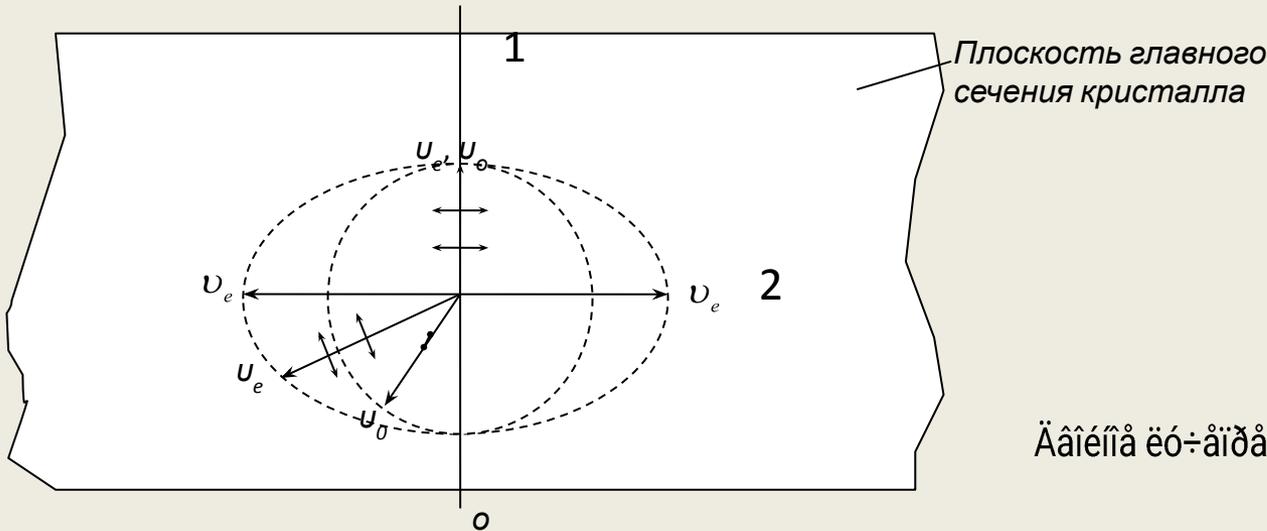
оптически положительные, $v_o < v_e$, $n_o < n_e$;
 оптически отрицательные, $v_o > v_e$, $n_o > n_e$.

v_o – скорость световой волны в обыкновенном луче. Так как в обыкновенном луче колебания светового вектора происходят в направлении, перпендикулярном к главному сечению кристалла, поэтому при любом направлении обыкновенного луча вектор образует с оптической осью кристалла прямой угол, и скорость световой волны будет одна и та же

$$v_o = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{\perp}}}$$

Для обыкновенного луча имеем сферическую волновую поверхность.

o-оптическая ось кристалла



Ääíéíá éó÷áíðäéíëéáíèå â èñèáíáñèí ðíàðå.avi

$v_o < v_e$ $n_o > n_e$ оптически отрицательный кристалл

Колебания в необыкновенном луче совершаются в главном сечении. Поэтому для разных лучей направления колебаний вектора образуют с оптической осью разные углы α . Для необыкновенного луча $\alpha = \frac{\pi}{2}$, угол

вследствие чего скорость имеет значение равн $v_e = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{11}}}$.

$v_e = v_o = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\perp}}}$, а для необыкновенного луча 2 угол $\alpha=0$ и скорость

Можно доказать, что волновая поверхность необыкновенного луча представляет эллипсоид вращения. В местах пересечения с оптической осью кристалла этот эллипсоид и сфера, построенная для обыкновенных лучей, соприкасаются.

ФАКУЛЬТАТИВ (Опыт сделай сам!) . Наблюдение пластмассовых тел через поляроид

Вам потребуется только один поляроид — роль второго будет выполнять сам объект исследования. И растягивать образец вам не нужно: напряжение и связанная с ним оптическая анизотропия появились в образце изначально, при его изготовлении.

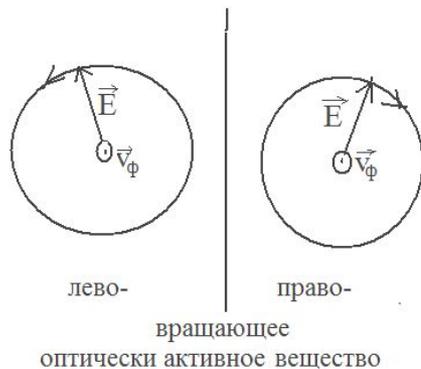
Объектом исследования может служить любая прозрачная пластмассовая деталь со стенками или линейка. Возьмите, например, коробку от аудиокассеты, поместите ее на темном фоне (подставке) и осветите лампой примерно под углом Брюстера — через поляроид вы будете наблюдать красивые цветные узоры. Эти узоры обычно сгущаются вблизи углов и кромок, швов и отверстий (см., например,



Такого рода оптические наблюдения позволяют выявить напряжения в деталях машин и конструкций на прозрачных моделях сложной формы, подвергнутых механическим деформациям.

3.6 ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ (ПЛОСКОСТИ КОЛЕБАНИЙ)

Существуют **оптически-активные вещества (ОАВ)**, обладающие **способностью поворачивать плоскость световых колебаний** проходящего через них света. (Твердые - кристаллические (кварц) и аморфные вещества, и жидкие - раствор сахара в воде, скипидар). Вещества отличаются асимметричным строением молекул, обычно встречаются в 2-х модификациях - право- и левовращающие (например, тростниковый сахар и свекольный сахар). Молекулы одного вида есть зеркальное отражение молекул другого вида .



Лево- и право- вращающие оптически активные вещества.

Угол поворота плоскости поляризации для твердых веществ:

$$\varphi = \alpha l,$$

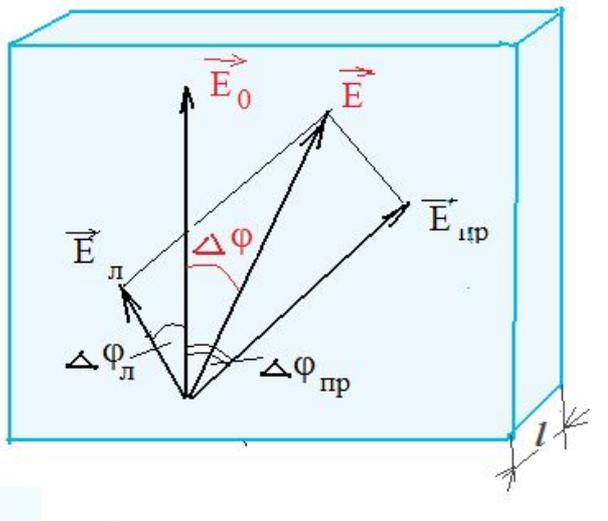
Где l - путь света в веществе, α – постоянная вращения.

Для растворов: $\varphi = \psi_0 c l,$

где c - концентрация раствора,
 ψ_0 - удельное вращение плоскости поляризации.

Теория Френеля объясняет явление поворота плоскости поляризации ОАВ на основе волновых представлений. Согласно ей, плоско-поляризованный луч, входя в вещество, распадается на два луча, поляризованных по кругу. При этом в веществе скорость лучей, поляризованных по кругу, различна. На выходе из вещества лучи складываются и дают вновь плоско поляризованный свет.

Рассмотрим случай, когда плоскополяризованная волна с амплитудой светового вектора E_0 и циклической частотой ω проходит слой толщиной l , в котором фазовая скорость лево - поляризованного света больше, чем право-поляризованного: $v_{\phi л} > v_{\phi пр}$



$$\Delta t = \frac{l}{v_{\phi}}$$

$$\Delta t_{л} < \Delta t_{пр}, \quad \omega = const$$

$$\Delta \varphi = \omega \Delta t$$

$$\Delta \varphi_{л} < \Delta \varphi_{пр}$$

В результате плоскость поляризации при выходе из ОАВ **поворачивается вправо**:

$$\Delta \varphi = \Delta \varphi_{пр} - \Delta \varphi_{л}$$

Вывод теории: Поворот плоскости поляризации света при прохождении ОАВ обусловлен разными скоростями в этом веществе поляризованных по кругу лучей