

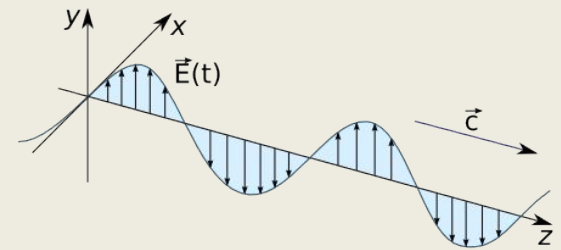
Конфуций: «Обучение  
начинается, когда человек  
начинает задавать вопросы.»

# 3. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

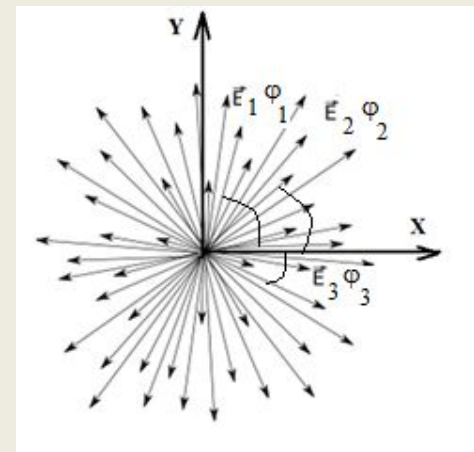
## 3.1 Естественный свет. Виды поляризации света

**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.

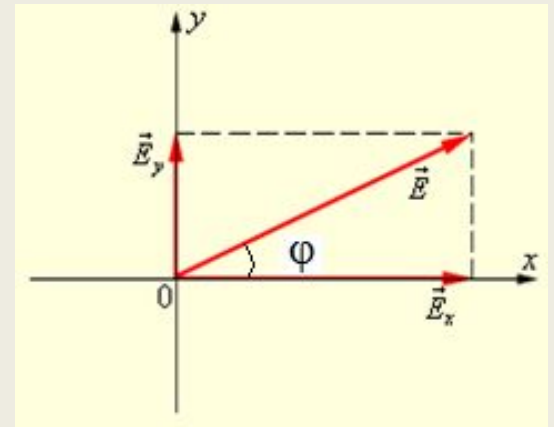


В **естественном** свете колебания разных направлений быстро и беспорядочно сменяют друг друга.



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

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



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  $\varphi$  между  $\vec{E}_y$  и  $\vec{E}_x$  определяется так:

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

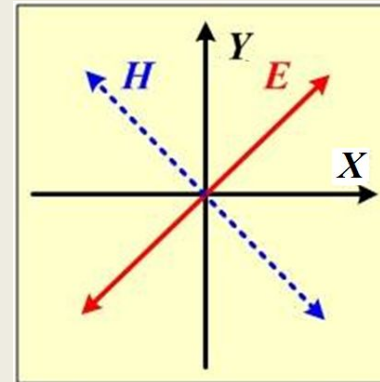
В зависимости от  $\delta$  можно классифицировать виды поляризации света.

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.

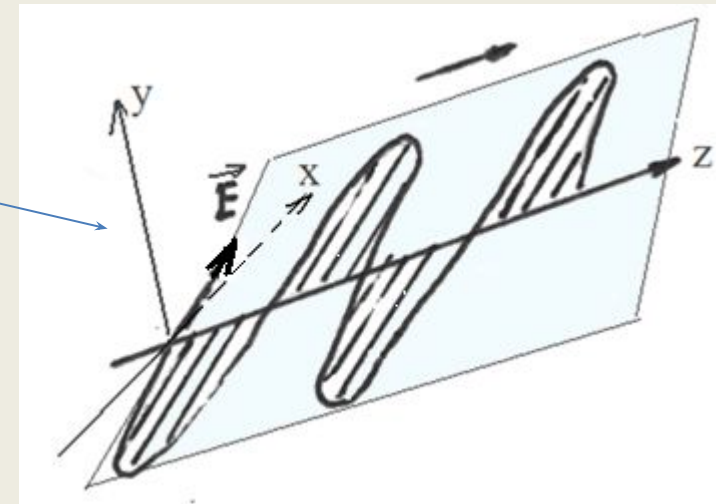
2. Если волны являются когерентными, разность фаз постоянна  $\delta \quad \text{tg} \varphi = \pm \frac{A_2}{A_1} = \text{const}$   
 $= 0, \pi$

Световая волна – **плоско-поляризована**.



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

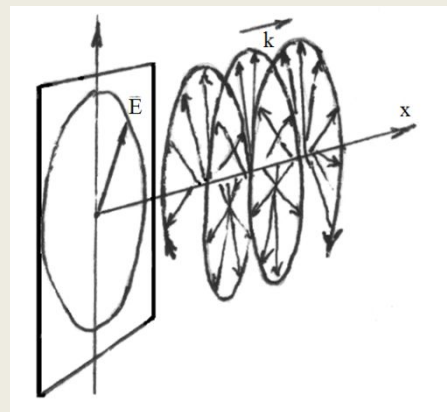
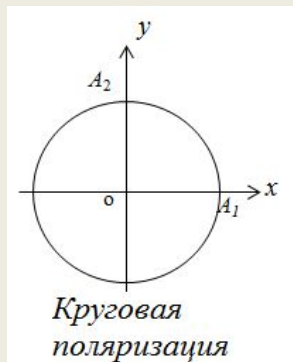
Эта плоскость образована направлением колебаний E и направлением распространения волны.



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

меняется все время. Вектор  $\vec{E}$  все время поворачивается относительно направления распространения с угловой скоростью  $\omega$ . 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

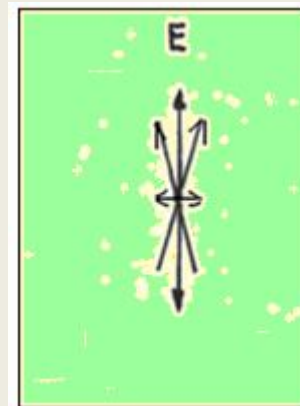
$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

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.

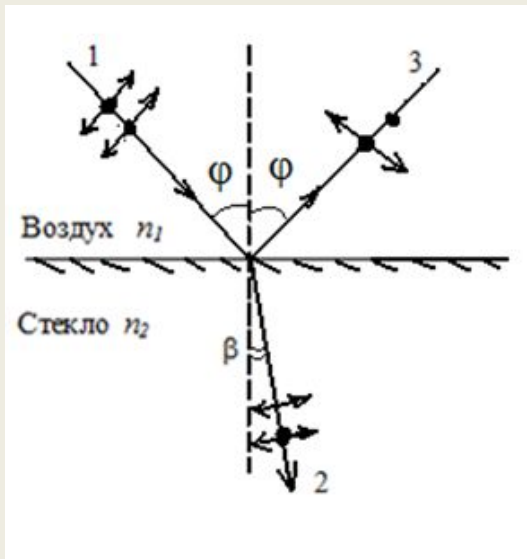


Поляризованный свет получается из естественного при его отражении от поверхности диэлектрика или прохождении через слой диэлектрика. Приборы, позволяющие получить поляризованный свет, называются поляризаторами. Простейшим поляризатором является зеркало.

## 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 –



а

колебания, перпендикулярные плоскости падения.

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

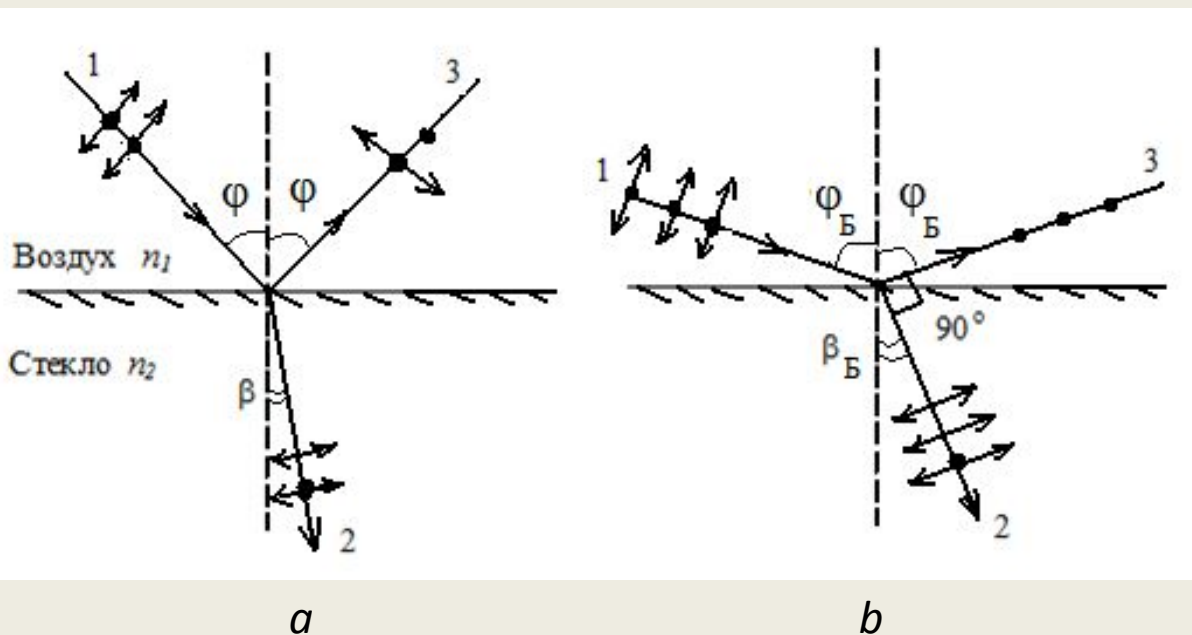
Существует такой угол падения  $\varphi_B$ , при котором

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  $\varphi_B$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sin \varphi_B}{\sin \beta_B} &= \frac{n_2}{n_1} \\ \varphi_B + \beta_B &= \frac{\pi}{2} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} & \\ & \end{aligned} \left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_B &= \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \end{aligned} \right\} (3.1)$$



**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.

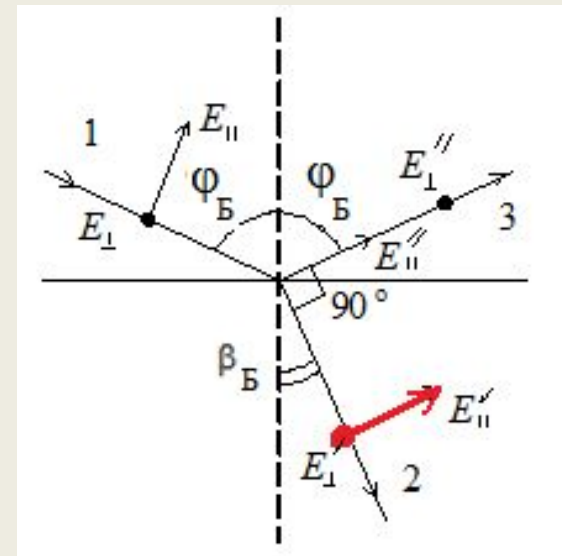
$\varphi_B$  - угол  
Брюстера



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





без поляризатора



с поляризатором

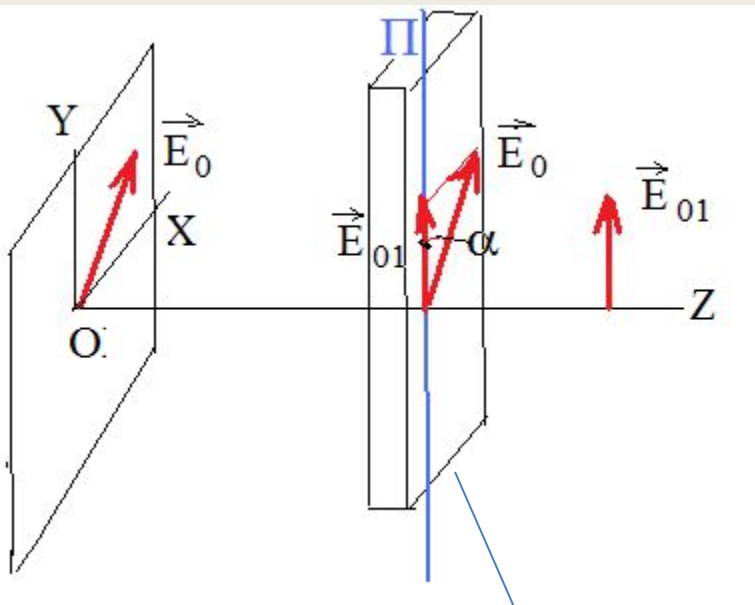
*Рис. 8. Встав под углом Брюстера к оконному стеклу, вы можете с помощью поляризатора убрать отражения*

Проверьте! Для стекла угол Брюстера равен  $57^{\circ}$

### 3.3 Поляризация при прохождении. Закон Малюса.

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

При падении плоско-поляризованного света на поляризатор через него проходит только "часть" светового вектора – проекция его на "разрешенное" направление  $\Pi$  (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;

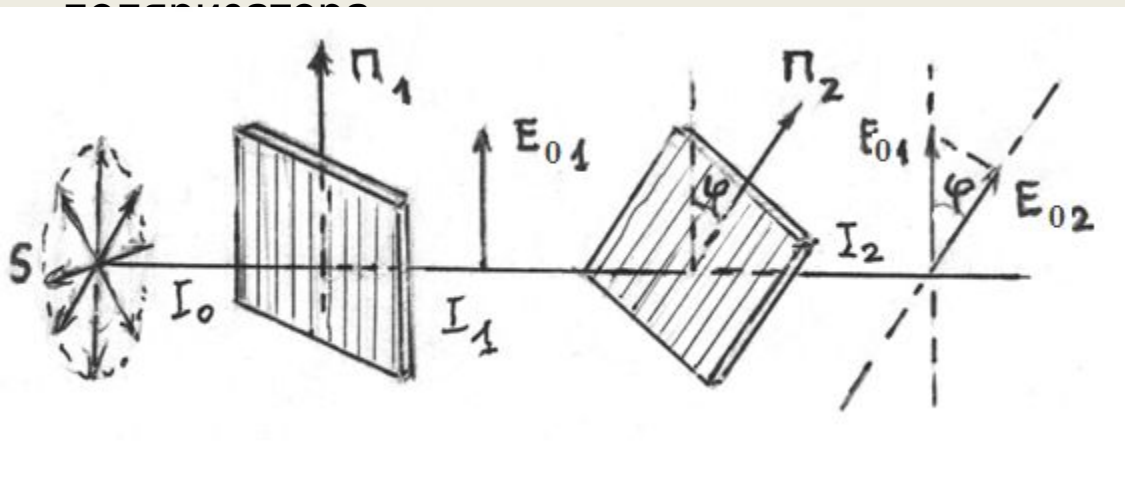
$I_1$  - интенсивность прошедшего света;

$\alpha$  - 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  $\varphi$ .

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:

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

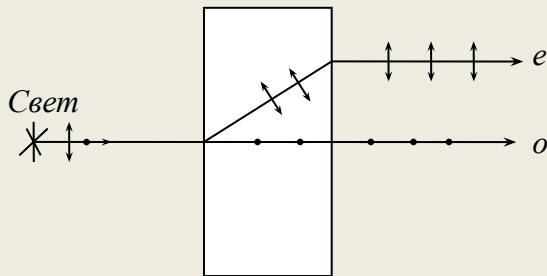
Интенсивность света после второго поляризатора:

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

Оптические поляризаторы изготавливают из **анизотропных кристаллов**.

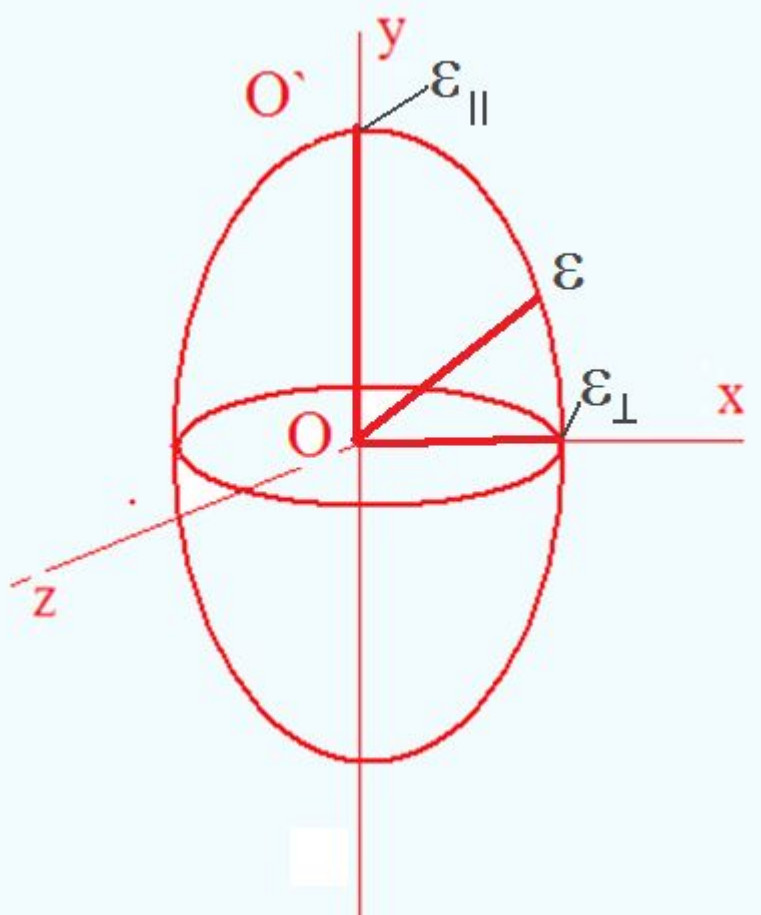
## 3.4 Распространение света в анизотропной среде. Двойное лучепреломление.

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.



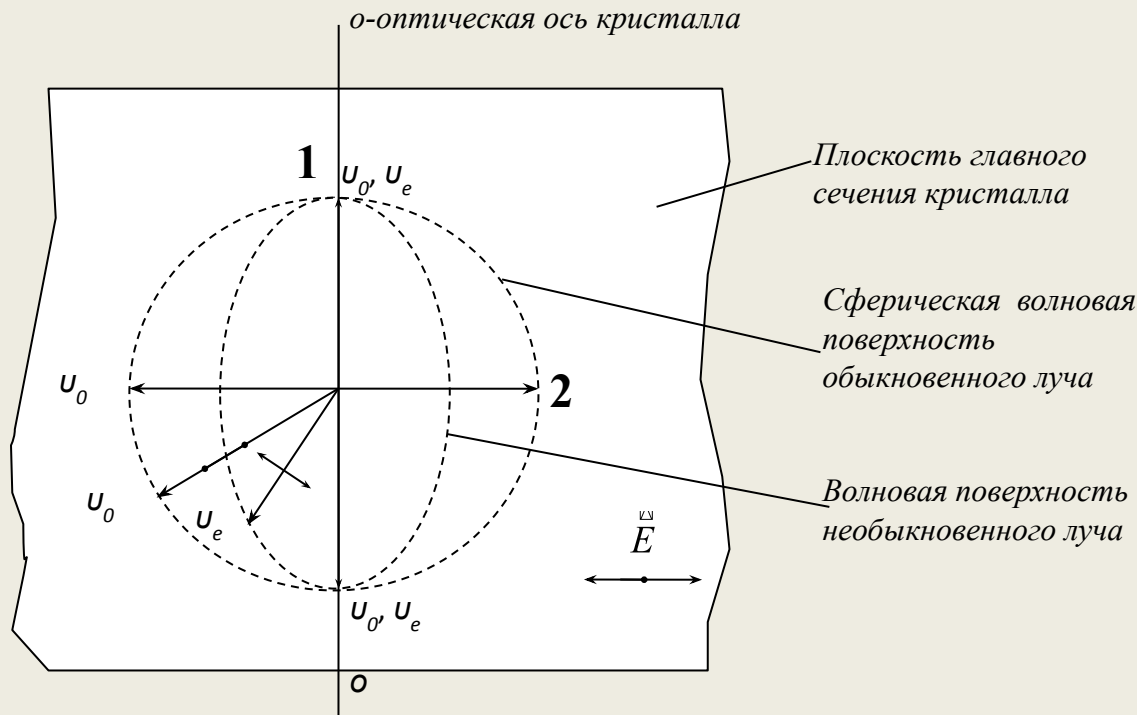
Типичным примером анизотропной среды являются наиболее простые по строению одноосные кристаллы.

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

Так, диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , 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

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

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

По форме волновой поверхности необыкновенного луча различают кристаллы :

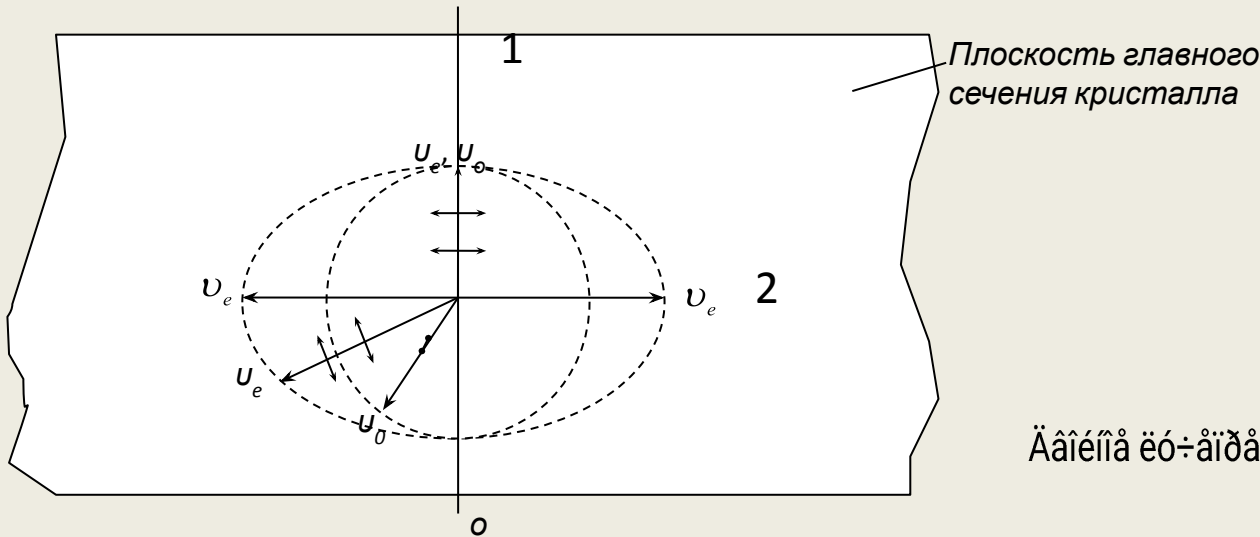
**оптически положительные**  $v_o < v_e$   $n_o < n_e$ ;  
**оптически отрицательные**  $v_o > v_e$   $n_o > n_e$ .

$v_o$  – 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



Плоскость главного сечения кристалла



Ääíéíá éó÷áíðäéíëéáíèå â èñèáíáñèí ðíàòå.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  $\alpha$ . Для необыкновенного луча 1 угол  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ,

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.

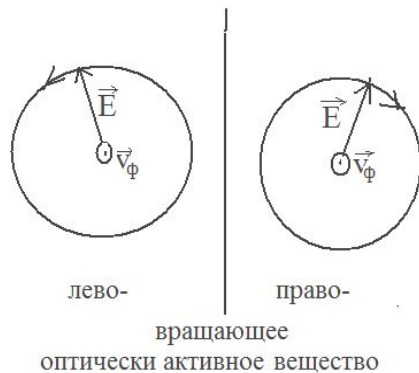
Объектом исследования может служить любая прозрачная пластмассовая деталь со стенками или линейка. Возьмите, например, коробку от аудиокассеты, поместите ее на темном фоне (подставке) и осветите лампой примерно под углом Брюстера — через поляроид вы будете наблюдать красивые цветные узоры. Эти узоры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

$$\varphi = \alpha l,$$

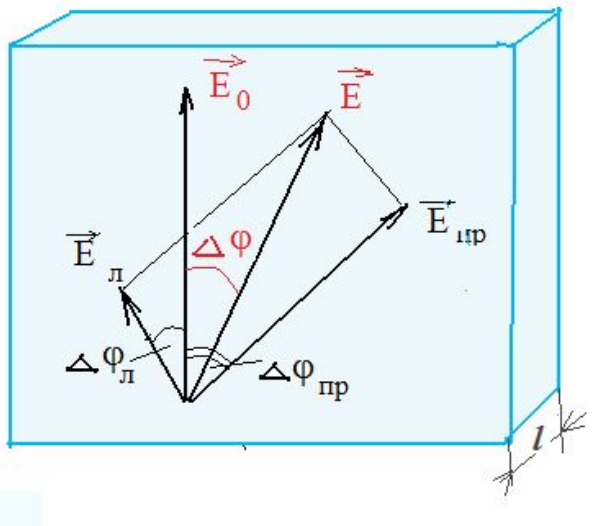
Где  $l$  - путь света в веществе,  $\alpha$  – постоянная вращения.

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

где  $c$  - концентрация раствора,  
 $\psi_0$  - 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  $\omega$  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