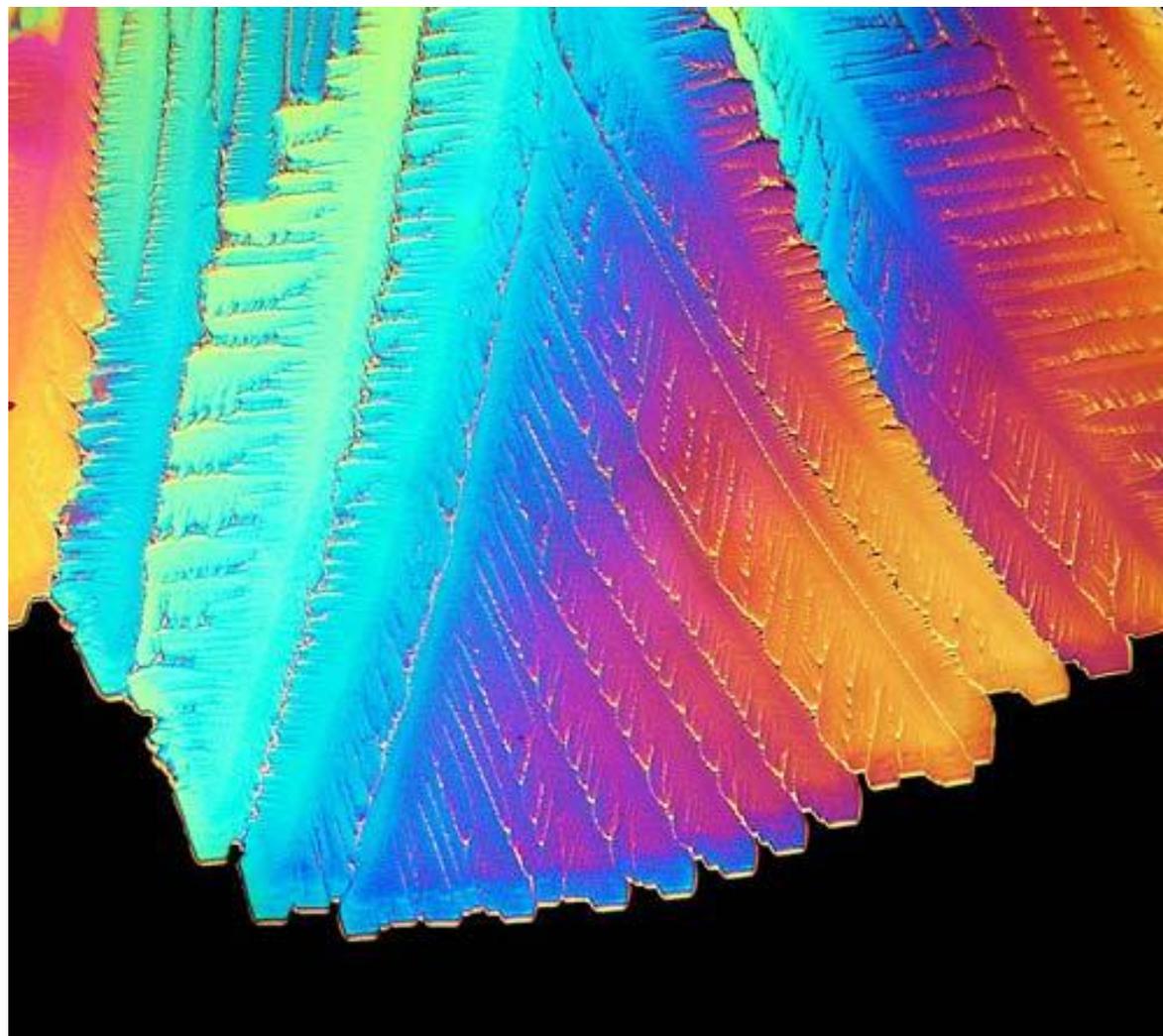
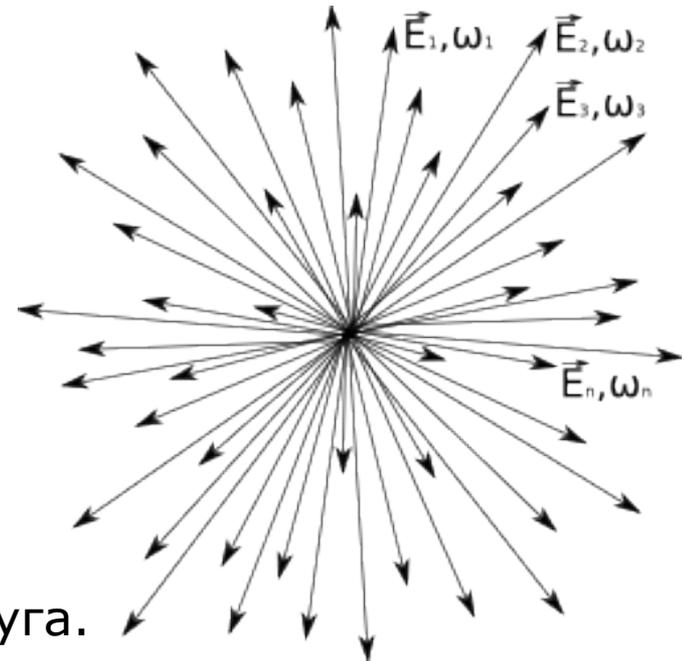
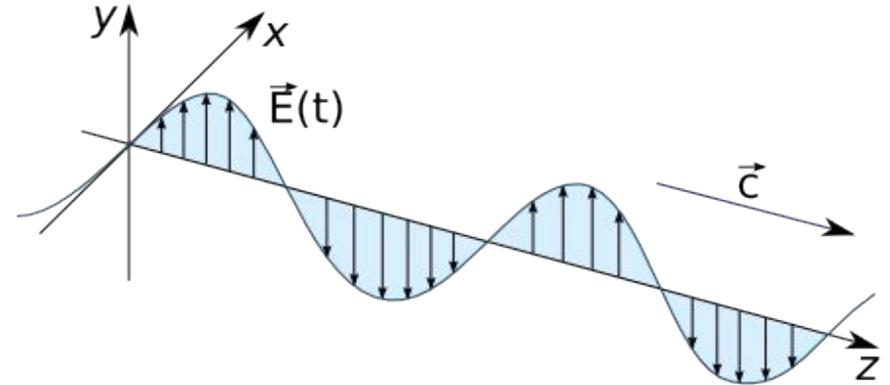
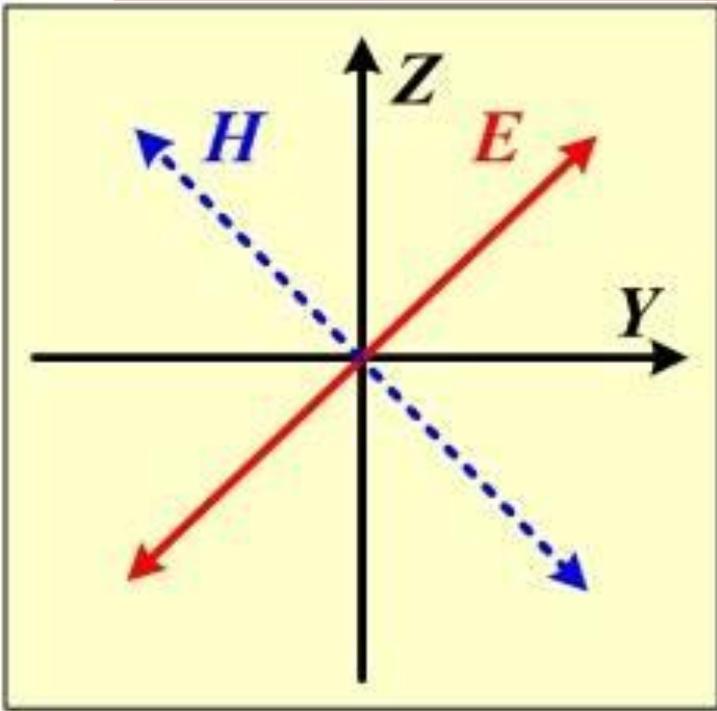


# ТЕМА ХХХІІ. ПОЛЯРИЗАЦІЯ

---



# 1. ЕСТЕСТВЕННЫЙ И ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ



Поляризованным называется свет, в котором направления колебания светового вектора упорядочены каким-либо образом. В естественном свете колебания разных направлений быстро и беспорядочно сменяют друг друга.

# 2. ЕСТЕСТВЕННЫЙ СВЕТ

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

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

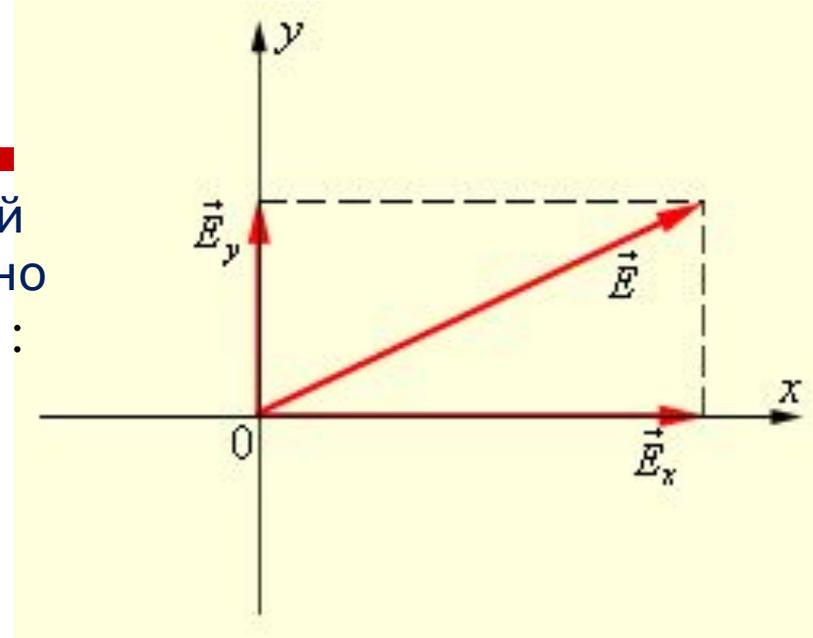
Результирующее поле является суммой исходных волновых полей, то есть

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

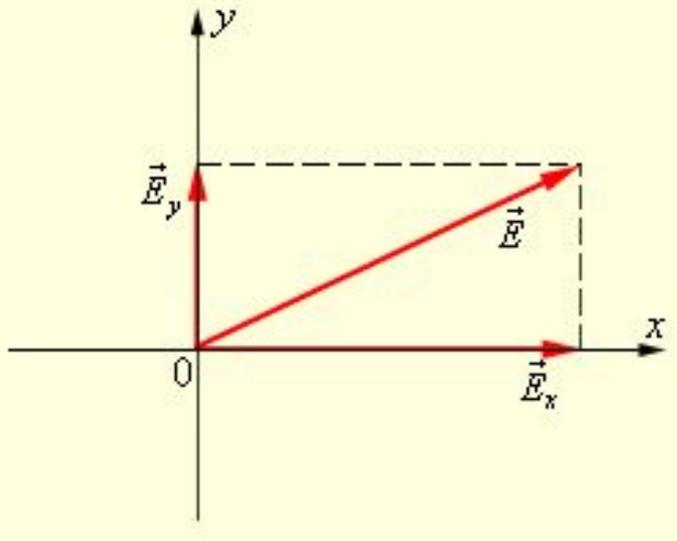
Угол  $\varphi$  между  $\vec{E}$  и  $\vec{E}_x$  определяется так:  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{E_y}{E_x} = \frac{A_2 \cos(\omega t + \delta)}{A_1 \cos(\omega t)}$ .

Если разность фаз  $\delta$  претерпевает случайные (хаотические) изменения, то и угол  $\varphi$ , то есть направление светового вектора, будет испытывать скачкообразные неупорядоченные изменения.

Это означает что естественный (неполяризованный) свет можно считать наложением двух некогерентных электромагнитных волн одной частоты, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях и имеющих одинаковую интенсивность света.



# 3. ПЛОСКОПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ



Допустим, что световые волны

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

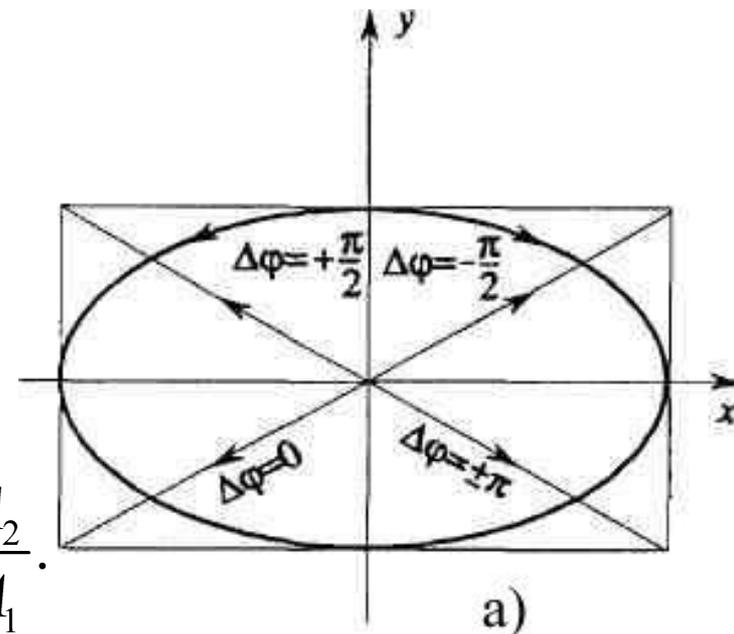
когерентны, причем сдвиг фаз  $\delta \equiv \Delta\varphi = 0, \pm\pi$ .

Тогда 
$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{A_2 \cos(\omega t + \delta)}{A_1 \cos(\omega t)} = \pm \frac{A_2}{A_1} = \text{const.}$$

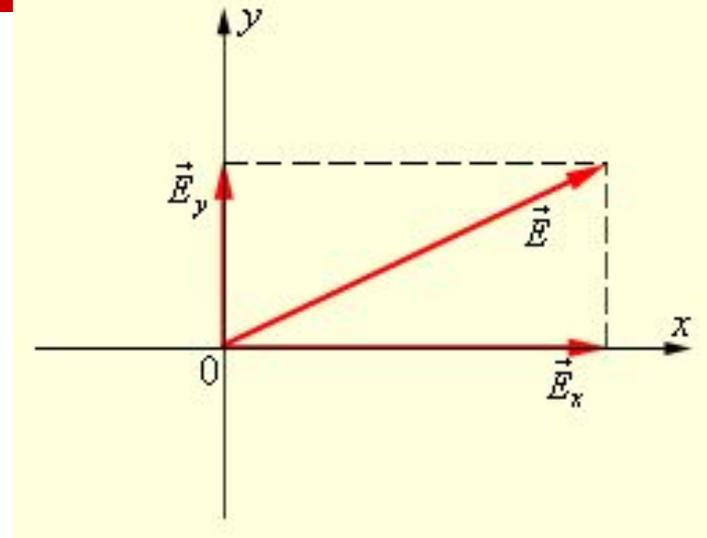
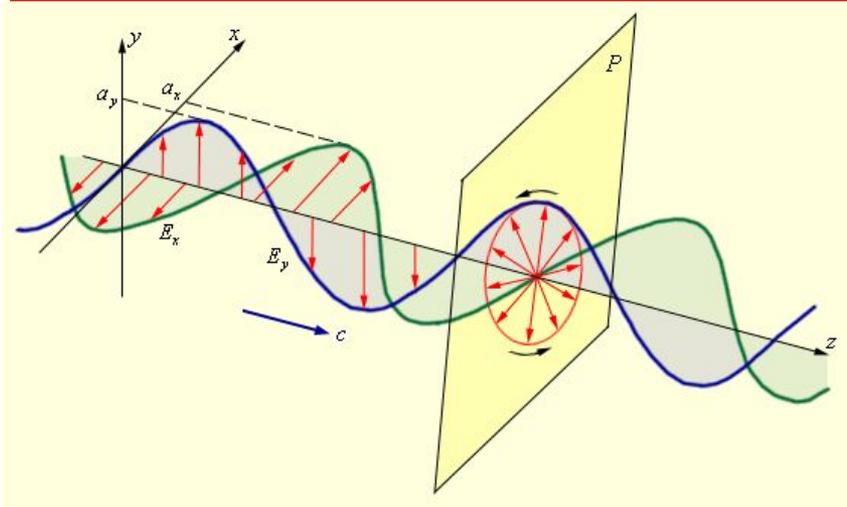
Полученный результат означает, что результирующее колебание совершается в фиксированном направлении - волна оказывается плоскополяризованной или линейнополяризованной.

Если  $\delta \equiv \Delta\varphi = 0 \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi = \frac{A_2 \cos(\omega t)}{A_1 \cos(\omega t)} = \frac{A_2}{A_1}$ .  
(первая-третья четверти)

Если  $\delta \equiv \Delta\varphi = \pm\pi \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi = \frac{-A_2 \sin(\omega t)}{A_1 \cos(\omega t)} = -\frac{A_2}{A_1}$ .  
(вторая-четвертая четверти)



# 4. СВЕТ ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ ПО КРУГУ



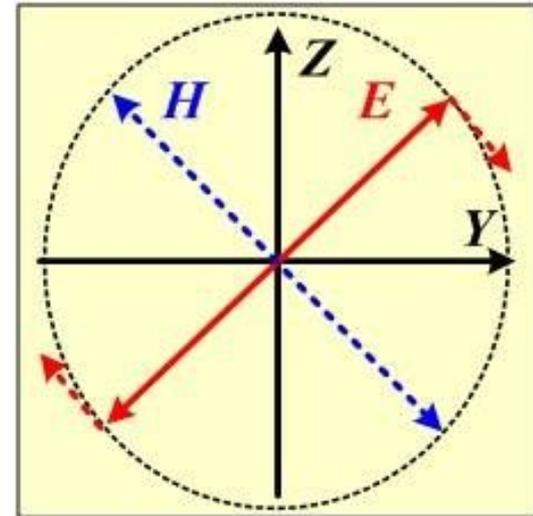
Допустим, что световые волны

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

когерентны, причем  $A_1 = A_2$  и сдвиг фаз  $\delta = \pm \pi/2$ .

$$\text{Тогда } \operatorname{tg} \varphi = \frac{E_y}{E_x} = \frac{A_2 \cos(\omega t \pm \pi/2)}{A_1 \cos(\omega t)} = \mp \frac{\sin(\omega t)}{\cos(\omega t)} = \mp \operatorname{tg}(\omega t).$$

Этот результат означает, что плоскость колебаний поворачивается вокруг направления луча с угловой скоростью, равной частоте колебаний.

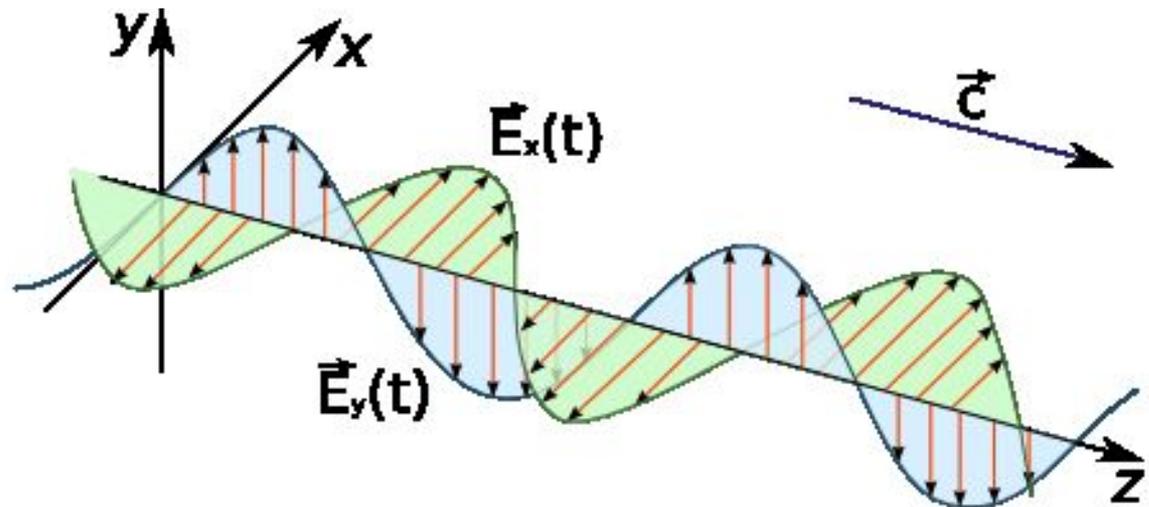
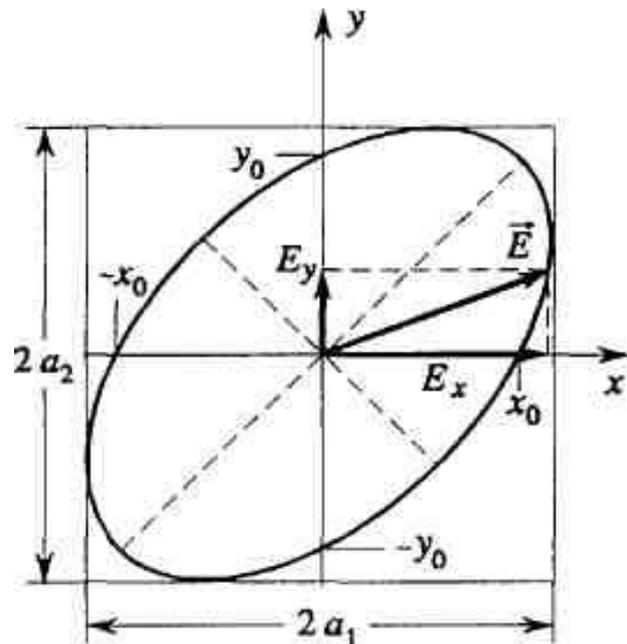


# 5. ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ

Две когерентные линейно поляризованные световые волны, плоскости колебаний которых взаимно перпендикулярны, при наложении друг на друга дают в общем случае эллиптически поляризованную волну.

При произвольной разности фаз между волнами эллипс, описываемый световым вектором, «не приведен к координатным осям».

При разности фаз  $\delta = \pm \pi/2$  и произвольных амплитудах полуоси эллипса совпадают с осями координат. При равенстве амплитуд эллипс вырождается в окружность.

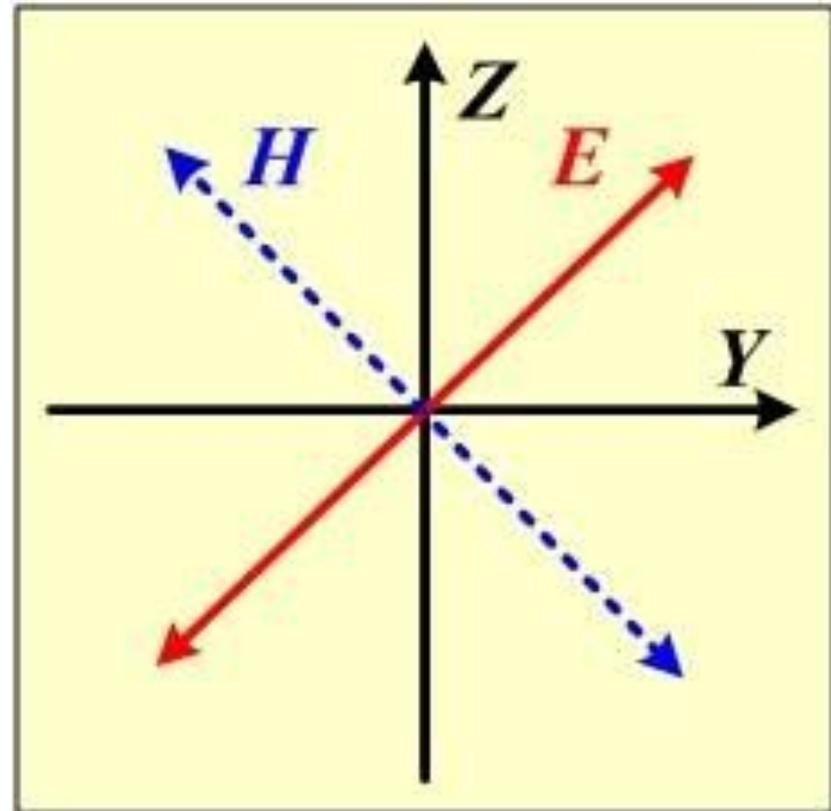
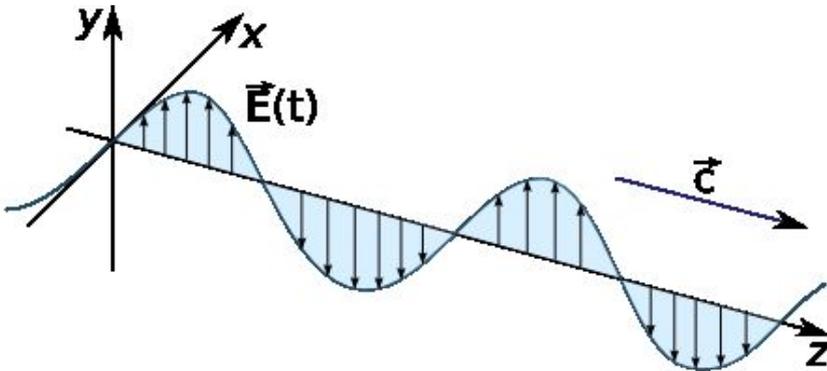


# 6. ПЛОСКОСТЬ КОЛЕБАНИЙ. ПЛОСКОСТЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ

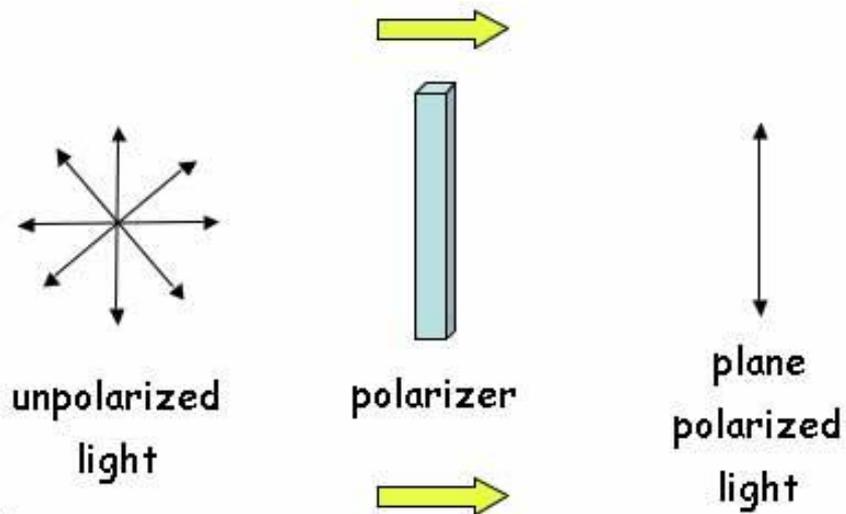
Плоскость, в которой колеблется световой вектор в плоскополяризованной волне, называется плоскостью колебаний.

Плоскостью поляризации называется плоскость, проходящая через световой луч и перпендикулярная плоскости, в которой совершает колебания световой вектор.

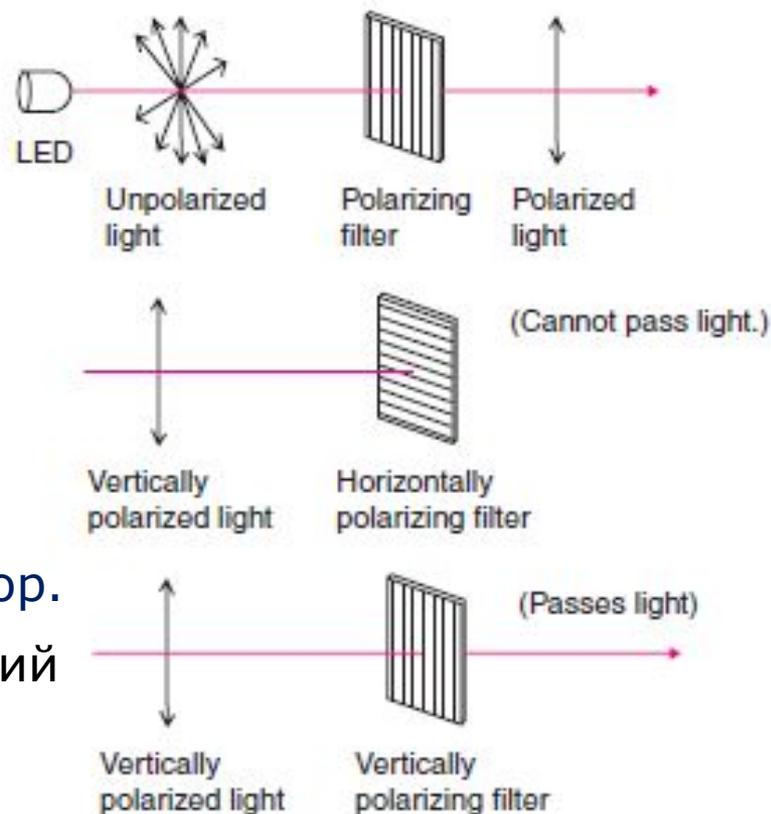
В плоскости поляризации волны колебания совершает напряженность магнитного поля волны.



# 7. ПОЛЯРИЗАТОР



Плоскополяризованный свет можно получить из естественного с помощью прибора, называемого поляризатором.



Поляризаторы свободно пропускают колебания, параллельные плоскости, называемой плоскостью поляризатора.

Колебания, перпендикулярные плоскости поляризатора не пройдут через поляризатор.

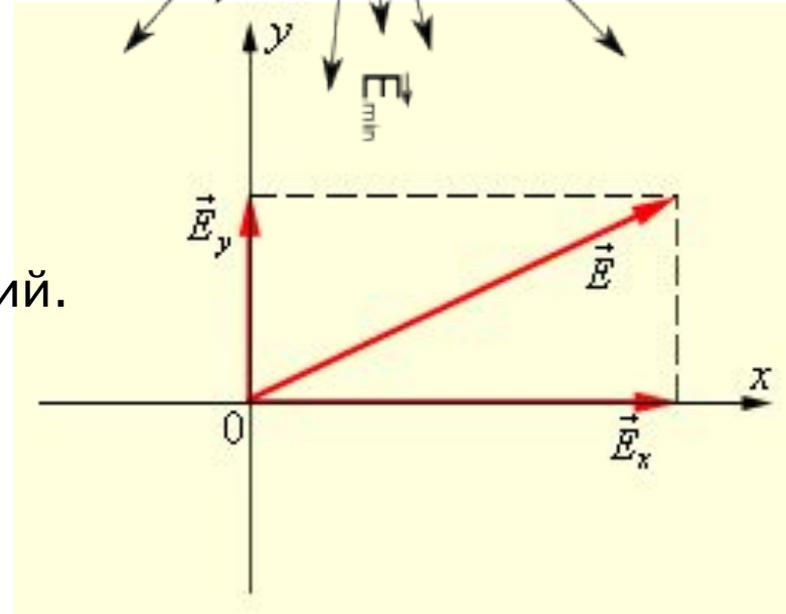
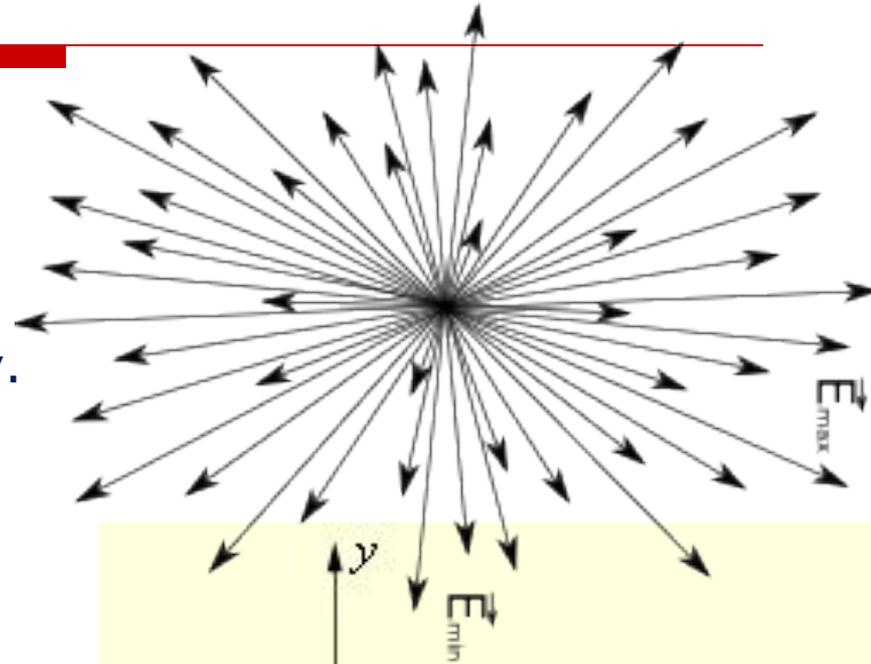
Поляризатор лишь частично задерживающий колебания, перпендикулярные к его плоскости, называется несовершенным.

# 8. ЧАСТИЧНО ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ

На выходе из несовершенного поляризатора колебания одного направления преобладают над колебаниями направления, перпендикулярного к преобладающему. Такой свет называется **частично поляризованным светом**.

Частично поляризованный свет, как и естественный, можно представить в виде наложения двух некогерентных плоскополяризованных волн с взаимно перпендикулярными плоскостями колебаний.

Отличие заключается в том, что для естественного света интенсивность этих волн одинакова, а в случае частично поляризованного – разная.



# 9. СТЕПЕНЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ



Если пропустить частично поляризованный свет через поляризатор, то при вращении прибора вокруг направления луча интенсивность прошедшего света будет изменяться от  $I_{\max}$  до  $I_{\min}$ , причем переход от одного из этих значений к другому будет совершаться при повороте поляризатора на угол, равный  $\pi/2$ . То есть за один полный оборот по два раза будут достигаться максимальные и минимальные значения.

Выражение  $P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$  называется степенью поляризации.

Для плоско поляризованного света  $I_{\min} = 0$  и  $P = 1$ ;

для естественного света  $I_{\max} = I_{\min}$  и  $P = 0$ .

# 10. ЗАКОН МАЛЮСА (I)

Колебание амплитуды  $E$ , происходящее в плоскости, образующей с плоскостью поляризатора угол  $\varphi$ , можно разложить на два колебания с амплитудами:

$$E_{\parallel} = E \cos \varphi, \quad E_{\perp} = E \sin \varphi.$$

Первое колебание пройдет через поляризатор, а второе будет им задержано.

Интенсивность волны пропорциональна квадрату амплитуды, поэтому

$$I = I_0 \cos^2 \varphi,$$

где  $I$  — интенсивность волны с амплитудой  $E_{\parallel}$ , прошедшей через поляризатор; а  $I_0$  — интенсивность падающей волны с амплитудой  $E$ .

Полученное соотношение называется **законом Малюса**. Он означает, что колебание, параллельное плоскости поляризатора, проходит через него и несет с собой от падающей волны долю интенсивности, равную  $\cos^2 \varphi$ .

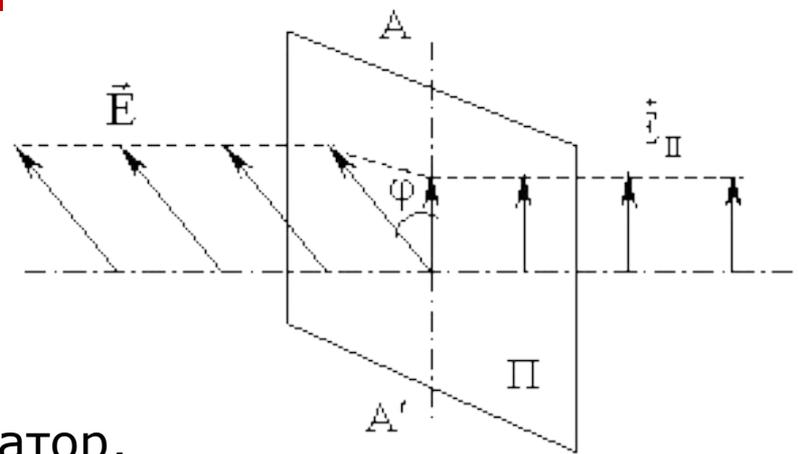
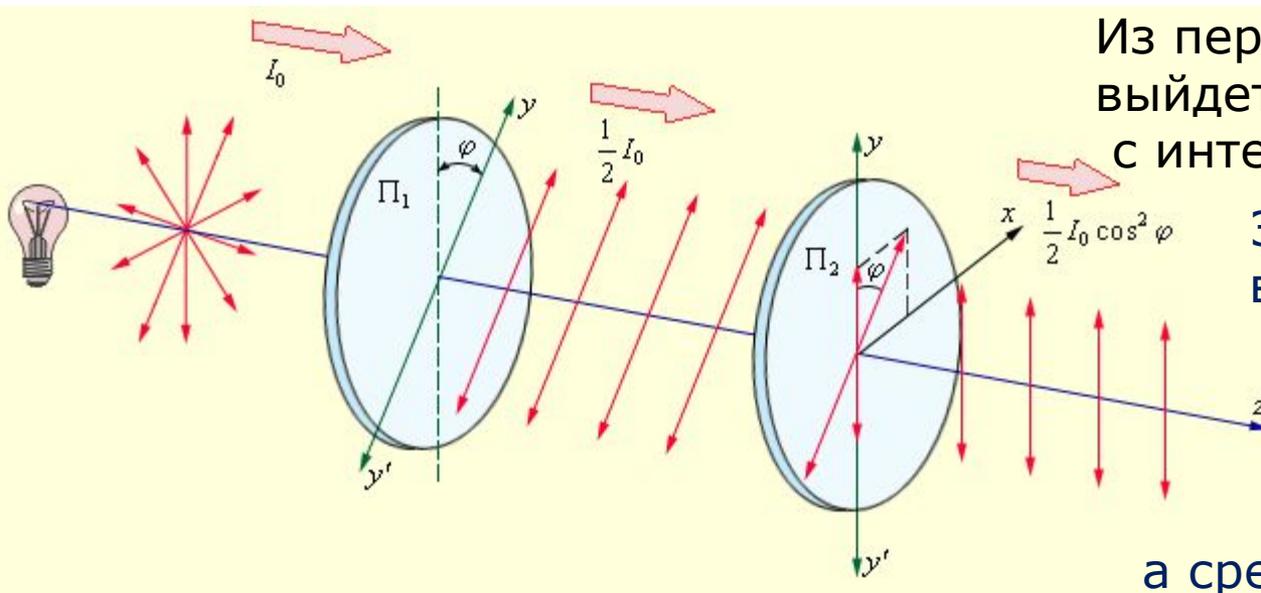


Рис. 2

# 10. ЗАКОН МАЛЮСА (II)

Поставим на пути естественного света интенсивностью  $I_0$  два поляризатора, плоскости которых образуют между собой угол  $\varphi$ .



Из первого поляризатора свет выйдет плоскополяризованным с интенсивностью  $I_1 = I_0/2$ .

Это объясняется тем, что в естественном свете все направления колебаний перпендикулярные оси поляризатора равновероятны, а среднее значение квадрата косинуса равно одной второй.

По закону Малюса из второго поляризатора выйдет свет интенсивностью

$$I_2 = I_1 \cos^2 \varphi \Rightarrow I_2 = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \varphi.$$

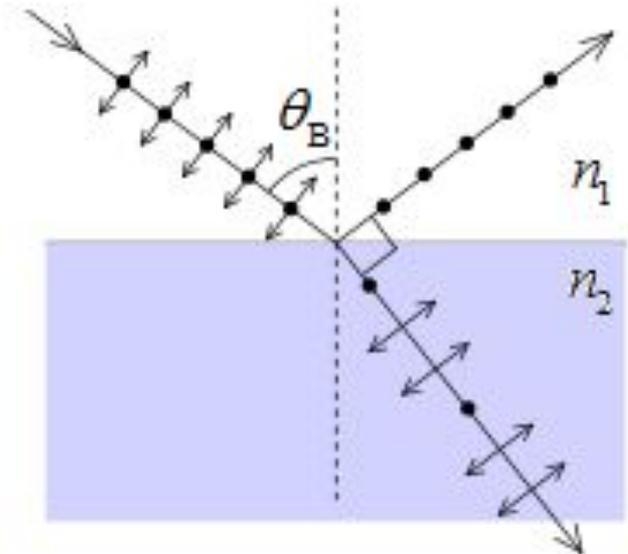
# 11. ЗАКОН БРЮСТЕРА (I)

Если угол падения на границу раздела двух диэлектриков отличен от нуля, то отраженный и преломленный лучи оказываются частично поляризованными.

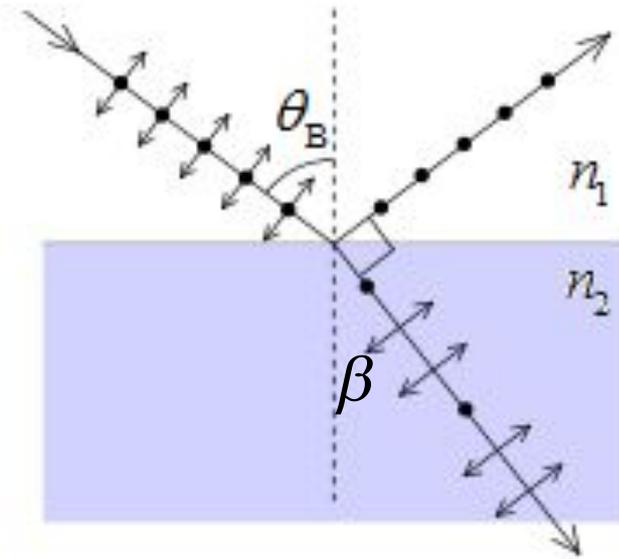
В отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные к плоскости падения, а в преломленном луче – колебания, параллельные плоскости падения.

Если луч падает на границу раздела под таким углом  $\theta_B$ , что отраженный и преломленный лучи перпендикулярны, то отраженный луч будет полностью поляризован, а степень поляризации преломленного луча будет максимальной.

Физическая причина поляризации при отражении состоит в том, что электроны формирующие отраженную волну не излучают в направлении, вдоль которого они совершают колебательное движение.



# 11. ЗАКОН БРЮСТЕРА (II)



$$\frac{\sin \theta_B}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}; \quad \theta_B + \beta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow$$

$$\sin \beta = \sin \left( \frac{\pi}{2} - \theta_B \right) = \cos \theta_B \Rightarrow$$

$$\frac{\sin \theta_B}{\sin \beta} = \frac{\sin \theta_B}{\cos \theta_B} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow$$

$$\operatorname{tg} \theta_B = \frac{n_2}{n_1}.$$

Это соотношение носит название **закона Брюстера**, а угол  $\theta_B$  называют **углом Брюстера**.

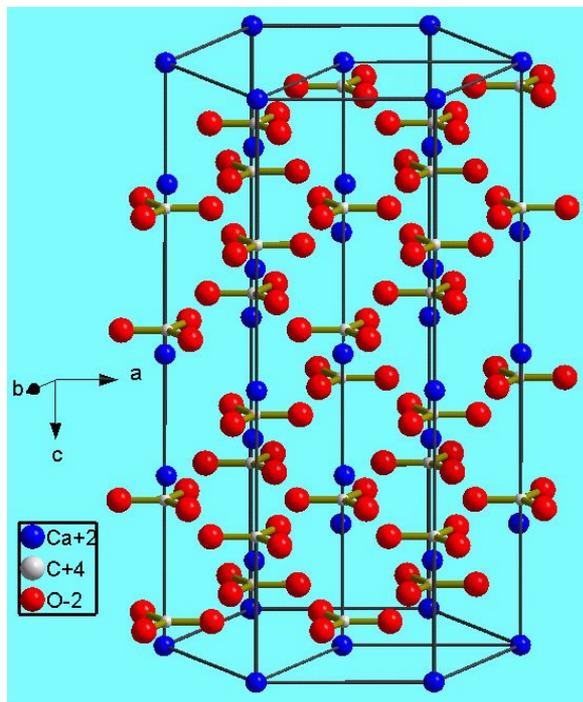
# 12. ДВОЙНОЕ ЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ

При прохождении света через прозрачные кристаллы (за исключением кубической системы) наблюдается явление, состоящее в разделении падающего луча внутри кристалла на два, распространяющихся с разными скоростями в разных направлениях.



Это явление получило название **двойного лучепреломления**.

Впервые описано датским физиком Эразмом Бартолини (1625 – 1698), который наблюдал его для исландского шпата – кристаллов гексагональной системы, являющихся разновидностью кальцита (углекислого кальция –  $\text{CaCO}_3$ ).



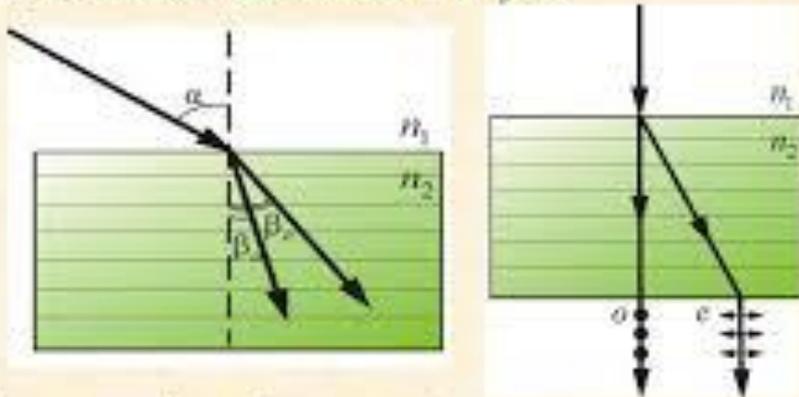
# 13. ОБЫКНОВЕННЫЙ И НЕОБЫКНОВЕННЫЙ ЛУЧИ

Закон преломления Снеллиуса:

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

Подчиняется – *обыкновенный луч o*.

Не подчиняется – *необыкновенный луч e*.



Обыкновенный и необыкновенный лучи являются *возможностью* *поляризованными* во взаимно перпендикулярных *направлениях*

19

Двулучепреломляющие кристаллы подразделяются на одноосные и двуосные.

У одноосных кристаллов (турмалин, кварц, исландский шпат) один из преломлённых лучей подчиняется закону преломления.

Этот луч называют обыкновенным и обозначают буквой *o* (ordinary).

Другой луч – необыкновенный, обозначают буквой *e* (extraordinary).

Для необыкновенного луча отношение синусов угла падения и угла преломления не остаётся постоянным при изменении угла падения. Даже при нормальном падении света на кристалл необыкновенный луч, вообще говоря, отклоняется от нормали и не лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к преломляющей поверхности.

# 14. ОПТИЧЕСКАЯ ОСЬ

У одноосных кристаллов есть направление, вдоль которого обыкновенный и необыкновенный лучи распространяются не разделяясь и с одинаковой скоростью. Это направление называется оптической осью кристалла.

Оптическая ось – это не прямая линия, проходящая через какую-то точку кристалла, а определённое направление в кристалле.

Любая прямая, параллельная данному направлению, также является оптической осью кристалла.

Любая плоскость, содержащая через оптическую называется главным сечением или главной плоскостью кристалла. Обычно пользуются главным сечением, проходящим через световой луч.

Плоскость колебаний обыкновенного луча перпендикулярна главному сечению кристалла, в необыкновенном луче – параллельна.

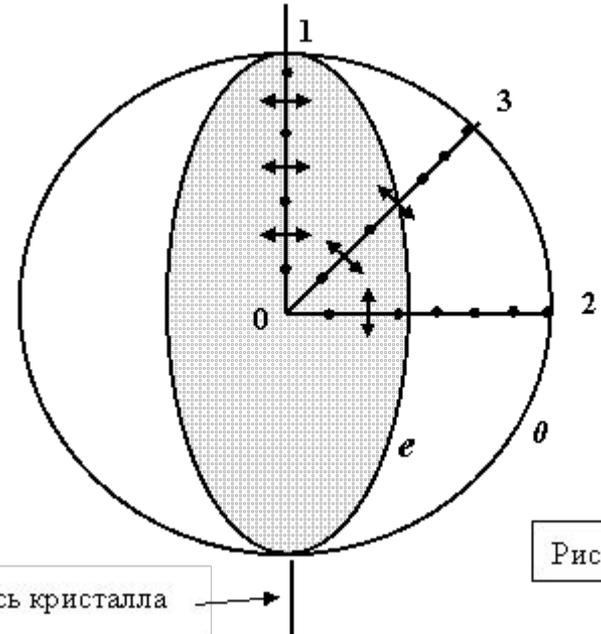
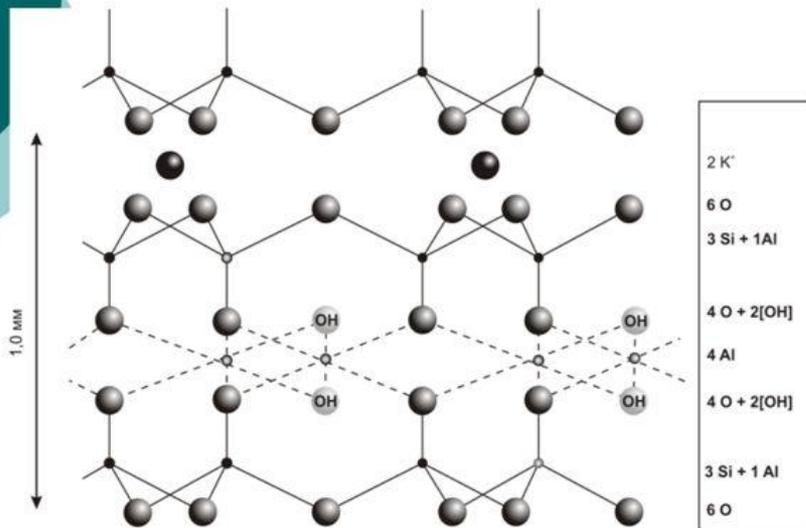


Рис. 1

# 15. ДВУОСНЫЕ КРИСТАЛЛЫ

У двуосных кристаллов (слюда – силикатный минерал, гипс – сульфат кальция,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) имеются два направления, вдоль которых лучи распространяются не разделяясь с одинаковой скоростью.

Другим важным структурным расположением является структура 2 : 1 (два к одному), сложенная октаэдрической сеткой



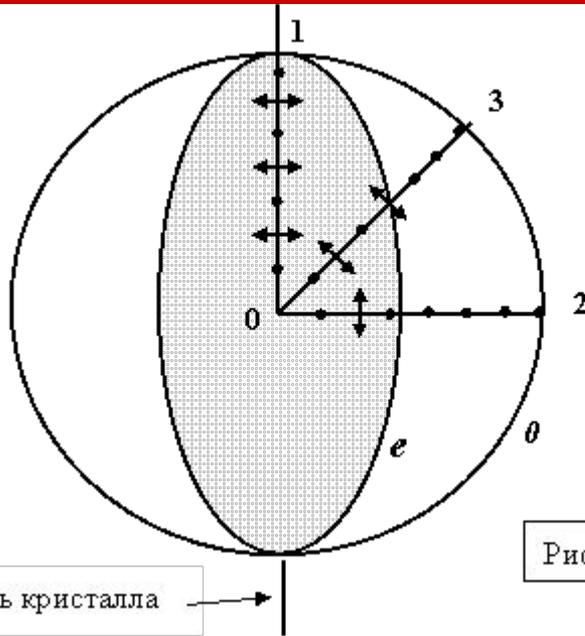
Структура слюды мусковита

Такую структуру имеют все остальные группы глинистых минералов, из которых важнейшими являются группа слюд, включающая обычные слюдяные минералы и иллит, группа смектитов и группа

У двуосных кристаллов оба луча необыкновенные, то есть они не подчиняются закону преломления поскольку коэффициент преломления для них зависит от направления в кристалле.

В дальнейшем ограничимся рассмотрением только одноосных кристаллов.

# 16. ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ И АНИЗОТРОПИЯ КРИСТАЛЛОВ



Двойное лучепреломление объясняется анизотропией кристаллов.

В кристаллах некубической системы диэлектрическая проницаемость зависит от направления в кристалле.

В одноосных кристаллах вдоль и перпендикулярно оптической оси  $\epsilon$ , а следовательно и коэффициент преломления  $n = \sqrt{\epsilon}$  будут иметь разные значения.

Из анизотропии диэлектрической проницаемости вытекает, что волнам с различным направлением колебаний светового вектора соответствуют разные значения коэффициента преломления.

Поэтому скорость световых волн  $V = \frac{c}{n} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$  зависит от направления колебаний светового вектора.

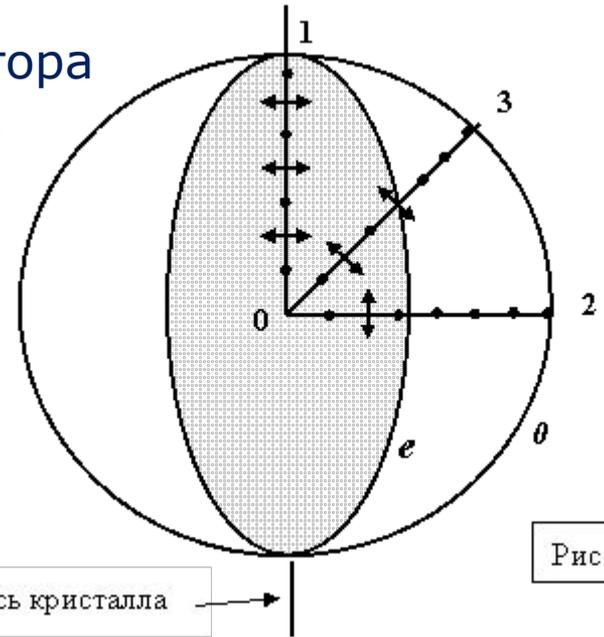
# 17. ВОЛНОВЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ОБЫКНОВЕННОГО ЛУЧА

В обыкновенном луче колебания светового вектора происходят в направлении к главному сечению.

На рисунке эти колебания изображены точками на соответствующем луче.

При любом направлении обыкновенного луча световой вектор образует с оптической осью прямой угол, и скорость световой волны будет одна и та же

$$V_0 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\perp}}}$$



Изображая скорость обыкновенного луча в виде отрезков, отложенных по разным направлениям мы получим сферическую поверхность. На рисунке показано пересечение этой поверхности с плоскостью чертежа.

Представим себе, что в точке  $O$  внутри кристалла помещается точечный источник света. Тогда построенная нами сфера будет волновой поверхностью обыкновенных лучей.

# 18. ВОЛНОВЫЕ ПОВЕРХНОСТИ НЕОБЫКНОВЕННОГО ЛУЧА

Колебания светового вектора в необыкновенном луче происходят в главном сечении кристалла.

На рисунке эти колебания изображены двусторонними стрелками на лучах 1, 2, 3.

Для разных лучей направления колебаний светового вектора образует с оптической осью кристалла различные углы  $\alpha$ .

Для луча 1  $\alpha = \pi/2$ , поэтому  $V_o = c/\sqrt{\epsilon_{\perp}}$ .

Для луча 2  $\alpha = 0$ , поэтому  $V_e = c/\sqrt{\epsilon_{\parallel}}$ .

Для луча 3 скорость имеет промежуточное значение.

Волновая поверхность необыкновенных лучей представляет собой эллипсоид вращения. В местах пересечения с оптической осью кристалла этот эллипсоид и сфера, построенная для обыкновенных лучей соприкасаются.

