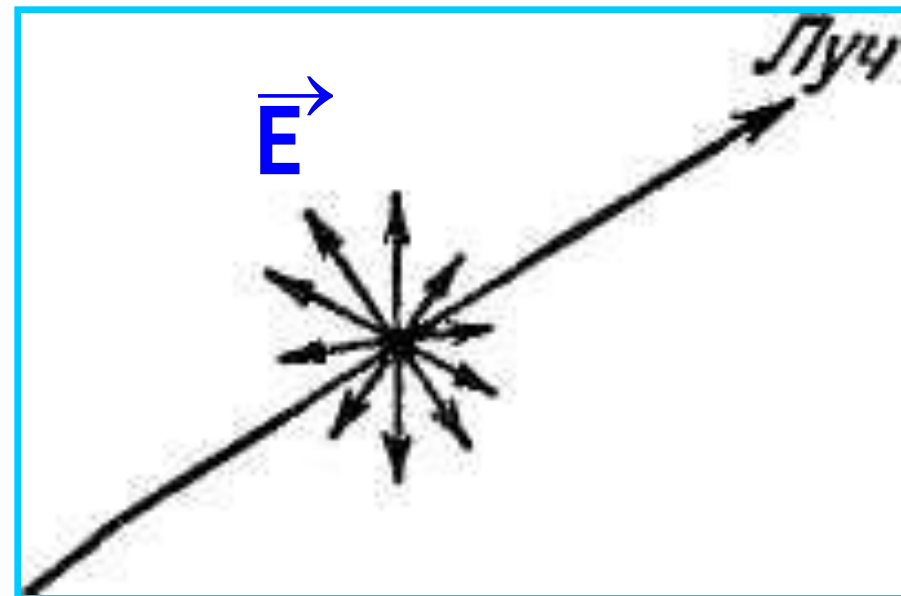


3. Поляризация света

3.1 Естественный и поляризованный свет

Электромагнитные волны - поперечные волны. Однако *естественный свет* не обнаруживает асимметрии относительно направления своего распространения.

Это связано с тем, что в естественном свете имеются колебания, совершающиеся в различных направлениях, перпендикулярных к лучу.



Световая волна складывается из цугов волн, испускаемых отдельными атомами. Колебания вектора напряженности электрического поля E (*светового вектора*) в различных цугах ориентированы случайным образом.

Поэтому в результирующей волне естественного света колебания различных направлений представлены с равной вероятностью и *беспорядочно* сменяют друг друга.

Свет, в котором направления колебаний светового вектора E упорядочены каким-либо образом, называется *поляризованным*.

Если колебания светового вектора E происходят только в одной плоскости, свет называют *плоско-поляризованным*.

Если конец светового вектора E движется по эллипсу, то свет называют *эллиптически поляризованным*.

Частным случаем эллиптически поляризованного света является свет, *поляризованный по кругу* – в нем конец вектора E движется по кругу.

Свет, в котором колебания одного направления преобладают над колебаниями других направлений, называется *частично поляризованным*. Такой свет можно рассматривать как смесь естественного и плоско-поляризованного.

Плоскость, в которой колеблется световой вектор E , называется *плоскостью колебаний*.

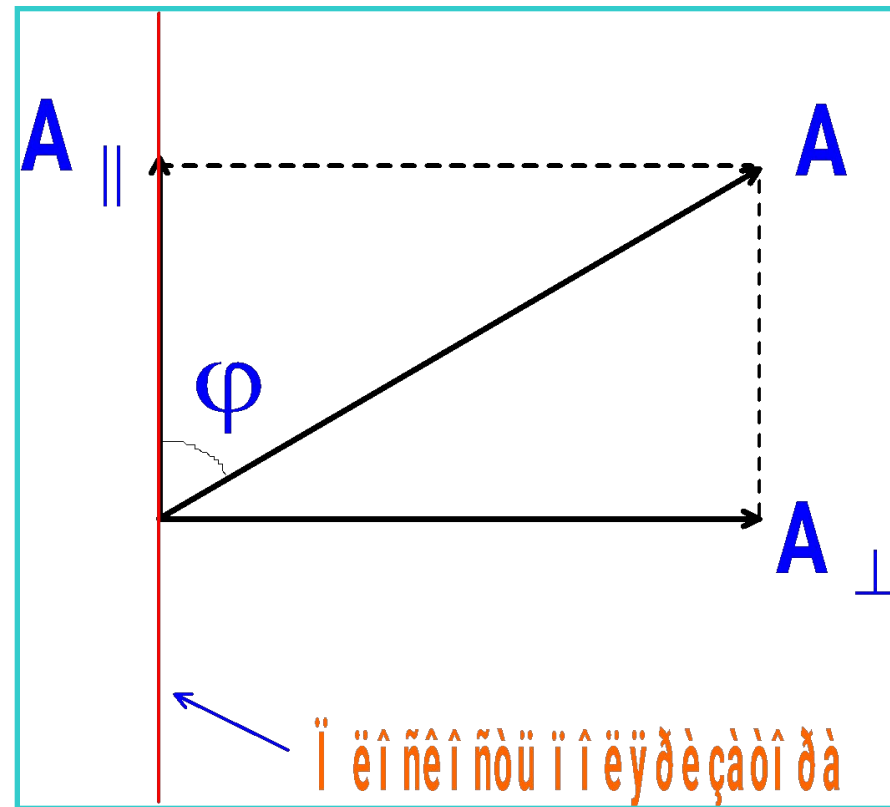
Плоскостью поляризации называется плоскость, перпендикулярная к плоскости колебаний. Если среда изотропная, то в плоскости поляризации колеблется вектор напряженности магнитного поля H .

Плоско-поляризованный свет можно получить разными способами.

Например, при пропускании естественного света через *поляризаторы*, свободно проходят колебания, параллельные некоторой плоскости, называемой *плоскостью поляризатора*, и задерживаются колебания, перпендикулярные к этой плоскости.

Колебание с амплитудой A , совершающееся в плоскости, образующей угол ϕ с плоскостью поляризатора, можно разложить на два колебания с амплитудами

$$A_{\parallel} = A \cos \phi \quad \text{и} \quad A_{\perp} = A \sin \phi$$



Колебание A_{\parallel} пройдет через прибор, а колебание A_{\perp} будет задержано. Интенсивность прошедшей волны $I_{\text{прош}}$ пропорциональна квадрату ее амплитуды

$$(A_{\parallel})^2 = A^2 \cos^2 \phi$$

и поэтому равна

$$I_{\text{прош}} = I \cdot \cos^2 \phi$$

где $I \sim A^2$ - интенсивность колебания с амплитудой A .

Значит, колебание, параллельное плоскости поляризатора, несет с собой долю интенсивности, равную $\cos^2 \phi$.

В естественном свете все значения угла ϕ *равновероятны*. Поэтому доля света, прошедшего через поляризатор, будет равна среднему значению

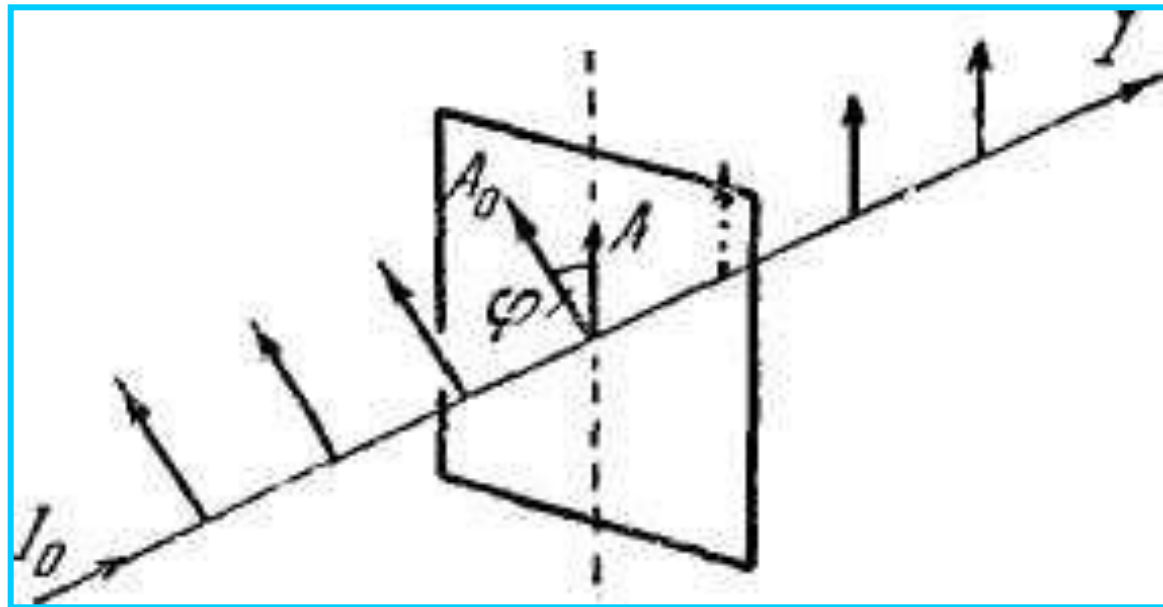
$$\langle \cos^2 \phi \rangle = 1/2$$

Пусть на поляризатор падает *плоскополяризованный* свет с амплитудой A_0 и интенсивностью I_0 . Сквозь прибор пройдет составляющая колебания с амплитудой $A = A_0 \cos \phi$, где ϕ - угол между плоскостью колебаний падающего света и плоскостью поляризатора.

Следовательно, интенсивность прошедшего света I дается выражением

$$I = I_0 \cos^2 \phi \quad (3.1.1)$$

закон Малюса



Поставим теперь на пути естественного луча *два поляризатора*, плоскости которых образуют угол ϕ . Из первого поляризатора выйдет плоскополяризованный свет, интенсивность которого I_1 составит половину интенсивности естественного света $I_{ест}$

$$I_1 = I_{ест} / 2$$

Согласно закону Малюса из второго поляризатора выйдет свет с интенсивностью

$$I_2 = I_1 \cos^2 \phi = I_{ест} \cos^2 \phi / 2 \quad (3.1.2)$$

Это и есть интенсивность света, прошедшего через два поляризатора.

Максимальная интенсивность, равная $I_{\text{ест}}/2$, получается при $\phi = 0$, когда оси двух *поляризаторов параллельны*.

При $\phi = \pi/2$ интенсивность равна нулю - *скрещенные поляризаторы свет не пропускают*.

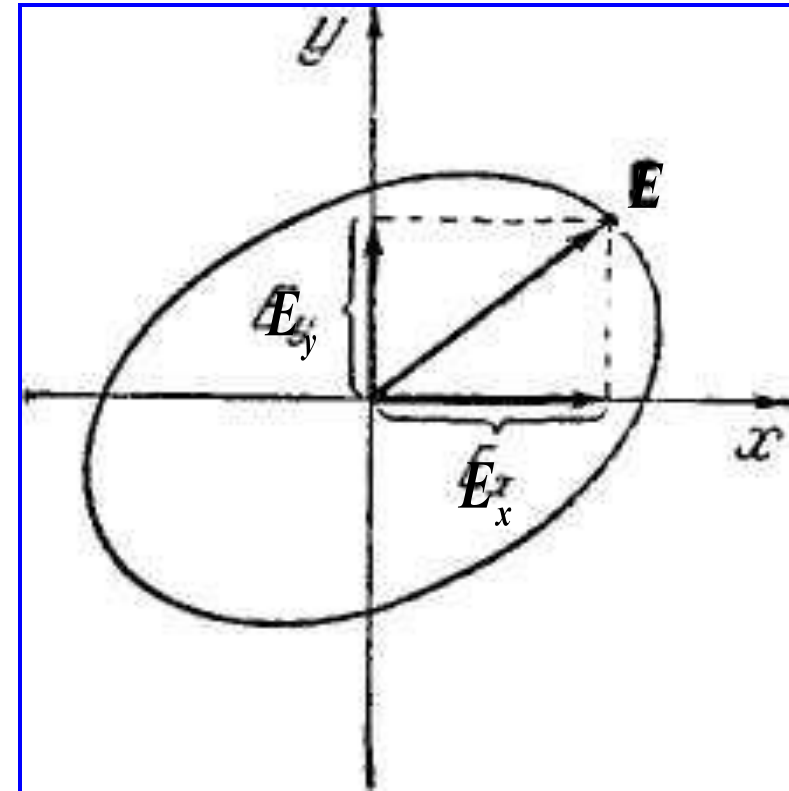
Рассмотрим взаимодействие двух когерентных *плоско-поляризованных* световых волн, плоскости колебаний которых взаимно перпендикулярны. Пусть колебания в одной волне совершаются вдоль оси x , а во второй – вдоль оси y (оси x и y лежат в перпендикулярной к лучу плоскости).

Световые векторы ЭТИХ ВОЛН изменяются по закону

$$E_x = A_1 \cos(\omega t)$$

$$E_y = A_2 \cos(\omega t + \delta)$$

Их векторная сумма дает результирующую напряженность E .



Исключая ωt , получаем уравнение, связывающее две проекции суммарного вектора E

$$\frac{E_x^2}{A_1^2} - \frac{2E_x E_y \cos \delta}{A_1 A_2} + \frac{E_y^2}{A_2^2} = \sin^2 \delta$$

Это уравнение эллипса, оси которого повернуты в плоскости (x, y) , что видно из рисунка. Следовательно, конец вектора E движется по эллипсу. Такой свет называется *эллиптически поляризованным*.

При разности фаз δ , кратной π , эллипс вырождается в прямую и получается *плоско-поляризованный свет*.

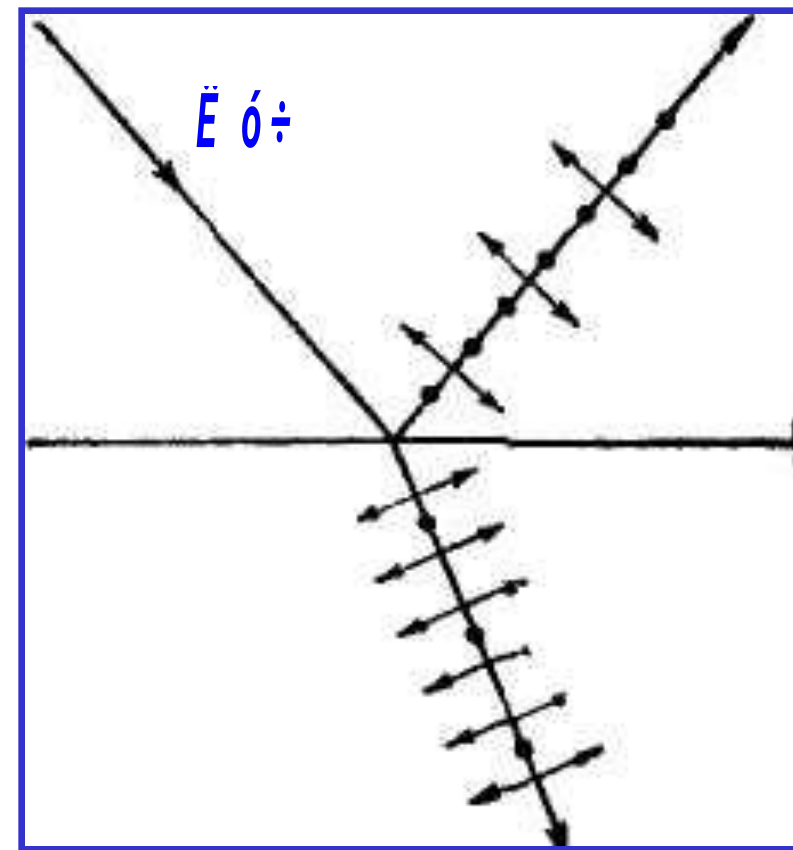
При разности фаз, равной нечетному числу $\pi/2$, и равенстве амплитуд складываемых волн $A_1 = A_2$ эллипс превращается в *окружность*. В этом случае получается свет, *поляризованный по кругу*.

В зависимости от направления вращения светового вектора E различают *правую и левую эллиптическую и круговую поляризацию*.

Если по отношению к направлению, противоположному направлению луча, вектор E вращается по часовой стрелке, поляризация называется правой, в противном случае - левой.

3.2 Поляризация при отражении и преломлении

Если угол падения света на границу раздела двух диэлектриков (например, на поверхность стеклянной пластинки) не равен нулю, то лучи оказываются *частично поляризованными*. При этом в отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные к плоскости падения (на рисунке они показаны точками), а в преломленном луче – колебания, параллельные плоскости падения (на рисунке они показаны двусторонними стрелками).



Степень поляризации зависит от угла падения.
При угле падения, удовлетворяющем условию

закон Брюстера $\operatorname{tg} i_B = n_{12} = n_2 / n_1$ (3.2.1)

отраженный луч полностью поляризован (он содержит только колебания, перпендикулярные к плоскости падения), i_B - угол **Брюстера** или *угол полной поляризации*.

Степень поляризации преломленного луча при угле падения, равном i_B , достигает наибольшего значения, однако этот луч остается поляризованным только частично.

Легко убедиться, что при падении света под углом **Брюстера** отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны.

3.3 Поляризация при двойном лучепреломлении

При прохождении света через некоторые кристаллы световой луч разделяется на два луча. Это явление, получило название - *двойное лучепреломление*.

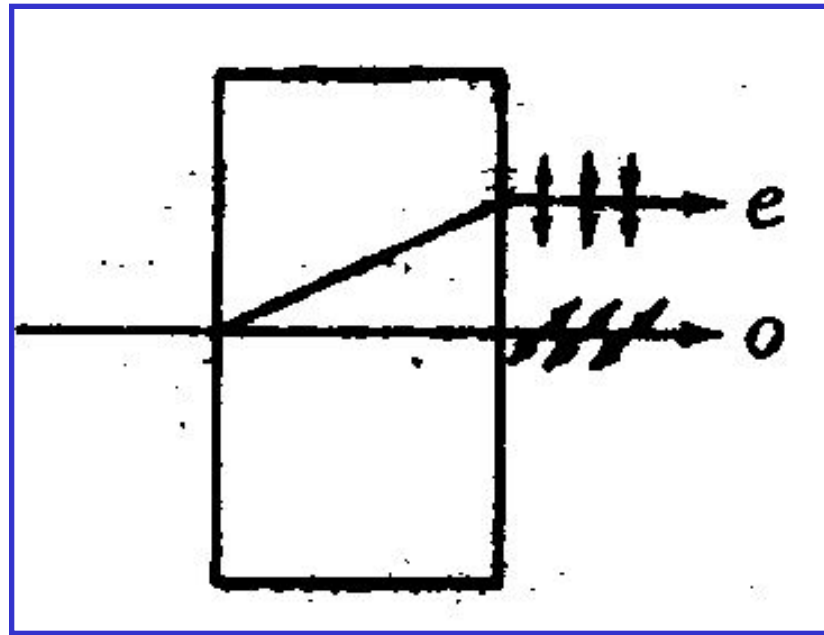
Впервые его наблюдал в 1670 г. **Бартоломин** для исландского шпата (разновидность углекислого кальция, CaCO_3).

При двойном лучепреломлении один из лучей удовлетворяет обычному закону преломления и лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью. Этот луч называется *обыкновенным* и обозначается буквой *o*.

Для другого луча, называемого *необыкновенным* (его обозначают буквой *e*), отношение $\sin i / \sin r$ зависит от угла падения, то есть закон преломления не выполняется.

Необыкновенный луч может отклоняться от первоначального направления даже при нормальном падении.

Кроме того, необыкновенный луч, как правило, не лежит в плоскости падения.



Явление двойного лучепреломления наблюдается во всех прозрачных кристаллах *за исключением кристаллов, принадлежащих к кубической системе.*

У так называемых *одноосных кристаллов* имеется 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 ***определенное направление в кристалле***. Любая прямая, параллельная данному направлению, тоже является оптической осью кристалла.

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

Обыкновенный и необыкновенный лучи полностью поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях.

Плоскость колебаний обыкновенного луча перпендикулярна к главному сечению кристалла.

В необыкновенном луче колебания светового вектора совершаются в плоскости, совпадающей с главным сечением.

В некоторых кристаллах один из лучей поглощается сильнее другого. Это явление называется **дихроизмом**.

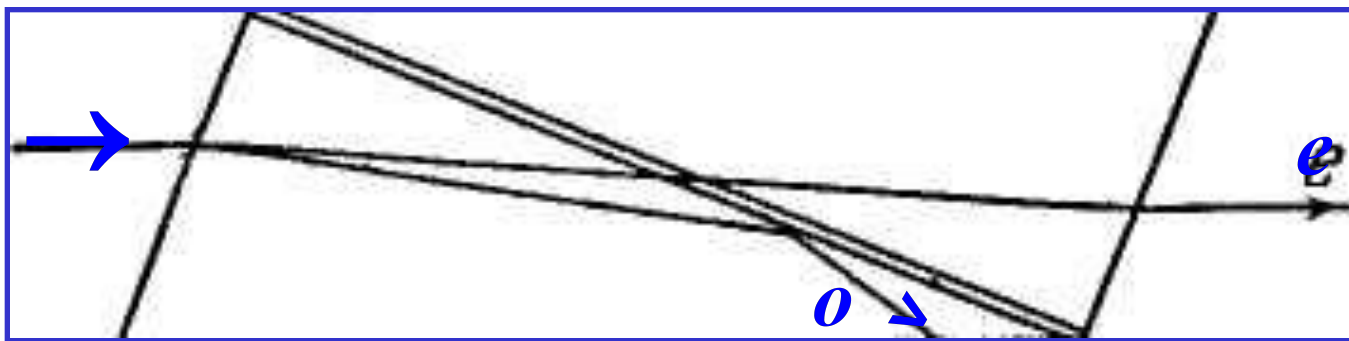
Сильным дихроизмом в видимых лучах обладает кристалл *турмалина*. В нем обыкновенный луч почти полностью поглощается на длине **1 мм**.

Таким же свойством обладает *поляроид* - целлулоидная пленка, в которую введено большое количество одинаково ориентированных кристаллов *сульфата йодистого хинина*. В этих кристаллах один из лучей поглощается на пути **~ 0,1 мм**, поэтому поляроид используют в качестве поляризатора.

Широко используется поляризатор, называемый призмой **Николя** (или просто николем, 1828 г.).

Он представляет собой призму из *исландского шпата*, разрезанную по диагонали и склеенную *канадским бальзамом*, показатель преломления которого n лежит между показателями преломления обыкновенного ($n_o = 1.658$) и необыкновенного ($n_e = 1.486$) лучей в кристалле.

При падении света обыкновенный луч претерпевает на прослойке бальзама полное внутреннее отражение и отклоняется в сторону. Необыкновенный луч свободно проходит через эту прослойку и выходит из призмы.



Кроме одноосных кристаллов (таких как исландский шпат, турмалин, кварц) существуют *двуосные кристаллы* (например, слюда, гипс), у которых имеются два направления, вдоль которых свет не разделяется на два луча.

В *двуосных кристаллах* *оба луча необыкновенные* - показатели преломления для них зависят от направления в кристалле.