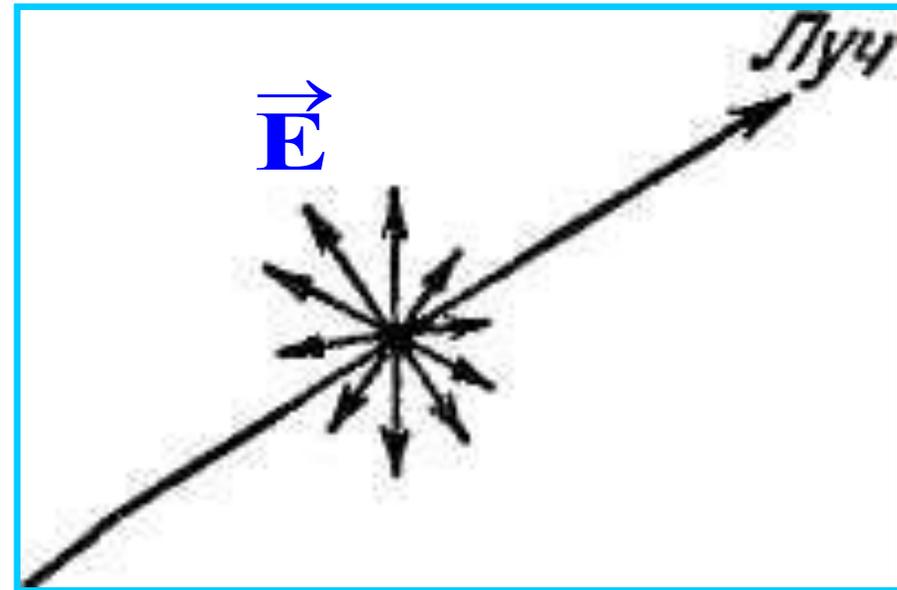


## 3. Поляризация света

### 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*.

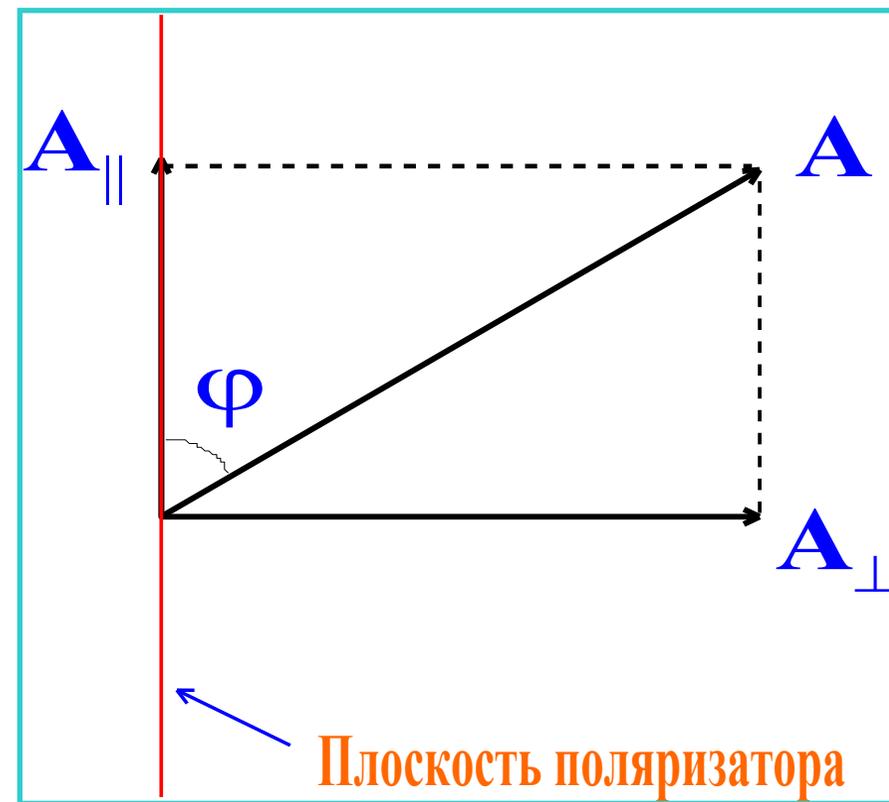
*Плоскостью поляризации* называется плоскость, перпендикулярная к плоскости колебаний. Если среда изотропная, то в плоскости поляризации колеблется вектор напряженности магнитного поля  $H$ .

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  $\varphi$  с плоскостью поляризатора, можно разложить на два колебания с амплитудами

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



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

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

и поэтому равна

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

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

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

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

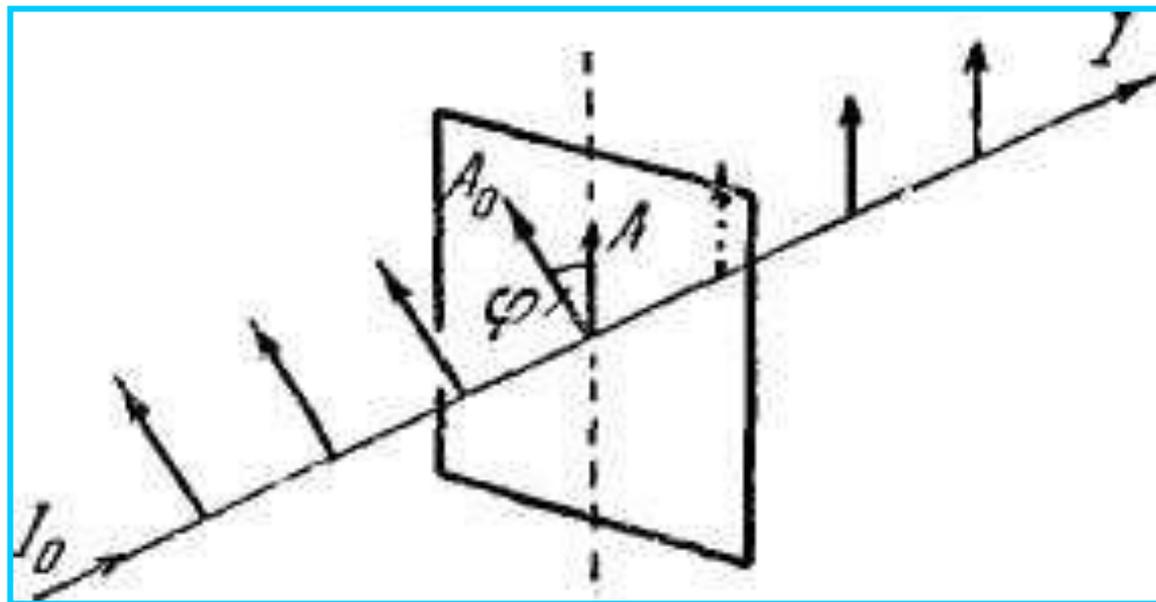
$$\langle \cos^2 \varphi \rangle = 1/2$$

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

Следовательно, интенсивность прошедшего света  $I$  дается выражением

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

закон Малюса



Поставим теперь на пути естественного луча *два поляризатора*, плоскости которых образуют угол  $\varphi$ . 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

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

Это и есть интенсивность света, прошедшего через два поляризатора.

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

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

Рассмотрим взаимодействие двух когерентных *плоско-поляризованных* световых волн, плоскости колебаний которых взаимно перпендикулярны.

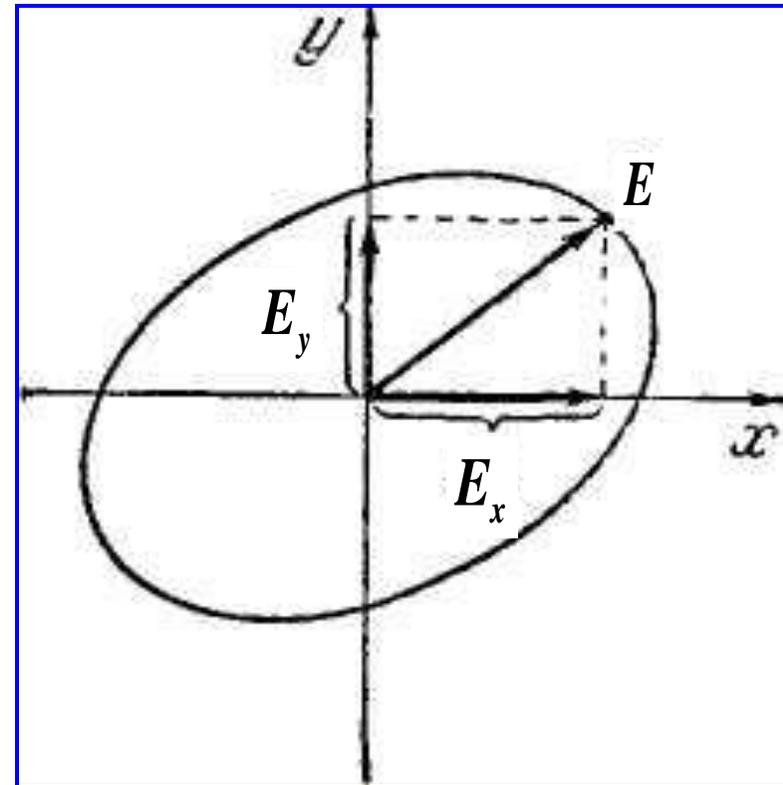
Пусть колебания в одной волне совершаются вдоль оси  $x$ , а во второй – вдоль оси  $y$  (оси  $x$  и  $y$  лежат в перпендикулярной к лучу плоскости).

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  $\omega t$ , получаем уравнение, связывающее две проекции суммарного вектора  $E$

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

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  $\delta$ , кратной  $\pi$ , эллипс вырождается в прямую и получается *плоско-поляризованный свет*.

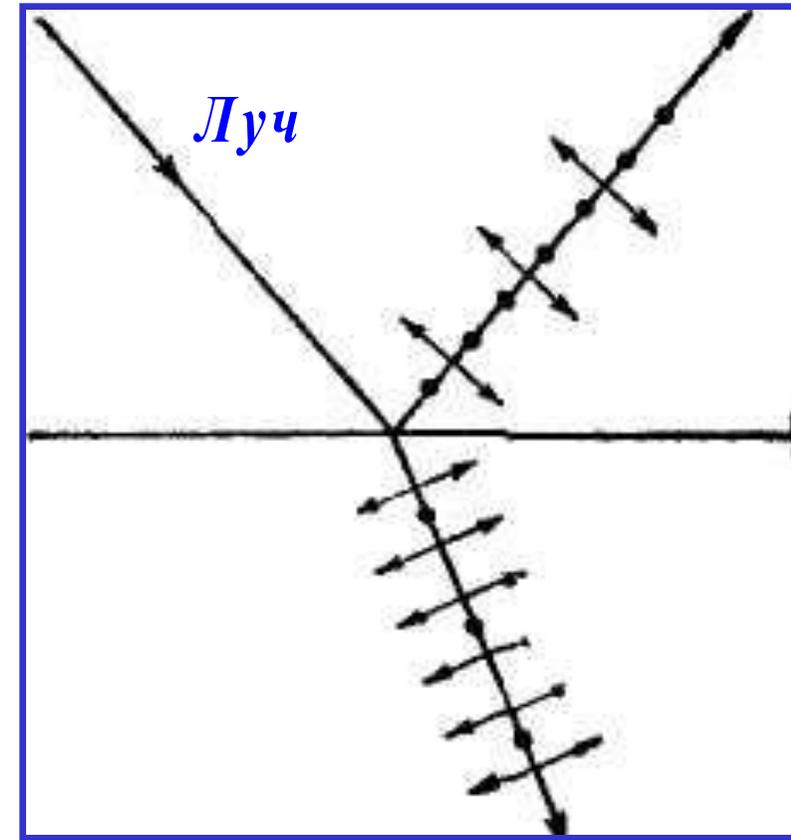
При разности фаз, равной нечетному числу  $\pi/2$ , и равенстве амплитуд складываемых волн  $A_1 = A_2$  эллипс превращается в *окружность*. В этом случае получается свет, *поляризованный по кругу*.

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*.

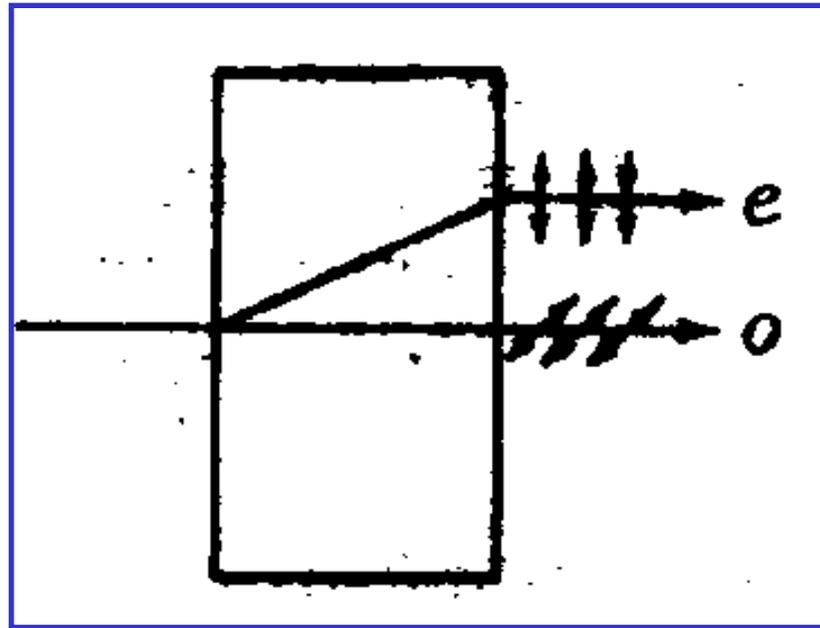
Впервые его наблюдал в 1670 г. Бартоломин для исландского шпата (разновидность углекислого кальция,  $\text{CaCO}_3$ ).

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**.

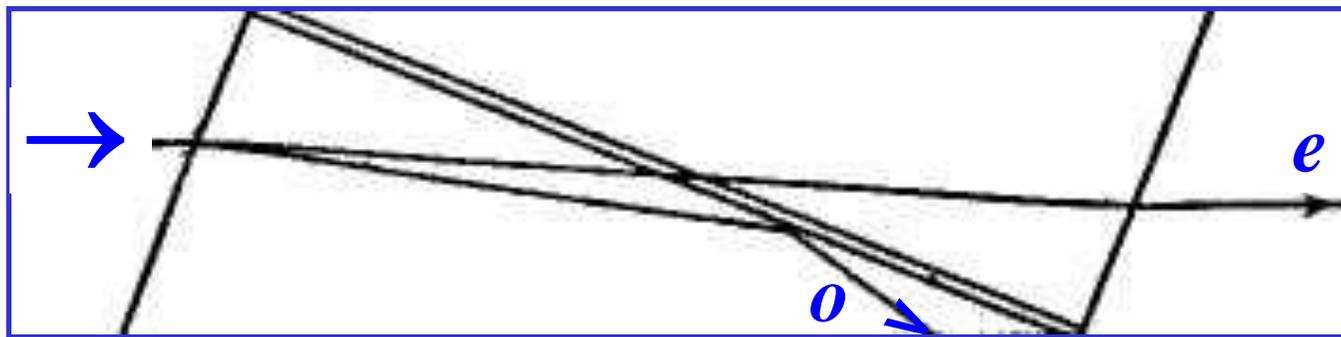
Сильным дихроизмом в видимых лучах обладает кристалл *турмалина*. В нем обыкновенный луч почти полностью поглощается на длине **1 мм**.

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.



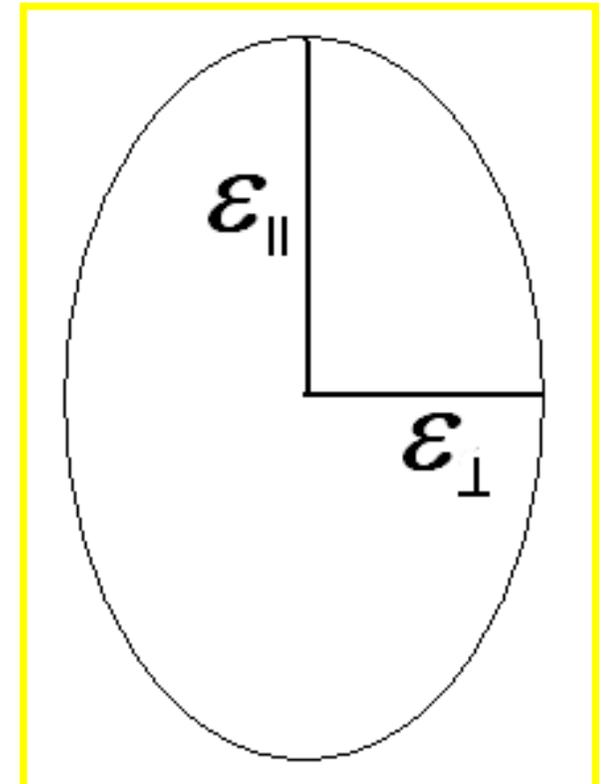
Кроме одноосных кристаллов (таких как исландский шпат, турмалин, кварц) существуют *двуосные кристаллы* (например, слюда, гипс), у которых имеются два направления, вдоль которых свет не разделяется на два луча.

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

*Двойное лучепреломление объясняется анизотропией кристаллов,* вследствие которой диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  в них зависит от направления.

В *одноосных кристаллах*  $\epsilon$  в направлении оптической оси имеет значение  $\epsilon_{\parallel}$ , а в направлениях, перпендикулярных к ней -  $\epsilon_{\perp}$ . В других направлениях  $\epsilon$  имеет промежуточные значения.

Если значения  $\epsilon$  для разных направлений изображать отрезками, отложенными из некоторой точки, то концы отрезков расположатся на поверхности эллипсоида вращения, ось симметрии которого совпадает с оптической осью кристалла.



Поскольку  $n = \sqrt{\varepsilon}$ , то из анизотропии  $\varepsilon$  вытекает, что электромагнитным волнам с различными направлениями колебаний вектора  $\mathbf{E}$  отвечают разные значения показателя преломления  $n$ .

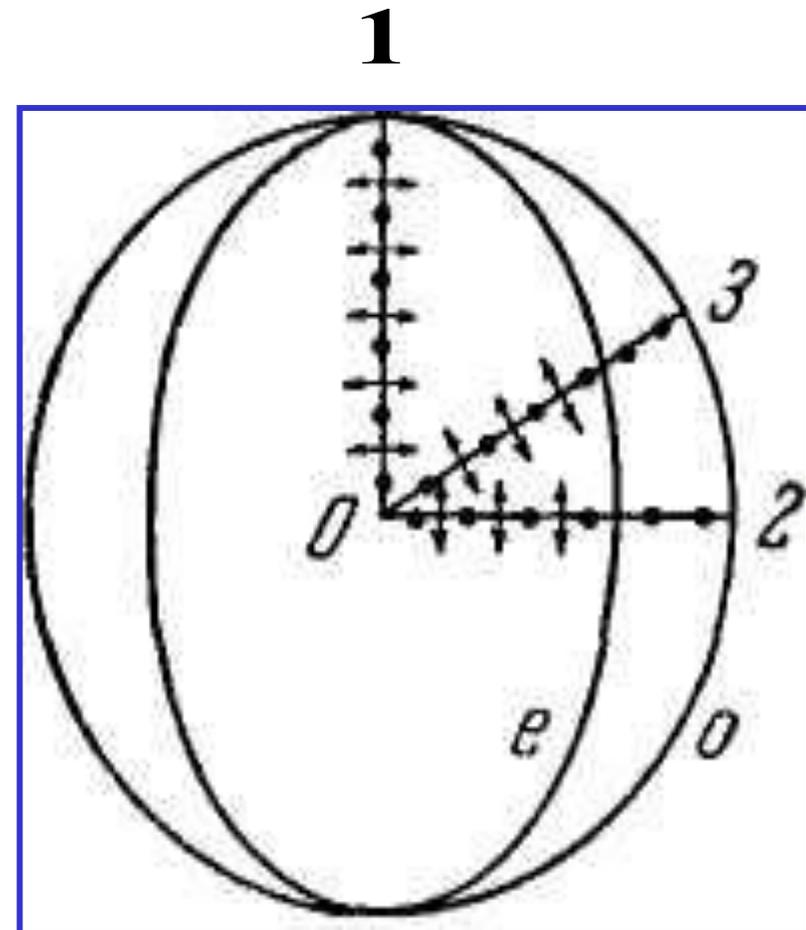
Поэтому скорость распространения электромагнитных волн в кристалле зависит от направления колебаний светового вектора  $\mathbf{E}$ .

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

Поэтому при любом направлении обыкновенного луча (на рисунке указаны три направления: *1*, *2* и *3*) вектор **E** образует с оптической осью кристалла 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, получим сферическую поверхность.



Если в некоторой точке **O** одноосного кристалла поместить точечный источник света, то построенная вокруг него сфера будет волновой поверхностью обыкновенных лучей в кристалле.

В *необыкновенном луче* колебания совершаются в плоскости главного сечения. Поэтому для разных лучей направления колебаний вектора **E** (на рисунке эти направления показаны двусторонними стрелками) образуют с оптической осью разные углы  $\alpha$ .

Для луча **1** угол  $\alpha = \pi/2$ , скорость равна  $v_o = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\perp}}}$

Для луча **2** угол  $\alpha = 0$ , скорость равна  $v_e = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\parallel}}}$

Для луча  $3$  скорость имеет промежуточное значение. Поэтому волновая поверхность необыкновенных лучей представляет собой *эллипсоид вращения*. В местах пересечения с оптической осью кристалла сфера и эллипсоид соприкасаются.

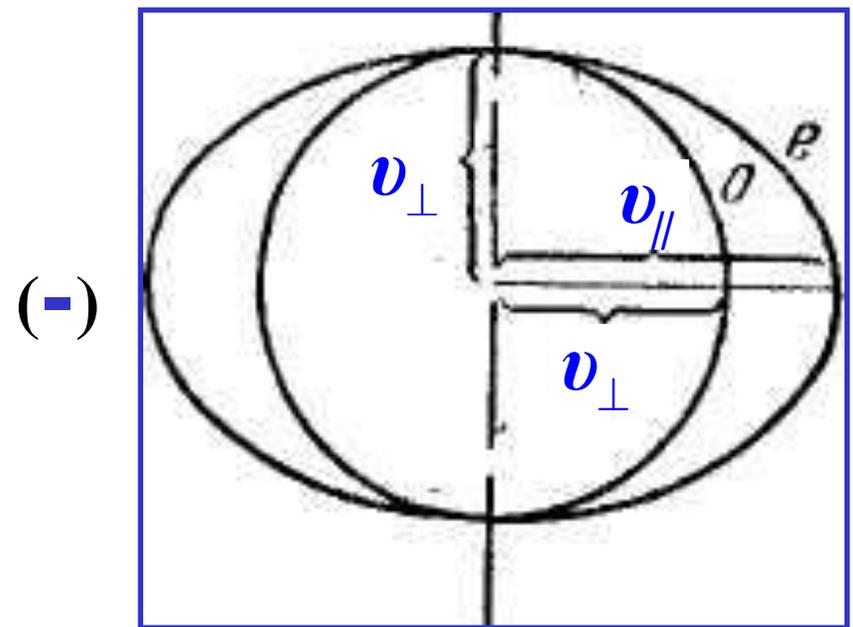
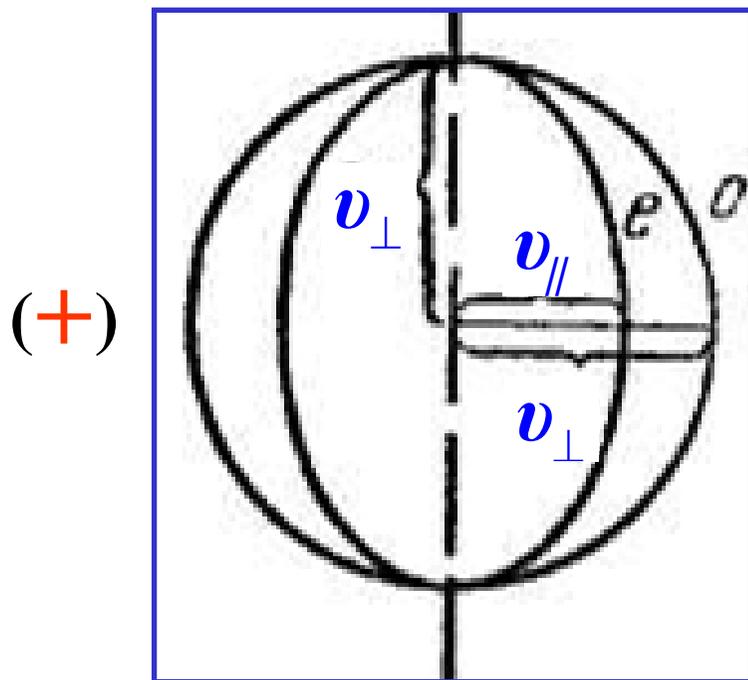
Величина  $n_o = c/v_o$  называется показателем преломления обыкновенного луча,

Величина  $n_e = c/v_e$  называется показателем преломления необыкновенного луча.

В зависимости от того, какая из скоростей,  $v_0$  или  $v_e$ , больше, различают **положительные и отрицательные одноосные кристаллы**.

У положительных (+) кристаллов  $v_e < v_0$ , эллипсоид скоростей вытянут вдоль оптической оси.

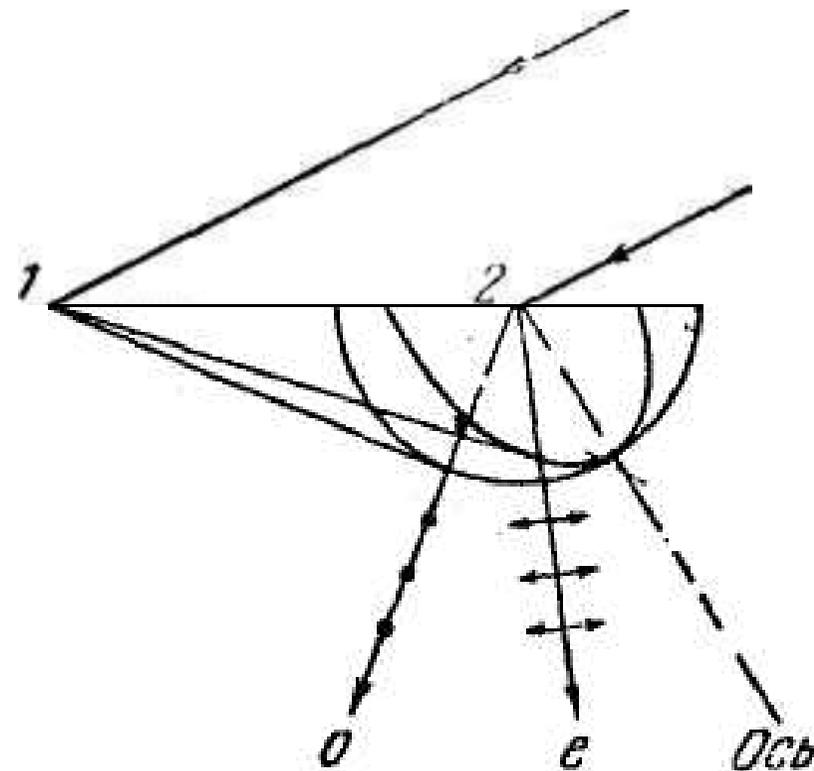
У отрицательных (-) кристаллов  $v_e > v_0$ , эллипсоид скоростей растянут перпендикулярно оптической оси.



Зная вид волновых поверхностей, можно с помощью принципа Гюйгенса определить направления распространения обыкновенного  $o$  и необыкновенного  $e$  лучей в кристалле. На рисунке построены волновые поверхности  $o$  и  $e$  лучей с центром в точке  $2$ , лежащей на поверхности кристалла. Построение выполнено для момента времени, когда волновой фронт достигает точку  $1$ .

Огибающие вторичных волн представляют собой плоскости.

Преломленные лучи  $o$  и  $e$ , выходящие из точки  $2$ , проходят через точки касания огибающей с соответствующей волновой поверхностью.

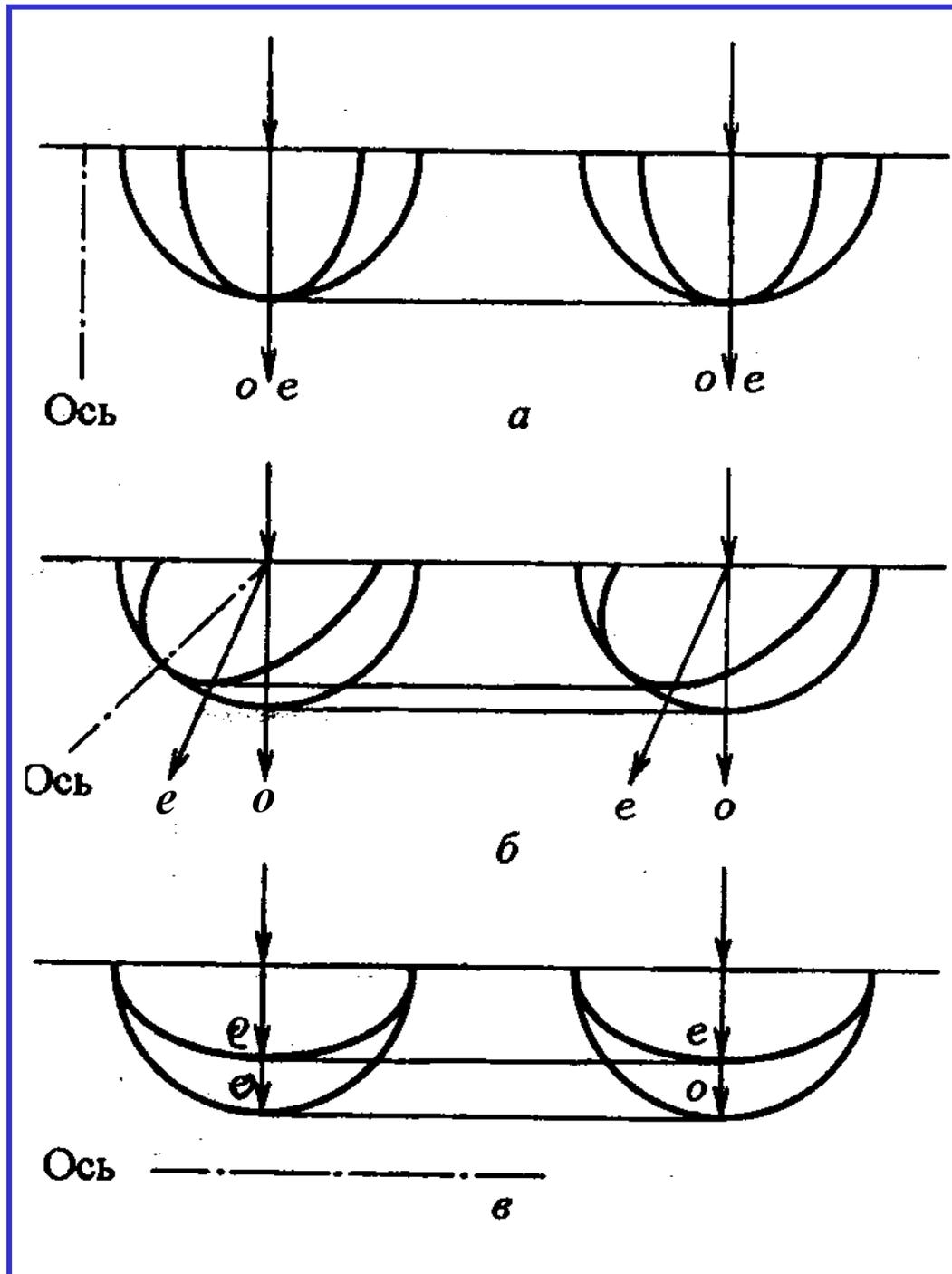


**В изотропных средах направление, в котором распространяется энергия световой волны (т. е. луч), совпадает с нормалью к волновой поверхности.**

**В одноосных кристаллах это же имеет место для обыкновенного луча *o*.**

**Однако необыкновенный луч *e* отклоняется от нормали к соответствующей волновой поверхности. Поэтому в случае анизотропных сред понятие луча должно быть уточнено: под лучом надо понимать направление, вдоль которого переносится световая энергия.**

На рисунке показаны три случая *нормального падения* света на поверхность кристалла. Они отличаются направлением оптической оси кристалла.



В случае **а)** лучи ***o*** и ***e*** распространяются вдоль оптической оси и поэтому идут не разделяясь.

В случае **б)** даже при нормальном падении света на преломляющую поверхность необыкновенный луч отклоняется от нормали к этой поверхности.

В случае **в)** оптическая ось кристалла параллельна преломляющей поверхности. При нормальном падении света обыкновенный ***o*** и необыкновенный ***e*** лучи идут по одному направлению, но с разной скоростью, вследствие чего между ними возникает все возрастающая разность фаз.