

# ОПТИКА

## Лекция 29.

### Тема: Поляризация

Учебник:

*Трофимова Т.И.* Курс физики : учеб. пособ. для вузов / Т. И. Трофимова. - М.: Академия, 2007.- с. **357-368**.

**к.ф.-м.н.  
Курочкин А.**

При действии света на вещество

**основное значение имеет**

**электрическая составляющая электромагнитного**

**поля световой волны**, поскольку именно она

оказывает основное действие на электроны в атомах

вещества.

Поэтому, для описания закономерностей

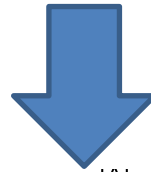
**поляризации** будем рассматривать только

**световой вектор**  $\vec{E}$  –

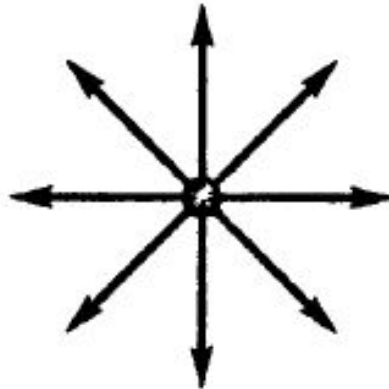
**вектор напряжённости электрического поля.**

# Что такое свет?

Свет представляет собой суммарное электромагнитное излучение множества атомов.



Все ориентации вектора  $E$  будут равновероятны.



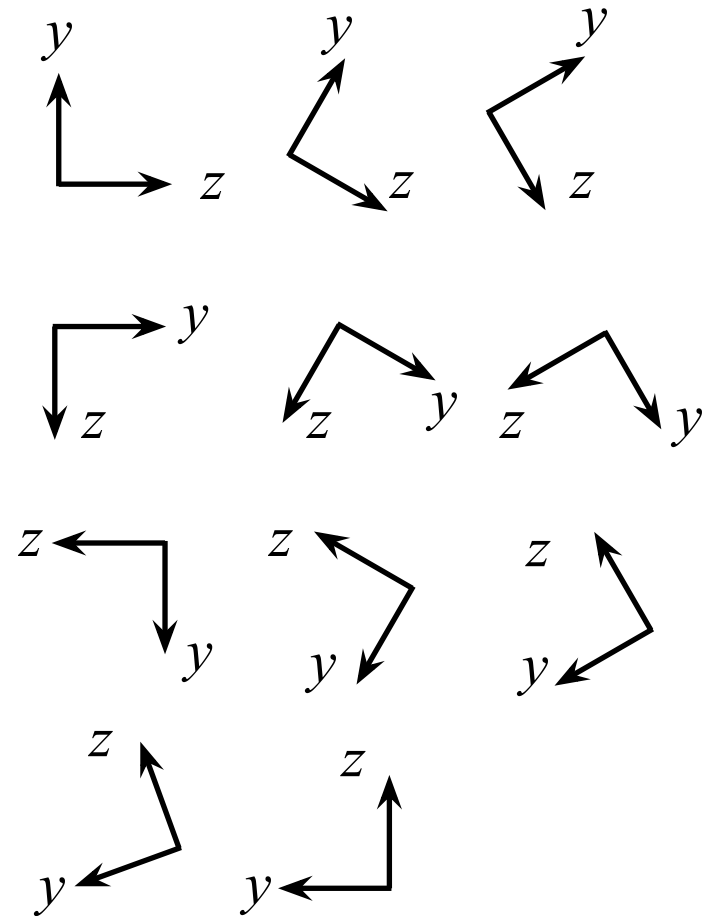
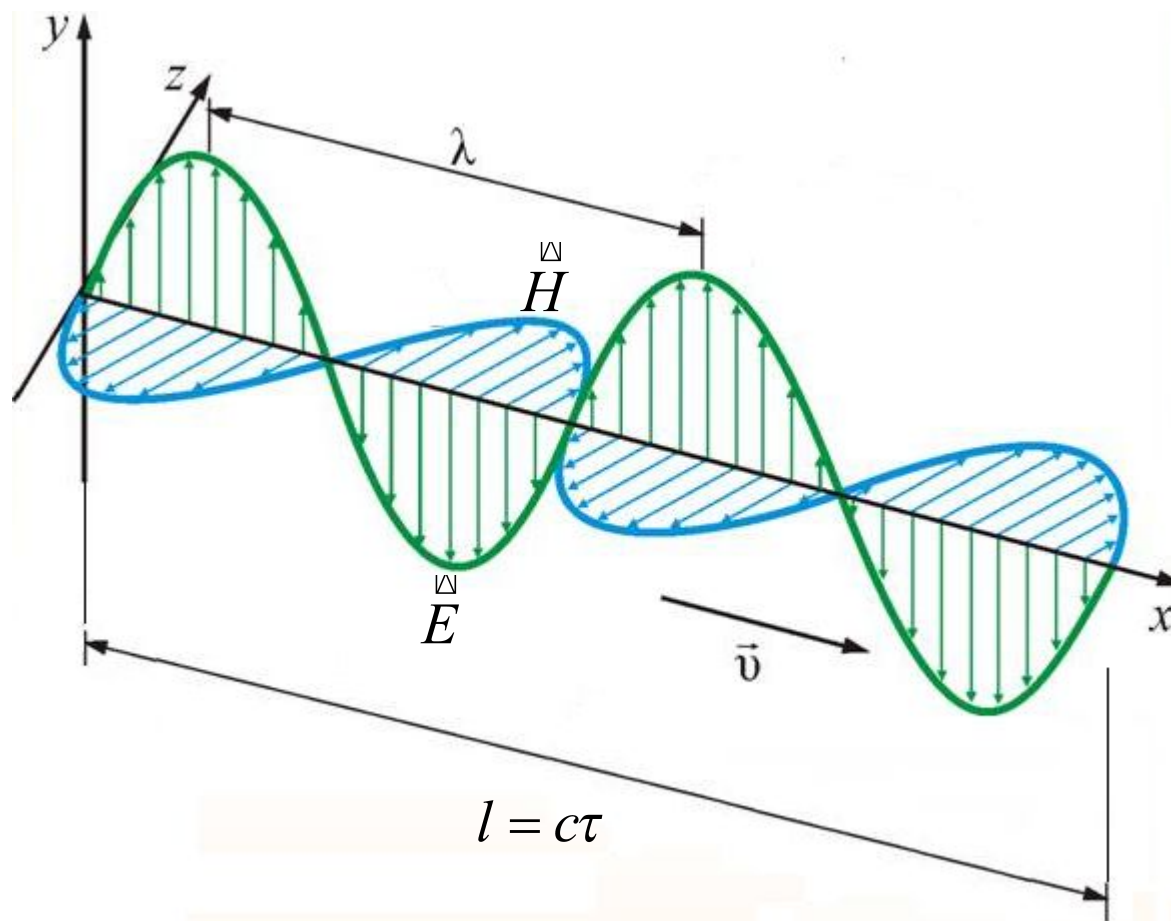
Такой свет называется естественным.

Излучающий атом рассматривается, как колеблющаяся диполь.

Каждый из диполей в течении одного акта испускания, испускает цуг волн линейно поляризованного света.

Множество таких волн, с различными начальными фазами и разной поляризацией, дают естественный свет.

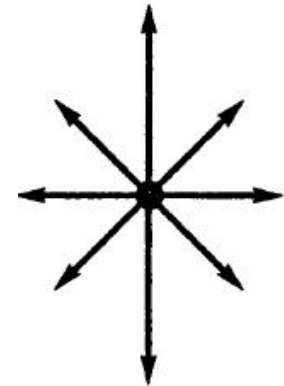
Равновероятно любое положение плоскости поляризации.



**Поляризованный свет** – свет, в котором колебания вектора  $\vec{E}$  каким-либо образом **упорядочены**.

---

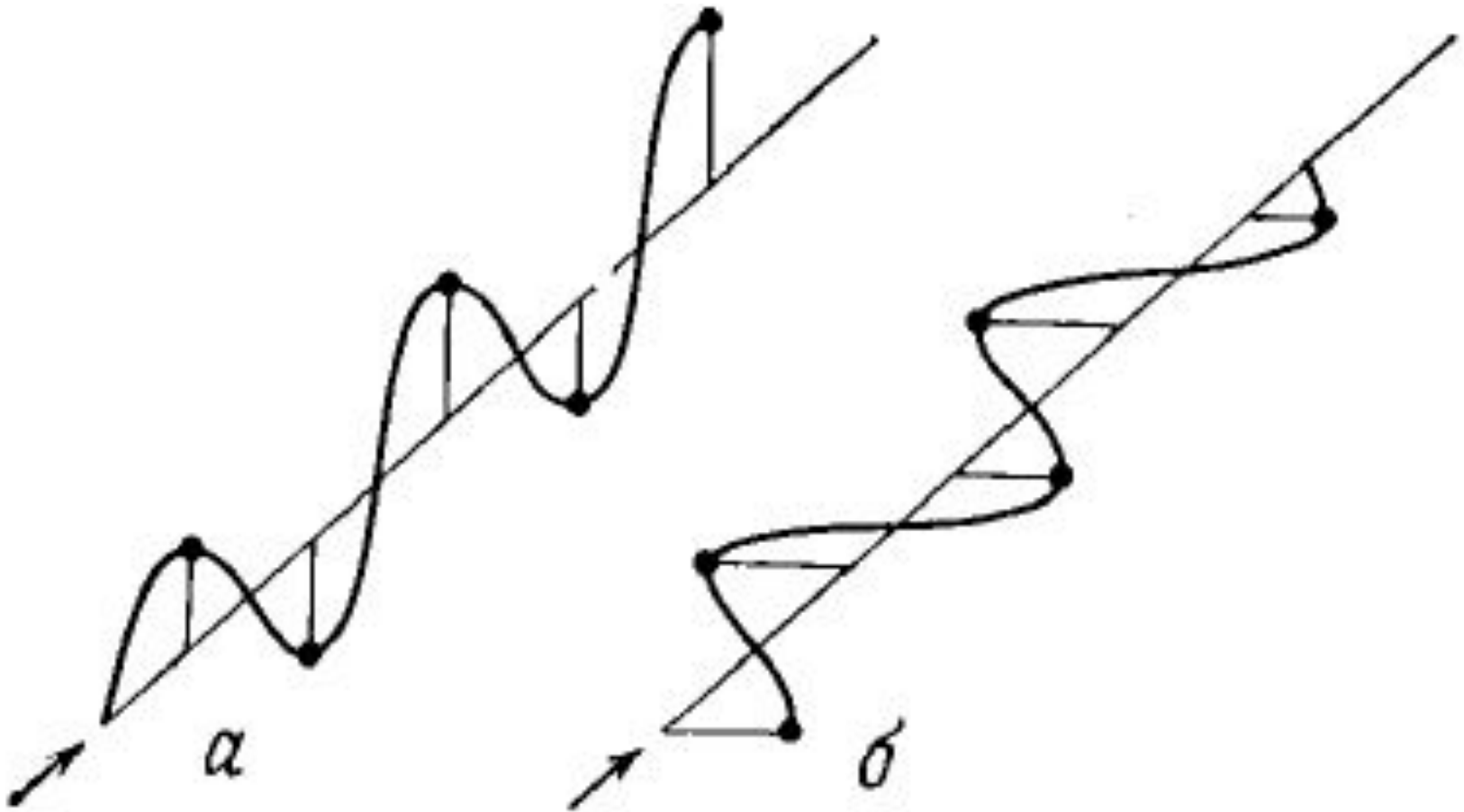
**Частично поляризованный свет** – свет, с преимущественным направлением колебаний вектора  $\vec{E}$ .



**Плоскополяризованный свет** – свет, в котором вектор  $\vec{E}$  колеблется только в одной, проходящей через луч плоскости (**плоскость поляризации**).



**Плоскость поляризации** – плоскость, проходящая через направление колебаний светового вектора плоскополяризованной волны и направление распространения этой волны.



Если пропускать частично поляризованный свет через поляризатор, то при вращении поляризатора вокруг направления луча интенсивность прошедшего света будет изменяться в пределах от  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  (за один полный поворот по два раза будет достигаться оба этих значения)

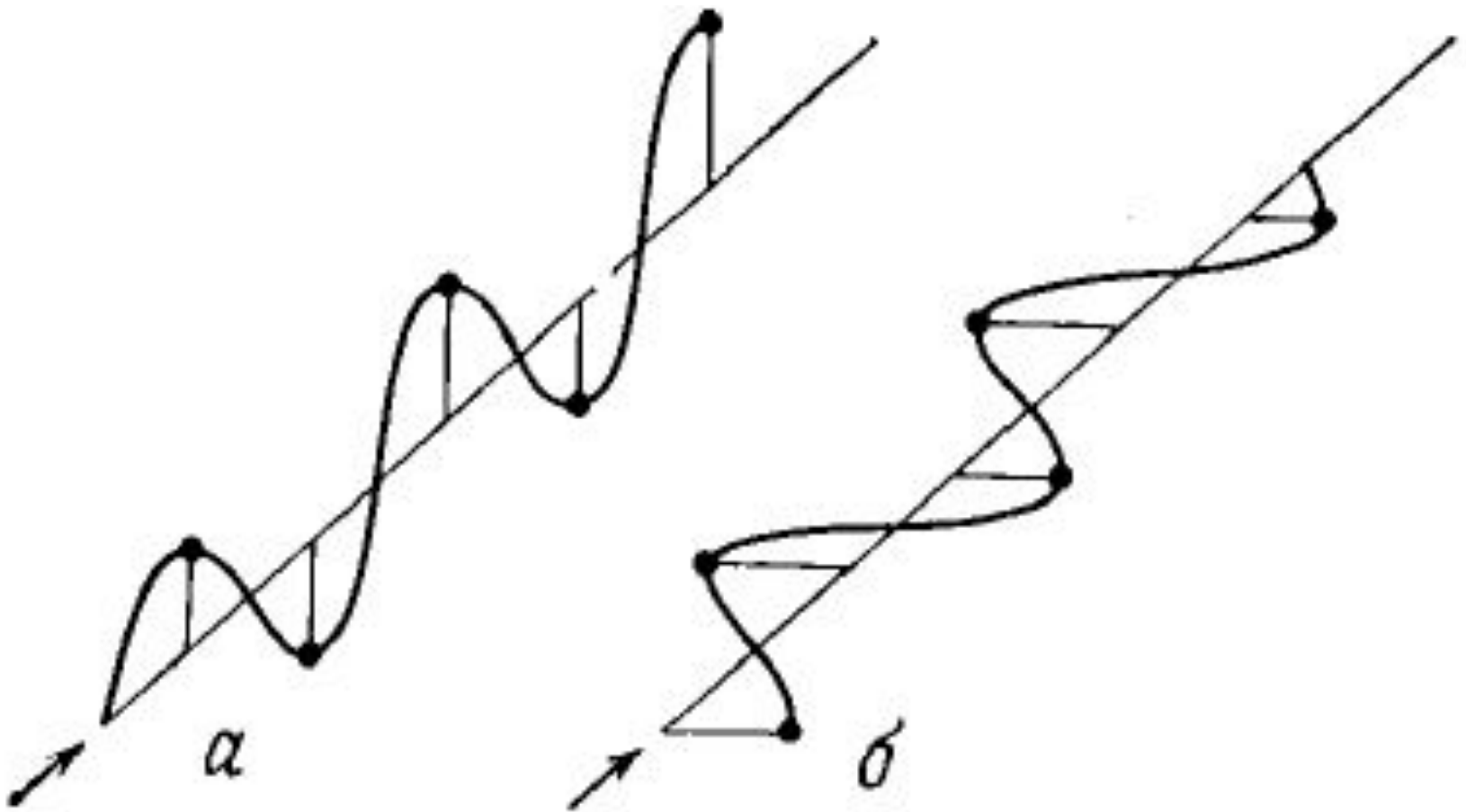
**Степень поляризации – величина**

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  – соответственно **максимальная** и **минимальная интенсивности** света, пропускаемого **поляризатором**.

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

Для **плоскополяризованного** света  $I_{\min} = 0$  и  $P=1$ .

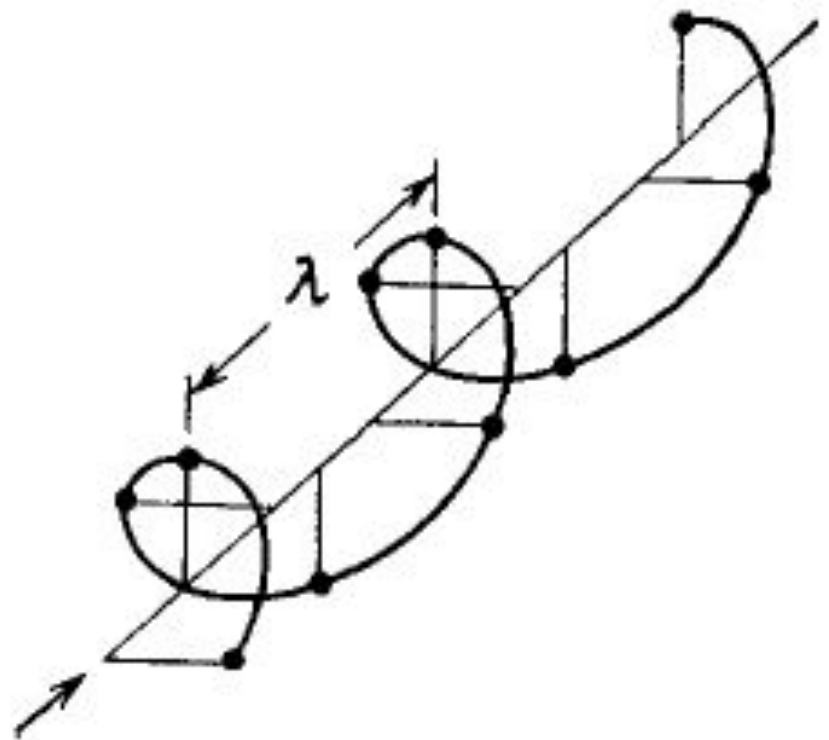


**Плоскополяризованный свет**



**Плоскость поляризации** – плоскость, проходящая через направление колебаний светового вектора плоскополяризованной волны и направление распространения этой волны.

**Эллиптически поляризованный свет** – свет, для которого вектор (вектор  $E$ ) изменяется со временем так, что его конец описывает эллипс, лежащий в плоскости, перпендикулярной лучу.



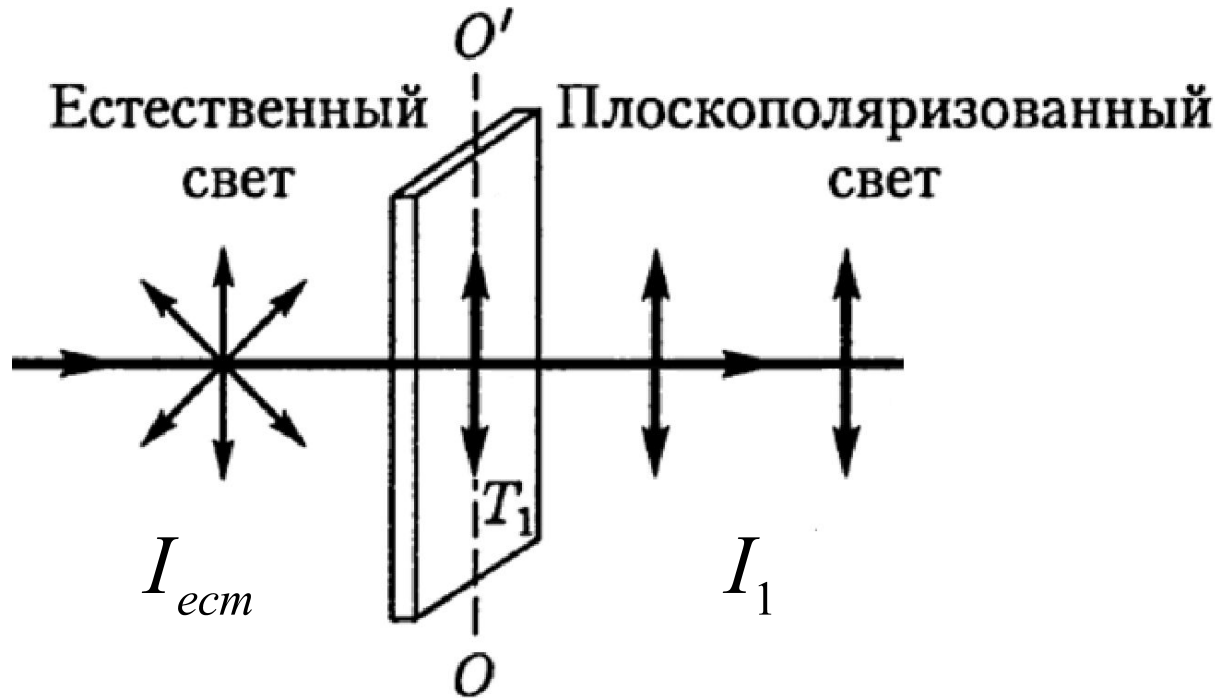
**Вопрос.** Как преобразовать естественный свет в плоскополяризованный?

**Ответ.** Для этого используют так называемые **поляризаторы** – кристаллы (**турмалин**), пропускающие колебания (вектора  $\vec{E}$ ) только определённого направления.

**Пример.** **Поляризатор** может пропускать колебания, параллельные главной **плоскости поляризации**, и полностью задерживать колебания, перпендикулярные этой плоскости.

# Закон Малюса

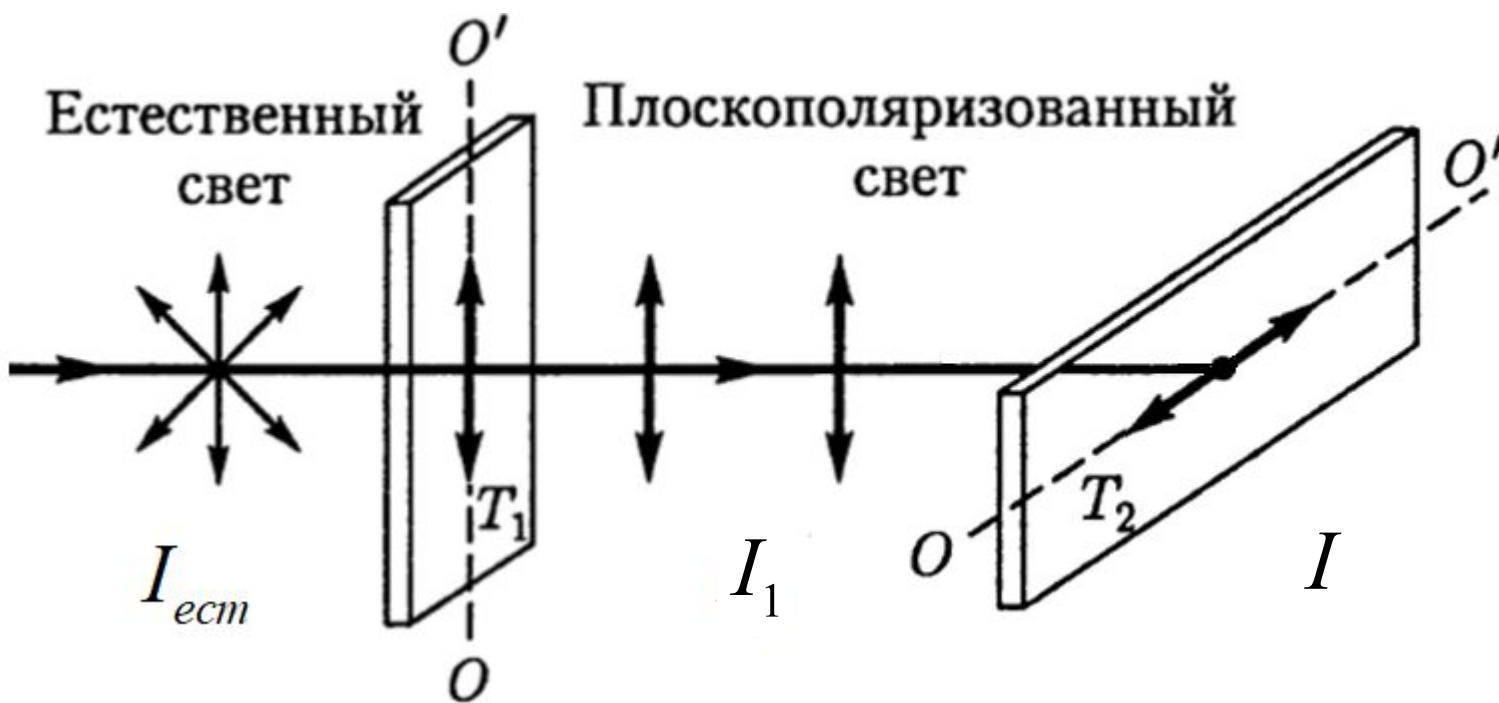
1. Направим **естественный свет** с интенсивностью  $I_{ест}$  перпендикулярно пластинке турмалина  $T_1$ , вырезанной параллельно оптической оси  $OO'$ .



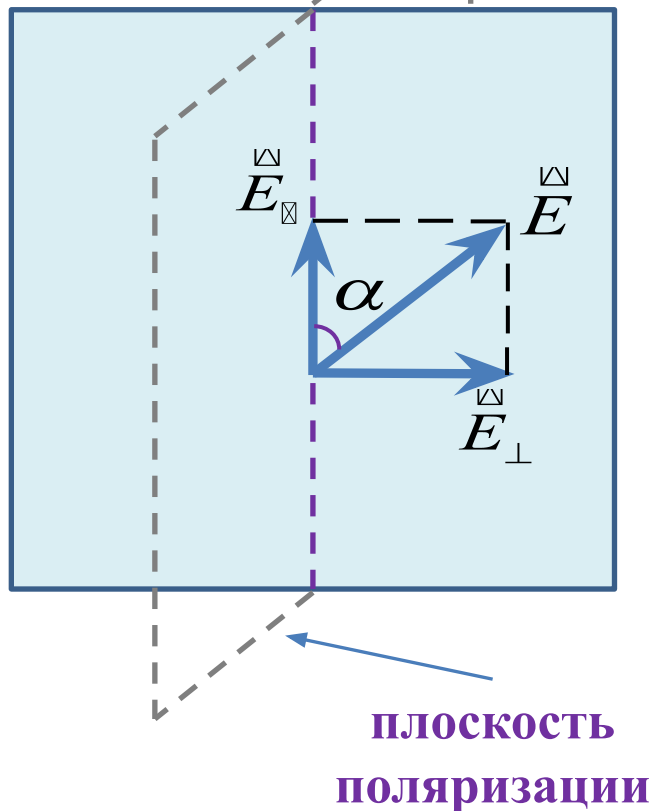
2. Никакие вращения пластины турмалина  $T_1$  **не вызовут** изменения интенсивности вышедшего из него света.

3. На выходе из турмалина  $T_1$  свет всегда будет **плоскополяризованным** с интенсивностью  $I_1$ .

4. При появлении второго кристалла турмалина  $T_2$  свет будет менять **интенсивность**  $I$  в зависимости от угла  $\alpha$  между оптическими осями кристаллов.



# Интенсивности света прошедшие через первый и второй поляризатор



Интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды колебаний:  $I \sim A^2$ .

1. Пропустим естественный свет через *поляризатор* (кристалл турмалина).

2. Разложим **колебание**  $E$  на два колебания с амплитудами  $E_{\parallel}$  и  $E_{\perp}$ :

$$E_{\parallel} = E \cos \alpha;$$

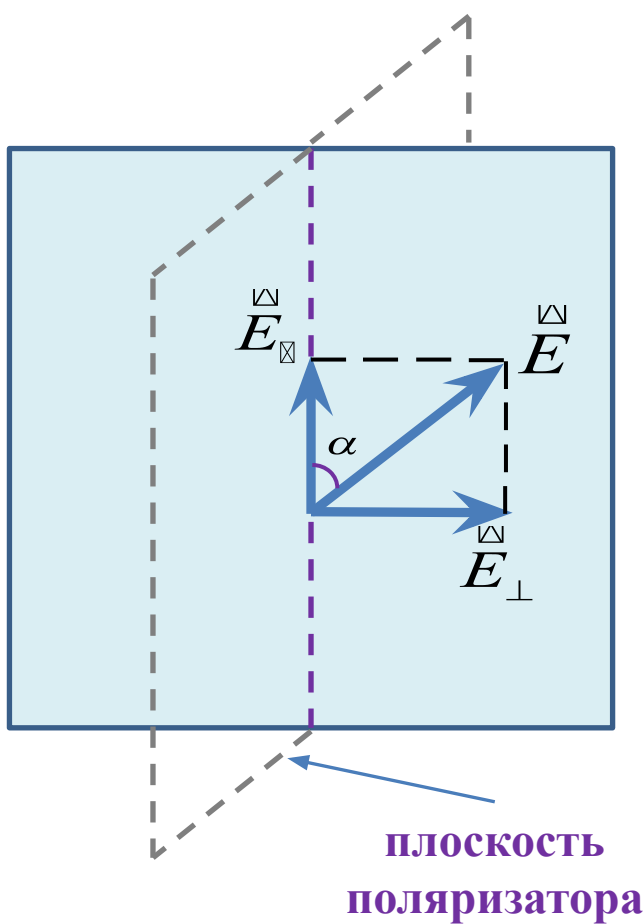
$$E_{\perp} = E \sin \alpha.$$

3. Колебания с амплитудами  $E_{\parallel} = E \cos \alpha$  пройдут через поляризатор

$$E_{\parallel}^2 = E_{ест}^2 \cos^2 \alpha$$

$I_1$                        $I_{ест}$

$$I_1 = I_{ест} \cos^2 \alpha$$



4. В естественном свете все значения  $\alpha$  равновероятны, поэтому доля света, прошедшего через поляризатор, будет равна среднему значению

$$\langle \cos^2 \alpha \rangle = \frac{1}{2}$$

5. Тогда **интенсивность плоскополяризованного света**, прошедшего через первый поляризатор  $T_1$ , будет равна

$$\frac{E_{\parallel}^2}{E^2} = \langle \cos^2 \alpha \rangle = \frac{1}{2}$$

$$I_1 = \frac{I_{ест}}{2}$$

**Вывод:** При вращении поляризатора вокруг направления естественного луча интенсивность прошедшего света остаётся одной и той же, изменяется лишь ориентация плоскости колебаний света.

1. Пусть на поляризатор падает плоскополяризованный свет амплитуды  $E_1$  и интенсивности  $I_1$ .

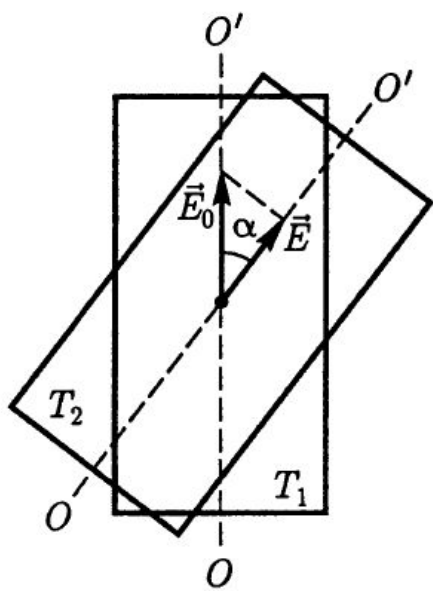
2. Разложим **колебание**  $E_1$  на два колебания с амплитудами  $E_{\parallel}$  и  $E_{\perp}$ :

$$E_{\parallel} = E_1 \cos \alpha.$$

3. Колебания с амплитудами  $E_{\parallel} = E_1 \cos \alpha$  пройдут через поляризатор

$$\frac{E_{\parallel}^2}{I} = \frac{E_1^2}{I_1} \cos^2 \alpha$$

$$I = I_1 \cos^2 \alpha \quad - \text{Закон Малюса.}$$



Подставим на пути естественного луча **два поляризатора**, плоскости которых образуют угол  $\alpha$ .

Из первого поляризатора выйдет плоскополяризованный свет, интенсивность которого

$$I_1 = \frac{I_{ест}}{2}$$

Из второго поляризатора, согласно закону Малюса, выйдет свет интенсивности

$$I = I_1 \cos^2 \alpha$$

Интенсивность света, прошедшего через два поляризатора, равна

$$I = \frac{1}{2} I_{ест} \cos^2 \alpha,$$



При  $I_{\max} = \frac{1}{2} I_{\text{ест}}$  (поляризаторы **параллельны**)

При  $I_{\min} = 0$  (поляризаторы **скрещены**)

## Закон Малюса

**Интенсивность  $I$**  света, прошедшего через **второй** кристалл (турмалина) меняется в зависимости от **угла  $\alpha$**  между оптическими осями **первого** и **второго** кристаллов:

$$I = I_1 \cos^2 \alpha,$$

$$\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right]$$

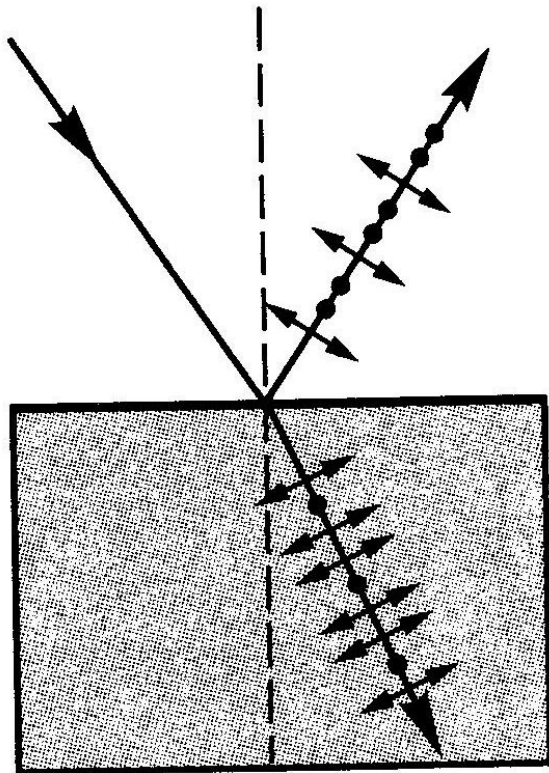
где

$I_1$  – **интенсивность** света, **падающего** на второй кристалл;

$I$  – **интенсивность** света, **вышедшего** из него.

# Поляризация света при отражении и преломлении

Если **естественный свет** падает на границу раздела двух диэлектриков (например, воздуха и стекла), то **отражённый** и **преломлённый** лучи являются **частично поляризованными**.



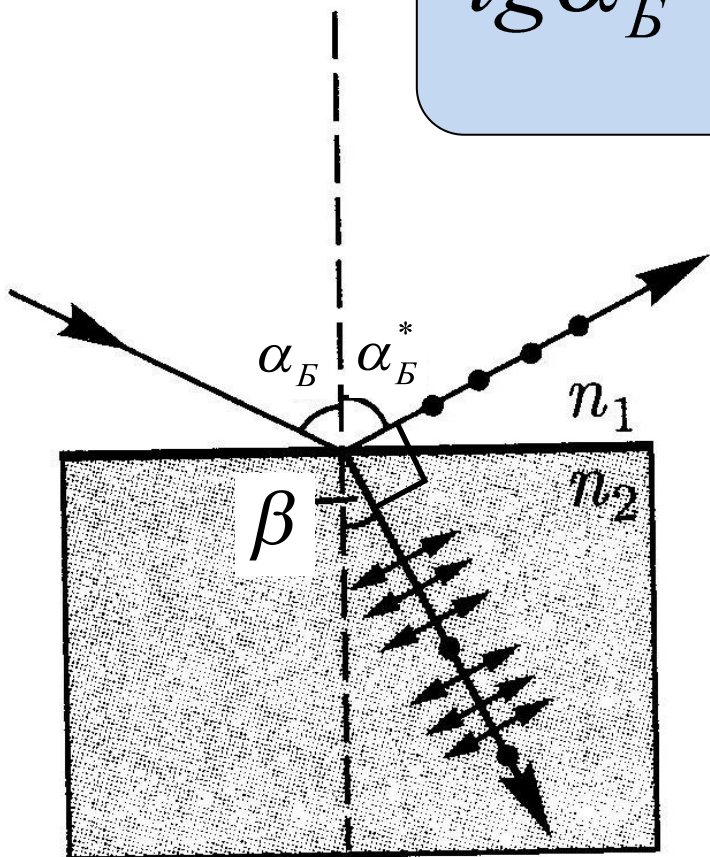
В отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные плоскости падения (**чёрные точки**), а в преломленном - колебания, параллельные плоскости падения (изображены **стрелками**).

# Угол Брюстера

Если угол падения равен **углу Брюстера**  $\alpha_B$ , который определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{n_2}{n_1},$$

то отраженный луч является **плоскополяризованным**.



$n_2$  — абсолютный показатель преломления второй среды;  
 $n_1$  — абсолютный показатель преломления первой среды.

- **Преломленный** луч в этом случае поляризуется **максимально**, но не полностью.
- При этом **отраженный** и **преломленный** лучи **взаимно перпендикулярны**.

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Запишем **закон преломления**

$$\frac{\sin \alpha_B}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Приравняем

$$\frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B} = \frac{\sin \alpha_B}{\sin \beta}$$

$$\cos \alpha_B = \sin \beta$$

Отсюда

$$\alpha_B + \beta = \frac{\pi}{2}.$$

По **закону отражения**

$$\alpha_B = \alpha_B^*$$

Поэтому

$$\alpha_B^* + \beta = \frac{\pi}{2}.$$

# Двойное лучепреломление

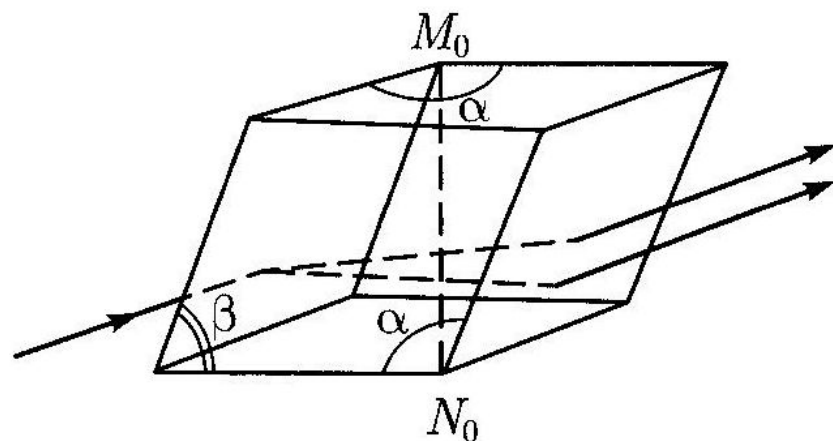
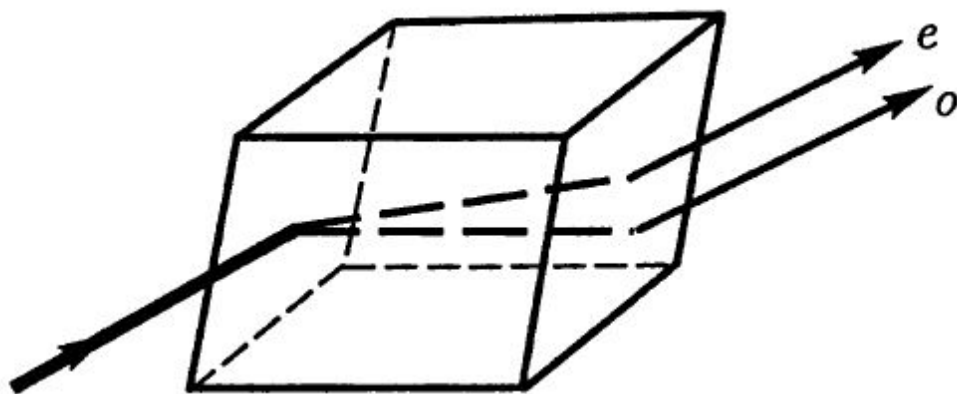
**Двойное лучепреломление** – это способность прозрачных кристаллов (кроме оптически изотропных кристаллов кубической системы) **раздваивать** каждый падающий на них световой пучок.

Это явление объясняется **особенностями распространения света** в анизотропных средах и непосредственно вытекает из **уравнений Максвелла**.

**Кристаллы** в зависимости от типа их симметрии бывают **одноосные** и **двухосные**, т.е. имеют **одну** или **две оптические оси**.



Если на кристалл направить узкий пучок света, то из кристалла выйдут **два** пространственно разделенных луча **параллельных** друг другу и падающему лучу.



Даже в том случае, когда пучок падает на кристалл **нормально**, **преломленный** пучок разделяется **на два**: один из них является продолжением первичного (называется **обыкновенным (o)**), а второй отклоняется (называется **необыкновенным (e)**).

**Направление** в оптически анизотропном кристалле, по которому луч света распространяется, не испытывая двойного лучепреломления, называется **оптической осью кристалла**

(оптическая ось совпадет по направлению с диагональю  $M_0N_0$  кристалла на предыдущем слайде).

Речь идёт именно о **направлении**, а не о прямой линии, проходящей через какую-то точку кристалла. Любая прямая, проходящая параллельно данному направлению, является **оптической осью кристалла**.

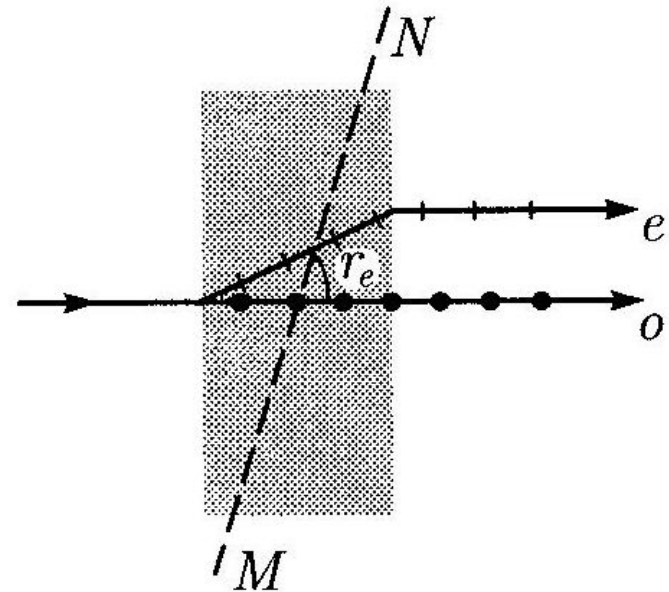
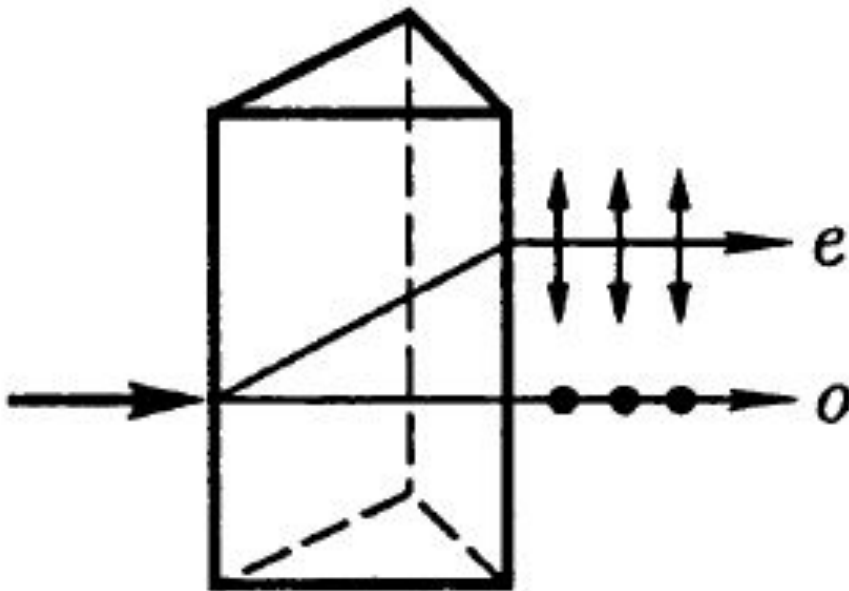
**Плоскость**, проходящая через направление луча света и **оптическую ось кристалла** называется **главной плоскостью кристалла**.

## ***o*- и *e*-лучи плоскополяризованы**

во взаимно перпендикулярных плоскостях:  
колебания **светового вектора  $E$**  в ***o*-луче** происходят  
перпендикулярно главной плоскости,  
в ***e*-луче** – **в главной плоскости**.

**$MN$**  - **оптическая ось кристалла**;

$r_e$  – угол преломления **необыкновенного** луча.



***o*-луч** распространяется по всем направлениям кристалла с одинаковой скоростью

$$v_0 = \frac{c}{n_0}.$$

**Показатель преломления  $n_0$**   
для него есть величина **постоянная**.

**Пояснение.** При любом направлении **обыкновенного луча** колебания светового вектора  **$E$**  перпендикулярны оптической оси кристалла, поэтому **обыкновенный луч** распространяется по всем направлениям с одинаковой скоростью.

*e*-лучи распространяются по различным направлениям с разными скоростями

$$v_e = \frac{c}{n_e}$$

Показатель преломления  $n_e$  необыкновенного луча является переменной величиной, зависящей от направления луча.

**Пояснение.** Разные значения скоростей связаны с тем, что угол между направлением колебаний **светового вектора  $E$**  и **оптической осью** отличен от прямого и зависит от направления луча.

Для луча, распространяющегося  
вдоль оптической оси,

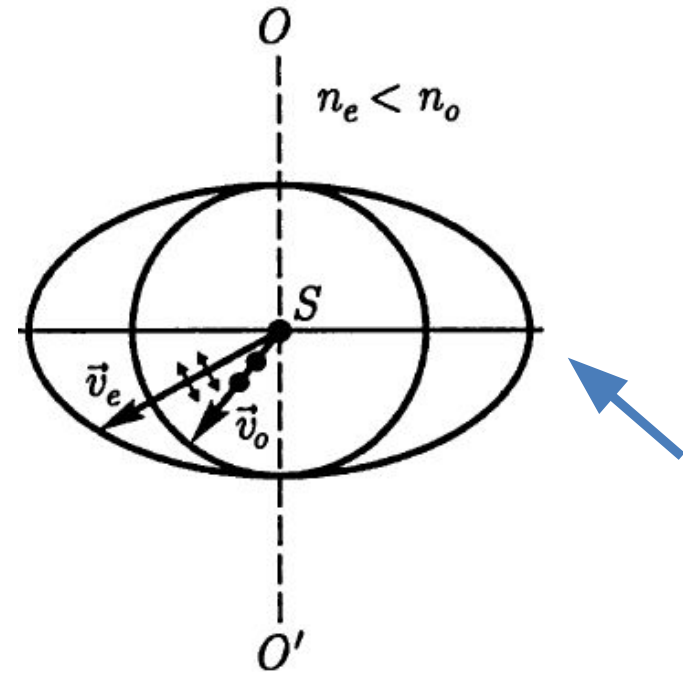
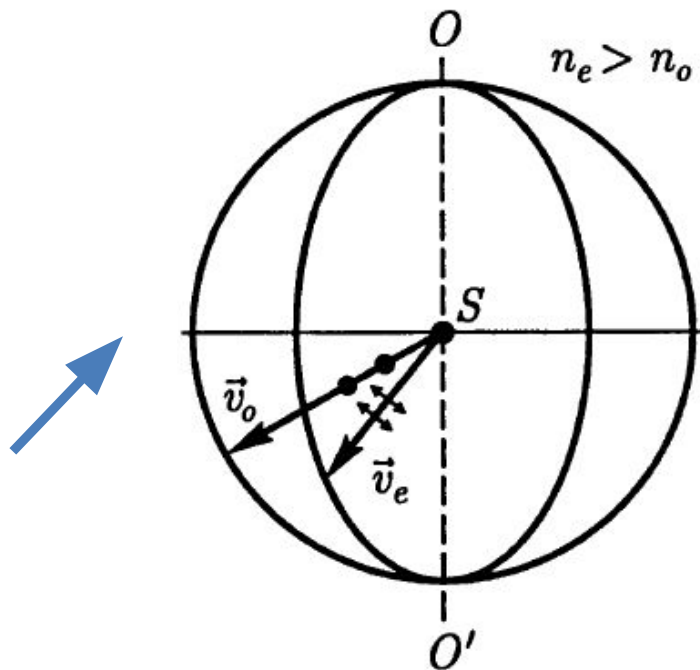
$$n_0 = n_e, v_0 = v_e,$$

т.е. вдоль оптической оси существует  
**только одна скорость распространения света.**

**Различие** в  $v_e$  и  $v_0$  для всех направлений, кроме  
направления оптической оси, и обуславливает явление  
**двойного лучепреломления света**  
**в одноосных кристаллах.**

# Особенности распространения лучей в одноосных кристаллах

положительный  
кристалл



отрицательный  
кристалл

$S$  – точечный источник света;  
 $OO'$  – направление оптической оси.

Волновая поверхность  $o$ -луча – сфера;  
 $e$ -луча – эллипс.

**Поляризатор** и **анализатор** представляют собой два совершенно одинаковых кристалла.

Их можно поменять местами и это ни на что не повлияет.

**Анализатор** (второй **поляризатор**) – это кристалл  $T_2$ , служащий для анализа поляризации **плоскополяризованного света**.