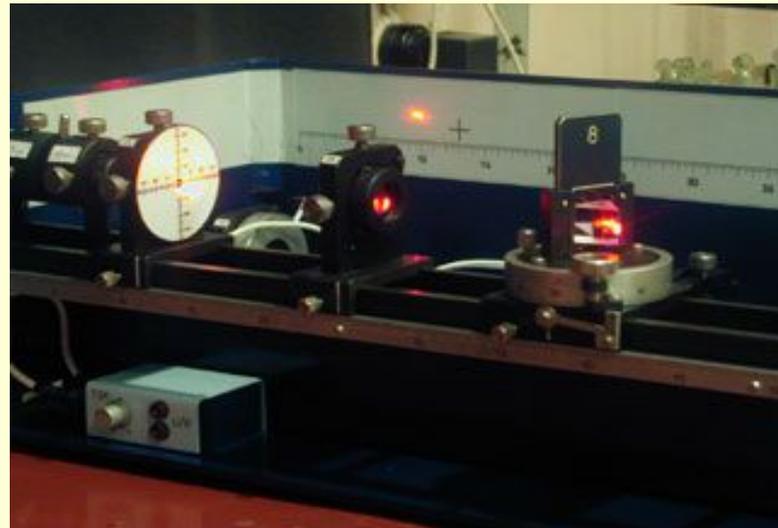


Оптика и квантовая физика

для студентов
2 курса ФТФ и ГГФ



Кафедра общей физики

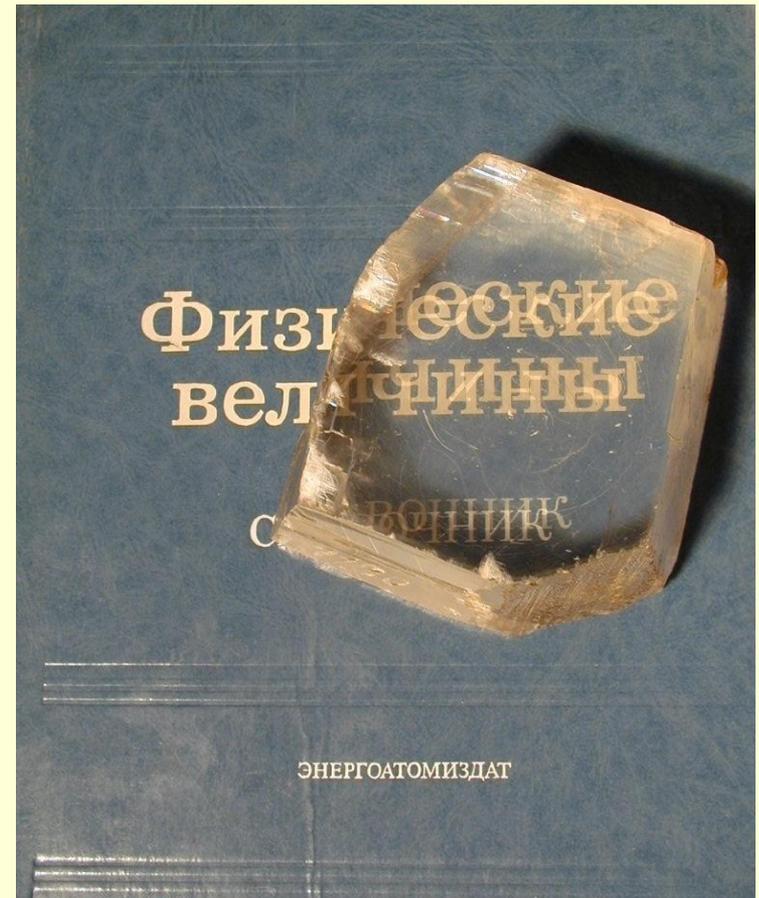


Поляризация волн.

Часть 2.

Лекция 6

- ✓ **Оптические свойства анизотропной среды. Линейное двулучепреломление**
- ✓ **Прохождение света через линейные фазовые пластинки**
- ✓ **Искусственная оптическая анизотропия. Фотоупругость.**
- ✓ **Циркулярная фазовая анизотропия. Электрооптические и магнитооптические эффекты.**



Оптические свойства анизотропной среды



Оптическая анизотропия - зависимость диэлектрической проницаемости вещества ϵ от направления в кристалле.

$$n = \sqrt{\epsilon}$$

Совокупность всевозможных значений диэлектрической проницаемости образует поверхность эллипсоида

Направления осей в этом эллипсоиде называются главными направлениями в кристалле

Для главных направлений $E \uparrow \uparrow D$



$$\mathbf{T}_3 = \begin{vmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{vmatrix} = \left| \epsilon_{ij} \right|$$

- тензор диэлектрической
проницаемости

Совместим оси координат (x, y, z) с главными направлениями кристалла.

$\epsilon_{ij} = 0$. $\epsilon_{xx} = \epsilon_1$, $\epsilon_{yy} = \epsilon_2$, $\epsilon_{zz} = \epsilon_3$ - главные значения диэлектрической проницаемости.

$$\mathbf{E} = E_x \cdot \mathbf{i} + E_y \cdot \mathbf{j} + E_z \cdot \mathbf{k}$$

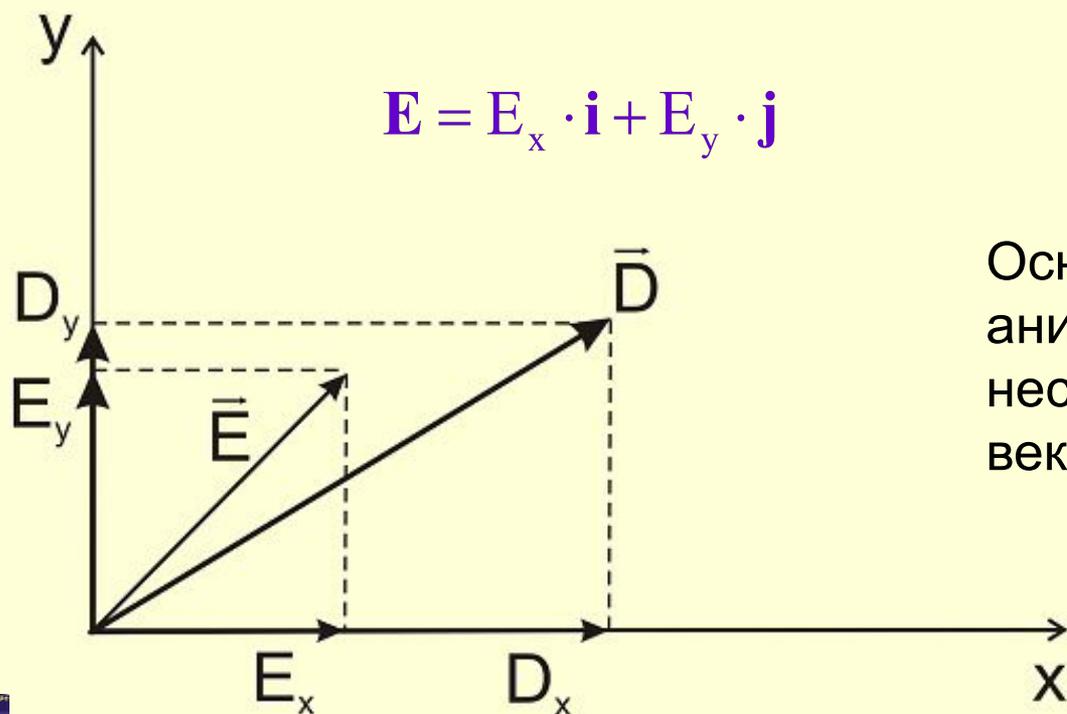
- электромагнитная волна,
распространяющаяся в кристалле



$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_x \cdot \mathbf{i} + \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_y \cdot \mathbf{j} + \varepsilon_0 \varepsilon_3 E_z \cdot \mathbf{k}$$

- вектор электромагнитной индукции, описывающий поле в веществе

$$\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2 \neq \varepsilon_3 \quad \longrightarrow \quad \mathbf{D} \nparallel \mathbf{E}$$



Основной признак оптической анизотропии вещества – несовпадение направлений векторов \mathbf{D} и \mathbf{E} .

Структура электромагнитной волны в анизотропной среде

Главным значениям диэлектрической проницаемости вещества ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$) соответствуют главные показатели преломления (n_1, n_2, n_3) и главные скорости распространения света в кристалле

$$v_1 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_1}}, \quad v_2 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_2}}, \quad v_3 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_3}}$$

Скорость света в кристалле определяется направлением колебаний вектора \mathbf{E} .

Свет будет распространяться со скоростью v_1 , если его электрическое поле (\mathbf{E}) совершает колебания вдоль первого главного направления

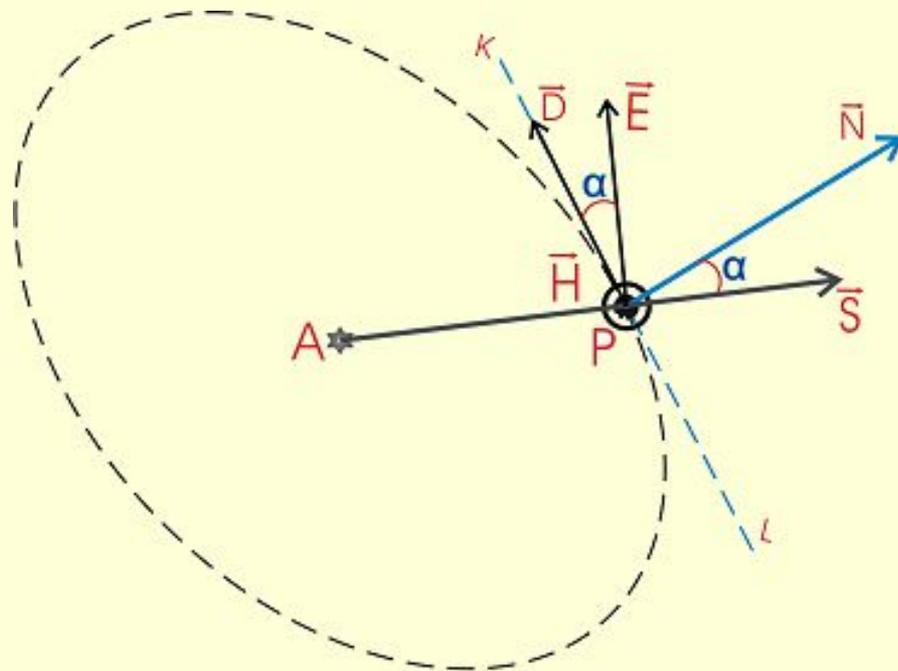
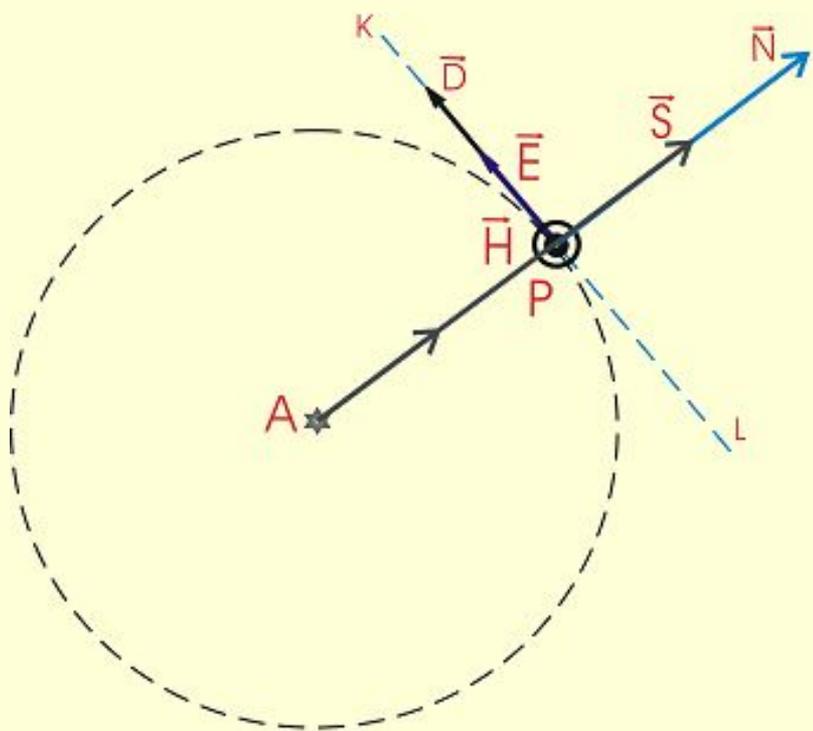


Величины, характеризующие структуру электромагнитной волны в каждой точке наблюдения

- **S** – вектор плотности потока энергии, показывающий направление распространения энергии;
- **N**– нормаль к плоскости, касательной к волновой поверхности, показывающая направление распространения фазы;
- **E** – напряженность электрического поля волны;
- **H**– напряженность магнитного поля волны;
- **D**– вектор электрической индукции.



Взаимное направление векторов для изотропной и анизотропной сред



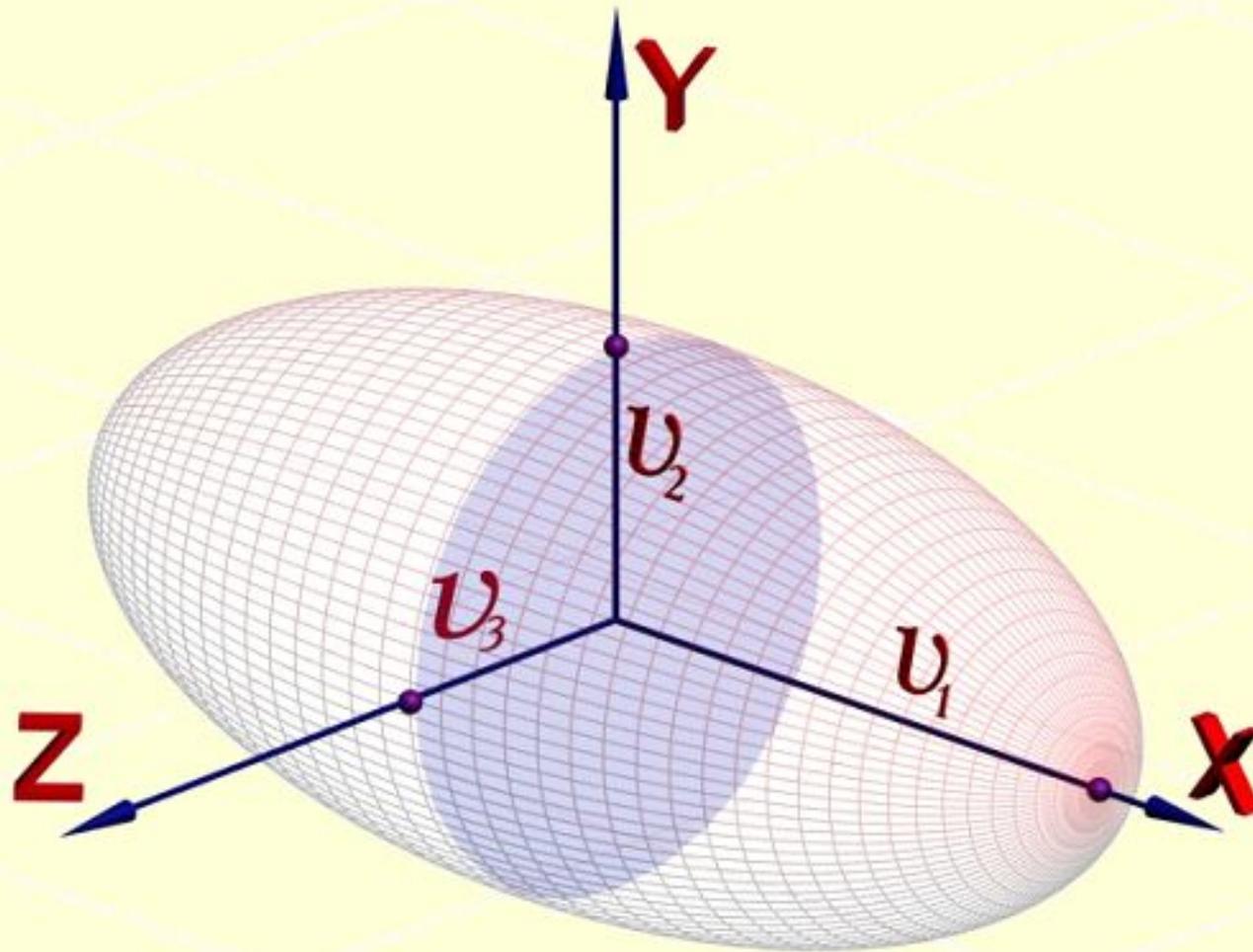
Структура волны в изотропной среде ($\mathbf{S} \uparrow \uparrow \mathbf{N}$, $\mathbf{E} \uparrow \uparrow \mathbf{D}$)

Структура волны в анизотропной среде ($\mathbf{S} \nabla \mathbf{N}$, $\mathbf{E} \nabla \mathbf{D}$)

A – точечный источник света; KL – плоскость, касательная к волновой поверхности.

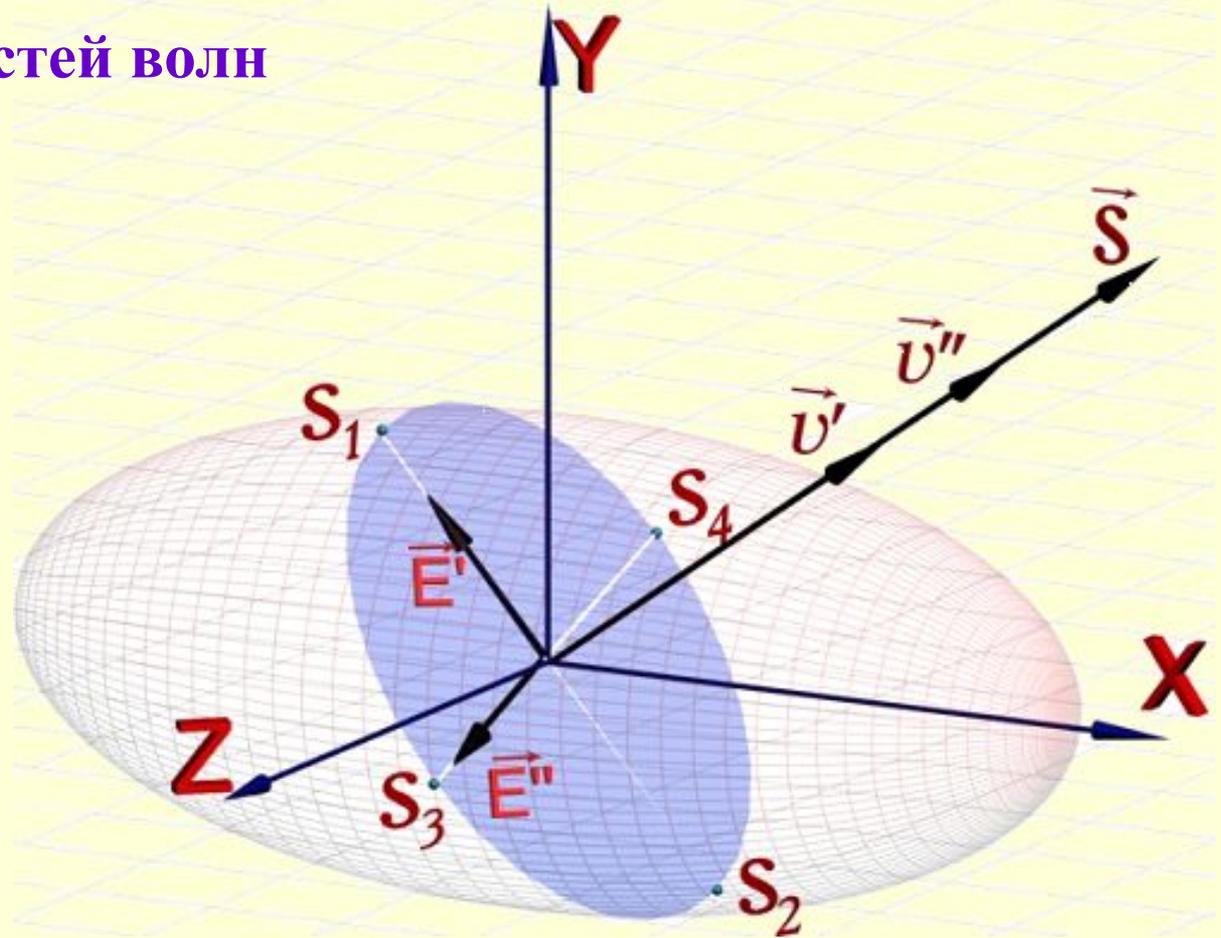


Эллипсоид лучевых скоростей или эллипсоид Френеля



$$\frac{x^2}{u_1^2} + \frac{y^2}{u_2^2} + \frac{z^2}{u_3^2} = 1$$

Нахождение скоростей волн



Оптическая ось – направление, при распространении волны вдоль которого скорость ее не зависит от направления колебаний электрического вектора \mathbf{E} .

Плоскость, проходящая через луч и оптическую ось, называется плоскостью главного сечения кристалла или **главной плоскостью**.

Одноосные кристаллы



Кристаллы с одной оптической осью называются *одноосными* $u_2 = u_3 \neq u_1$. Падающая на одноосный кристалл волна возбуждает две волны, одна из которых сферическая (*обыкновенная*), а другая эллиптическая (*необыкновенная*).

$\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$ – поперечная проницаемость

$\varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_1$ – продольная проницаемость

$n_o = \sqrt{\varepsilon_{\perp}}$ – *обыкновенный*

$n_e = \sqrt{\varepsilon_{\parallel}}$ – *необыкновенный*

показатели

преломления

$u_o = c/n_o$ – скорость обыкновенной волны

$u_e = c/n_e$ – скорость необыкновенной волны



Одноосные кристаллы

Волна распространяется с лучевой скоростью u_o , если направление колебаний электрического поля \mathbf{E} *перпендикулярно* оптической оси кристалла, и со скоростью u_e , если направление колебаний \mathbf{E} *параллельно* оптической оси.

Кристаллы

положительные

$$(n_o < n_e)$$

кварц

$$n_o = 1.309, n_e = 1.311$$

отрицательные

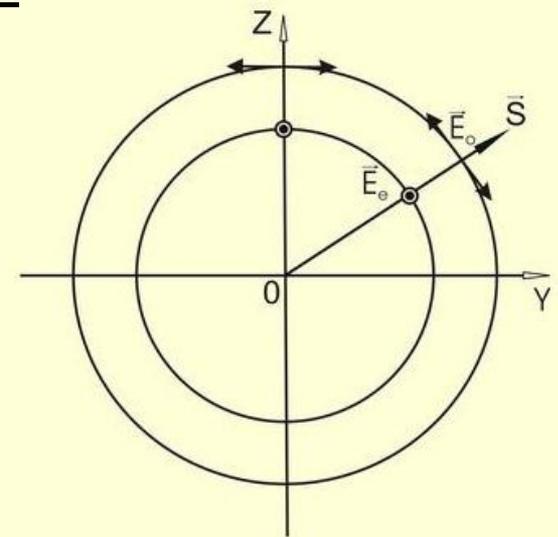
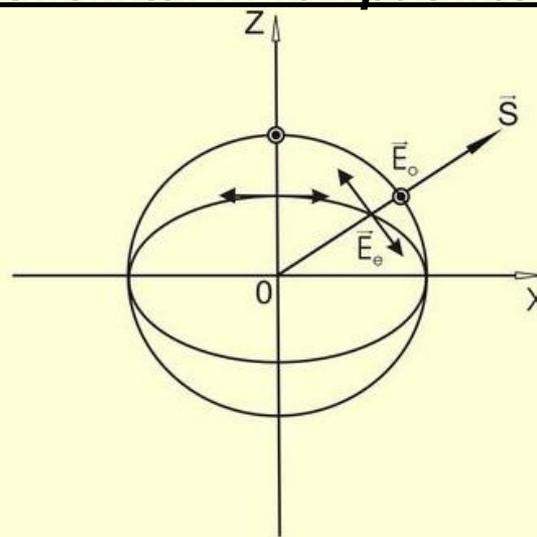
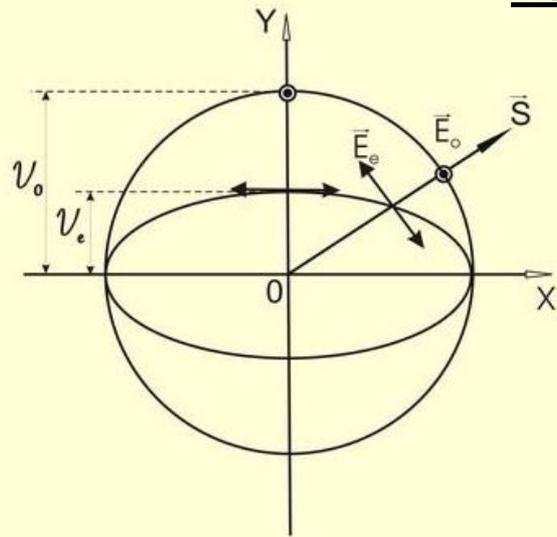
$$(n_o > n_e)$$

исландский шпат

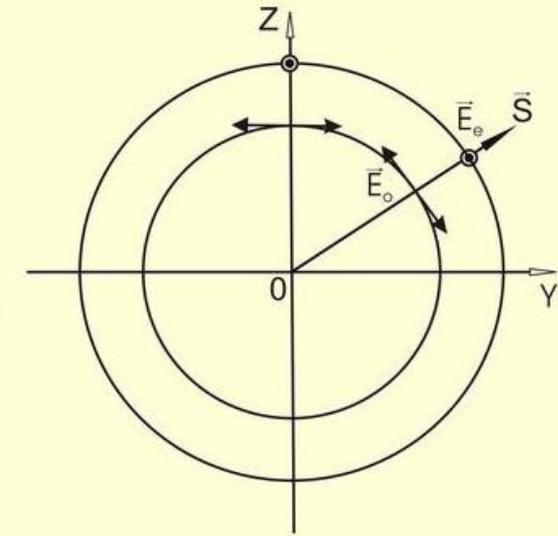
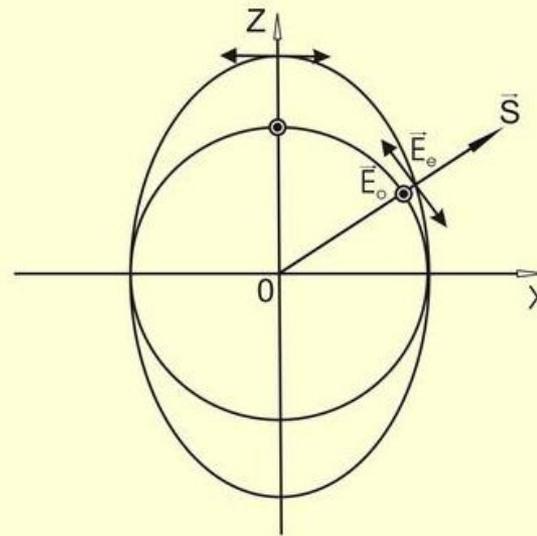
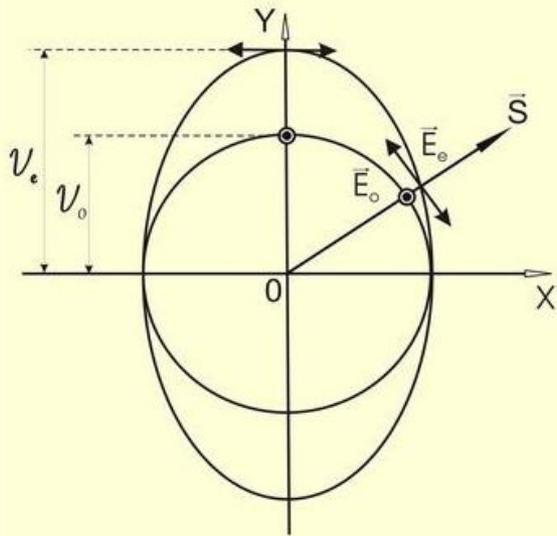
$$n_o = 1.658, n_e = 1.486$$

Лучевые поверхности обыкновенной и необыкновенной волн в одноосных кристаллах

положительный кристалл:



отрицательный кристалл:



Особенности обыкновенной и необыкновенной волн

| Обыкновенная волна | Необыкновенная волна |
|---|---|
| Волновая поверхность – сфера | Волновая поверхность – эллипсоид вращения |
| Вектор E перпендикулярен главному сечению | Вектор E лежит в плоскости главного сечения, составляя разные углы с оптической осью |
| Скорость волны по любому направлению $u_o = c/n_o = c/\sqrt{\epsilon_{\perp}}$ | Скорость волны зависит от направления $u_o \leq u \leq u_e$ или $u_e \leq u \leq u_o$ (в зависимости от знака кристалла) |

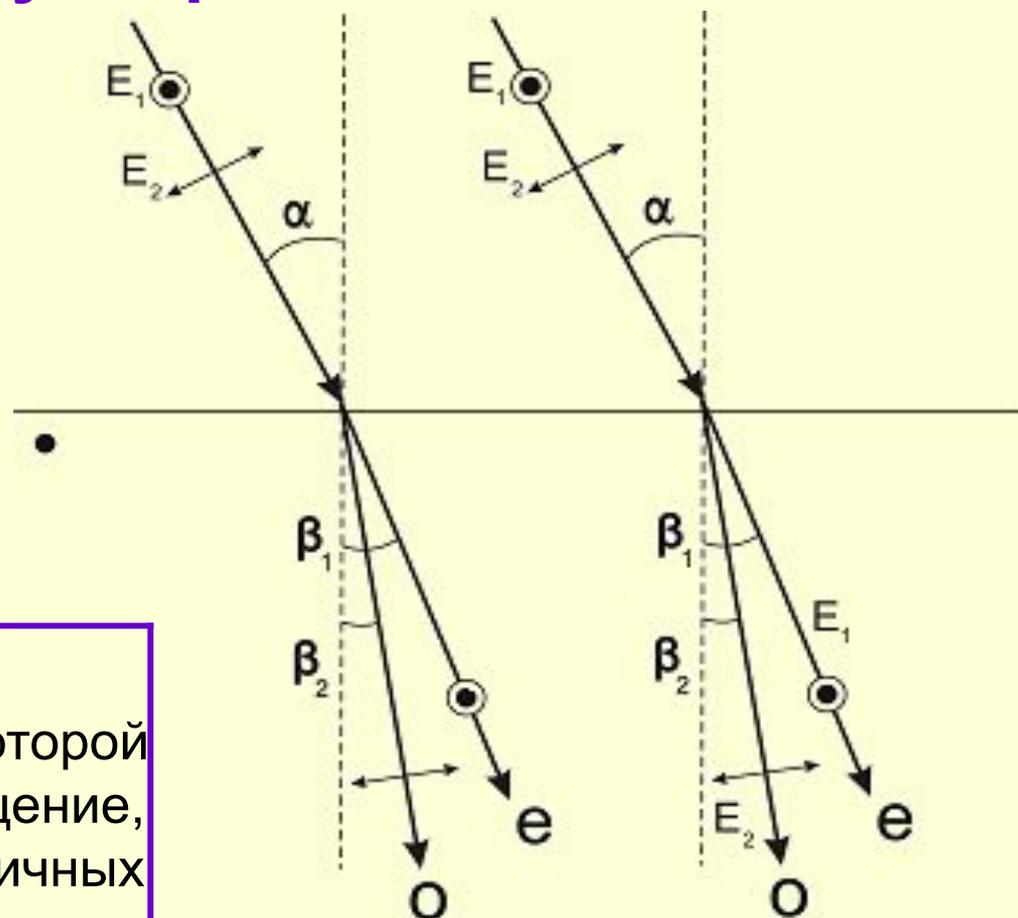


Двойное лучепреломление

Разделение параллельного пучка лучей, падающего на грань кристалла, в результате преломления на два пучка, соответствующих о- и е- волнам, называется *двойным лучепреломлением*.

Принцип Гюйгенса:

каждая точка среды, до которой доходит волновое возмущение, является источником вторичных элементарных волн. Огибающая этих волн в некоторый момент времени является волновым фронтом.



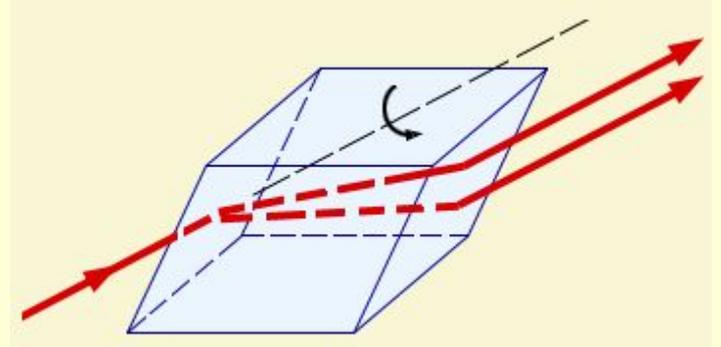
Направления о- и е- пучков можно найти, пользуясь построением Гюйгенса.

Двойное лучепреломление

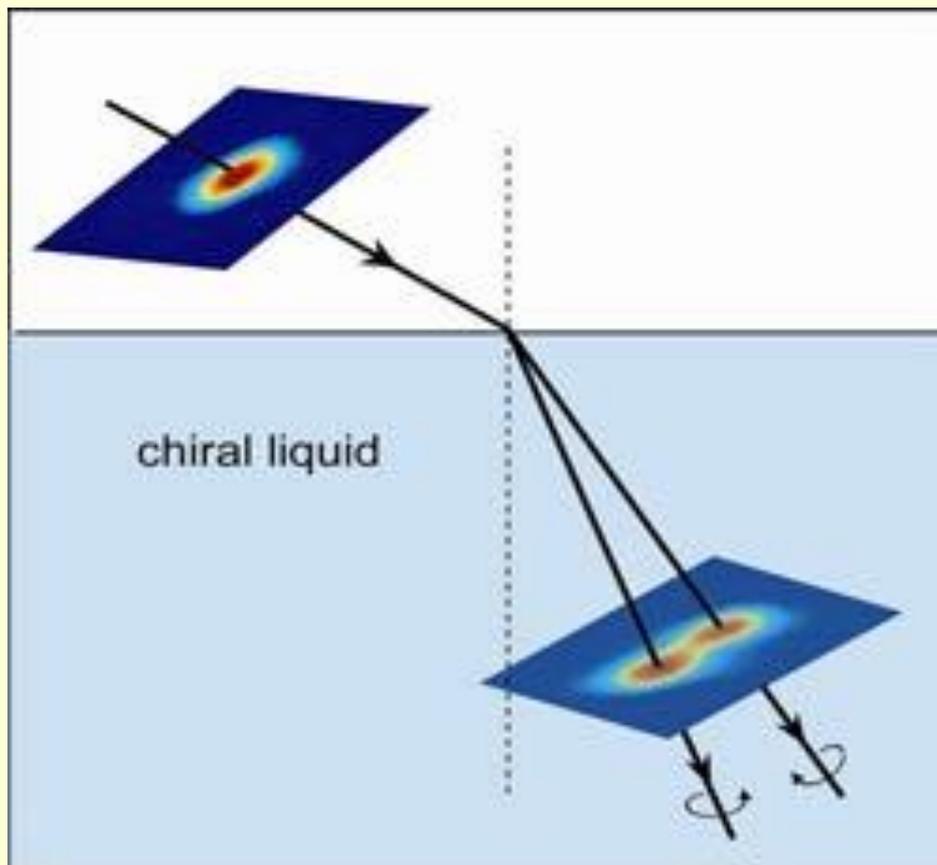
Физические
величины

СВОИМИ
ВОЗНИК

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ



*Прохождение света
через кристалл
исландского шпата
 CaCO_3*



Луч линейно поляризованного света расщепляется на два при прохождении через жидкую смесь оптических антиподов лимонена.

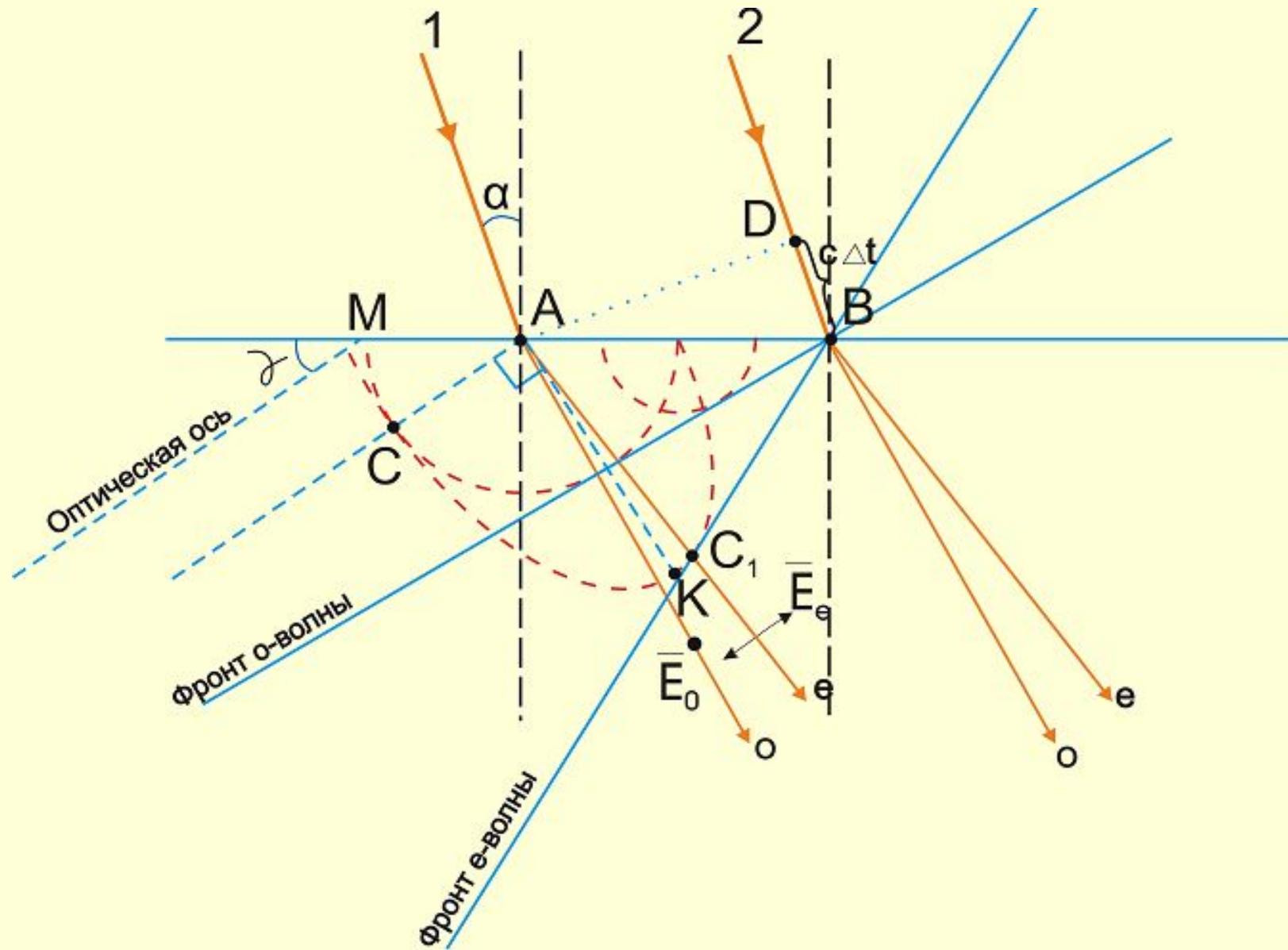


Двойное лучепреломление в кристалле кальцита

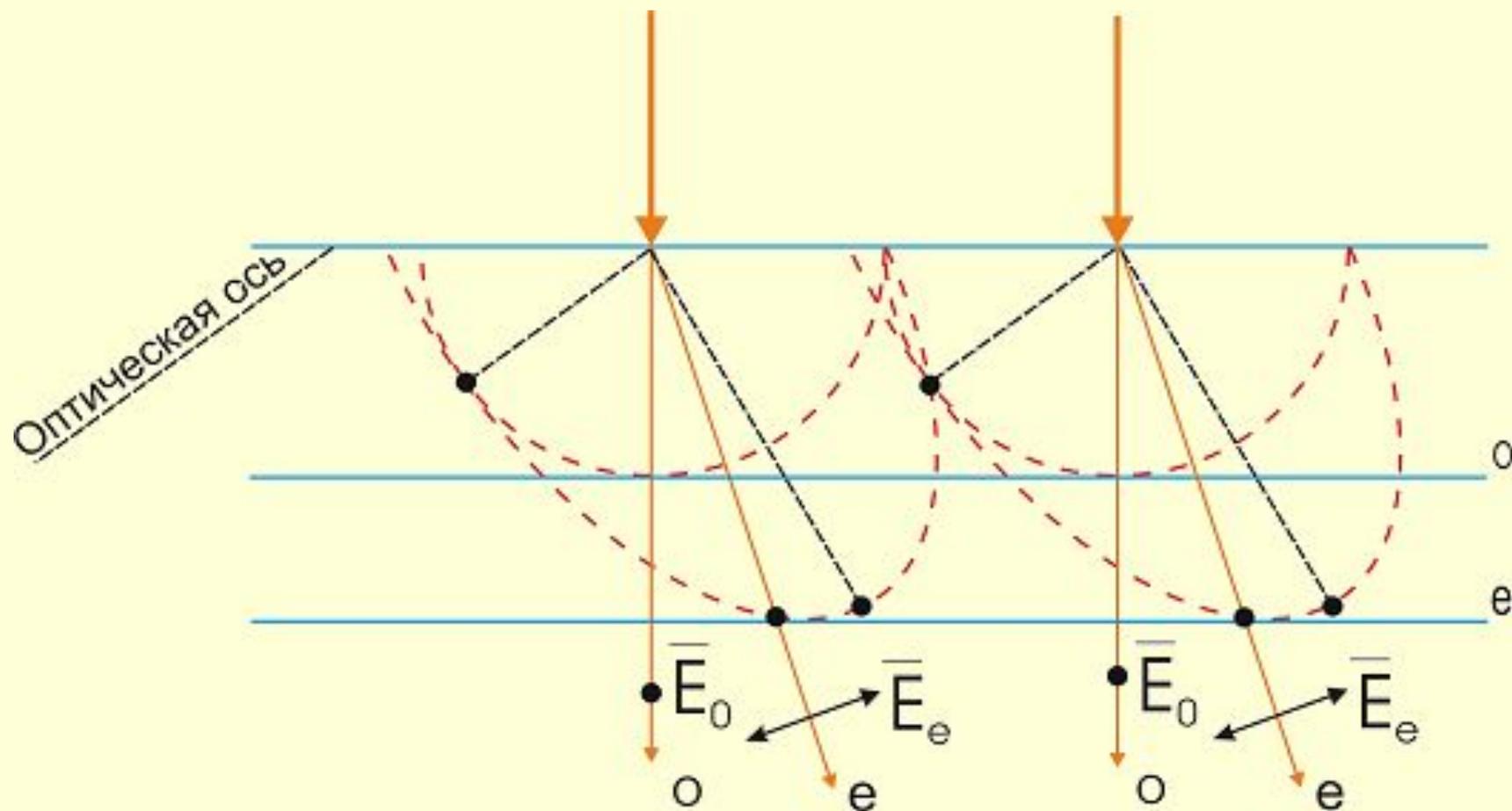
[Видео](#)



Построение Гюйгенса в одноосном кристалле



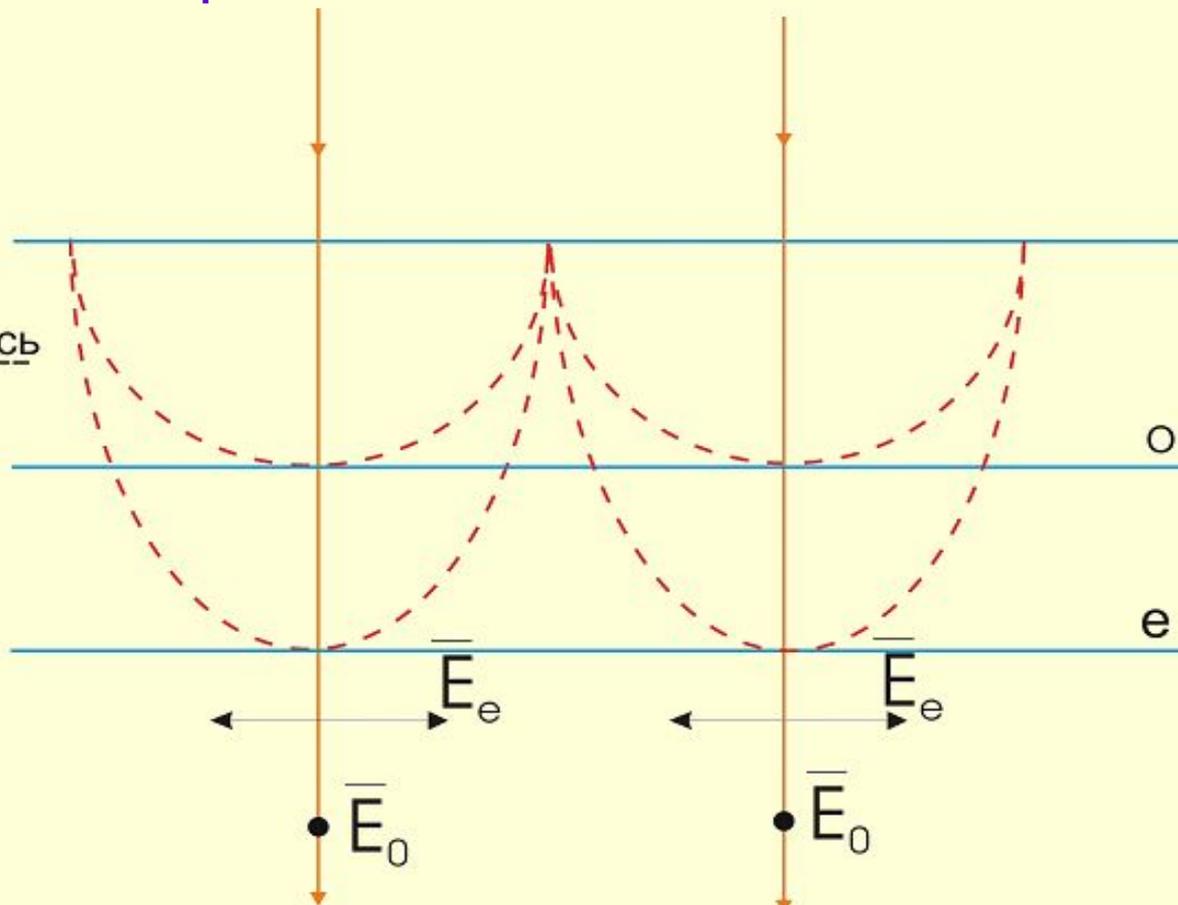
Построение Гюйгенса для нормального падения света на поверхность отрицательного кристалла



Оптическая ось параллельна поверхности отрицательного кристалла



Оптическая ось

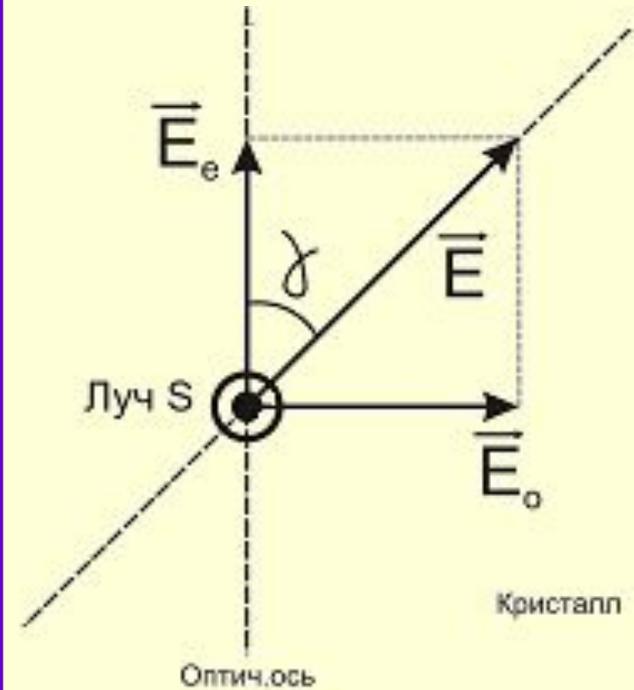


При прохождении волнами расстояния h в кристалле между ними возникает *разность хода*: $\Delta_{oe} = h(n_o - n_e)$ и *разность фаз*: $\Delta\Phi_{oe} = (2\pi/\lambda)h(n_o - n_e)$



Условия получения света круговой поляризации

- на кристалл падает свет линейной поляризации;
- вектор амплитуды падающей волны должен разделиться на обыкновенную и необыкновенную компоненты так что $|\mathbf{E}_o| = |\mathbf{E}_e|$; для этого вектор амплитуды \mathbf{E} в падающей волне должен составлять с оптической осью угол $\gamma = 45^\circ$.
- разность хода между обыкновенной и необыкновенной волнами, вносимая кристаллом, равна $\Delta_{oe} = (2m + 1)\lambda/4$ ($m = 0, 1, 2, \dots$); разность фаз $\Delta\Phi_{oe} = (2m + 1)\pi/2$. Такая пластинка называется “**четвертьволновой**” или “**пластина в $\lambda/4$** ”;



Фазовые пластинки

- это оптический элемент, предназначенный для преобразования состояния поляризации проходящего излучения.

Фазовая пластина создаёт определённую разность фаз между ортогональными линейно-поляризованными компонентами светового излучения.

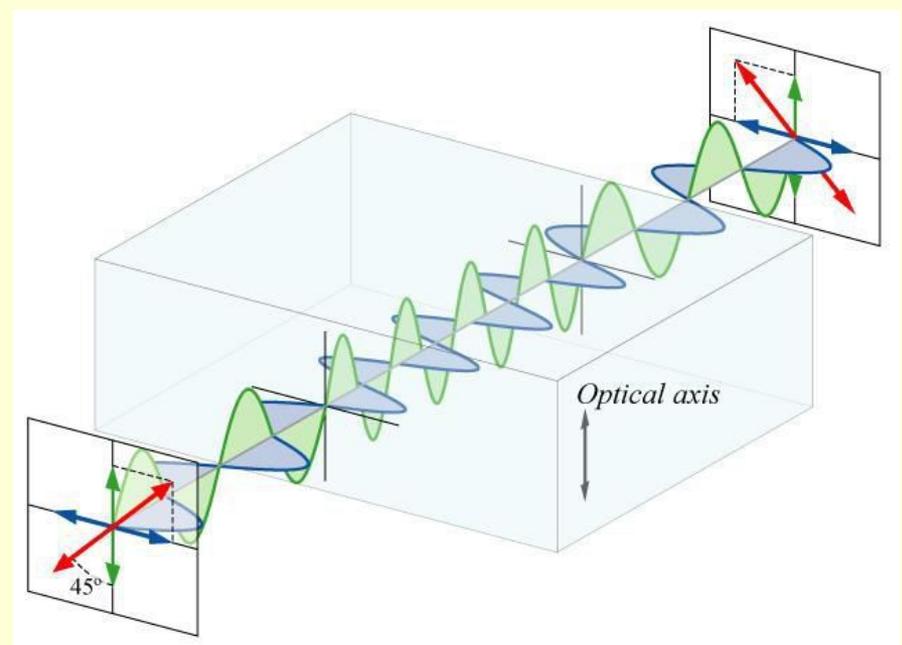
Хроматические фазовые пластины изготавливаются на определённую длину волны.

Пластины могут быть

- полуволновыми ($\lambda/2$),
создающими разность хода $\Delta_{oe} = (2m+1)\lambda/2$
- четвертьволновыми ($\lambda/4$),
создающими разность хода $\Delta_{oe} = (2m+1)\lambda/4$

Фазовые пластинки

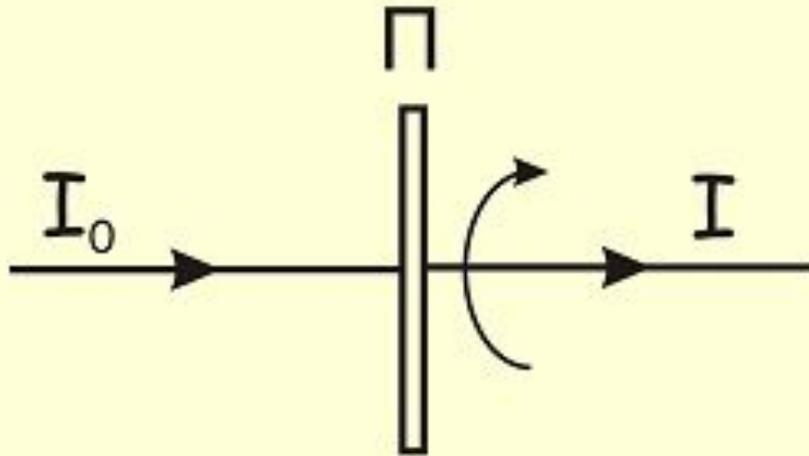
Полуволновые фазовые пластины используются для вращения плоскости поляризации линейно-поляризованного излучения. При циркулярно-поляризованном излучении они служат для изменения направления вращения плоскости.



Четвертьволновые фазовые пластины служат для преобразования линейно-поляризованного излучения в циркулярно-поляризованное или эллиптически-поляризованное в линейное при фиксированной ориентации.

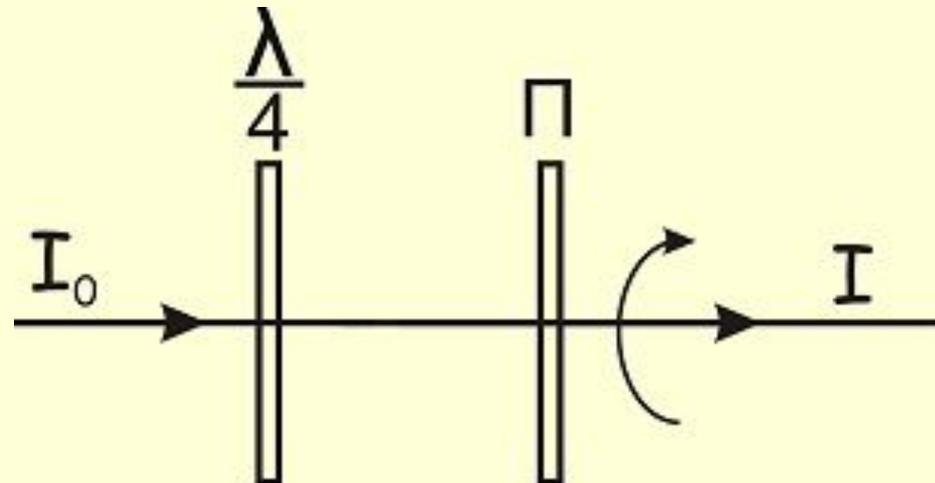
Анализ состояния поляризации света

1. Линейно поляризованный свет



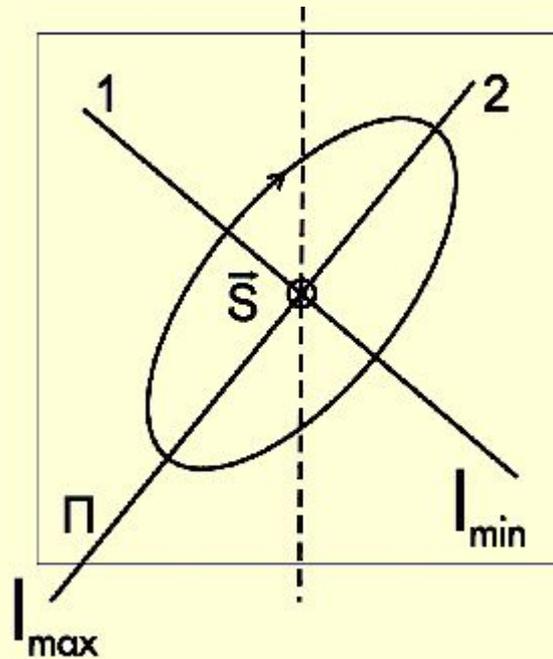
2. Свет естественный и поляризованный по кругу

Ориентация
пластинки – любая:
ЦПС \longrightarrow ЛПС

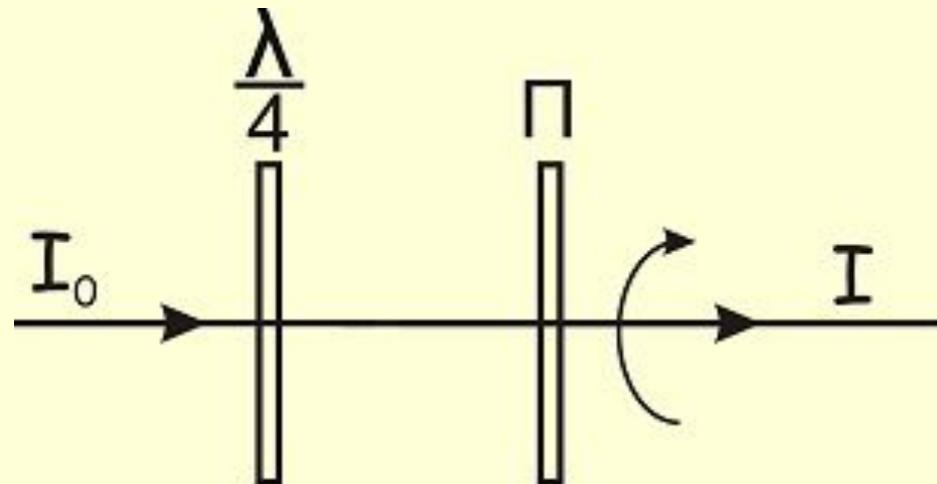


Анализ состояния поляризации света

3. эллиптически и частично поляризованный свет

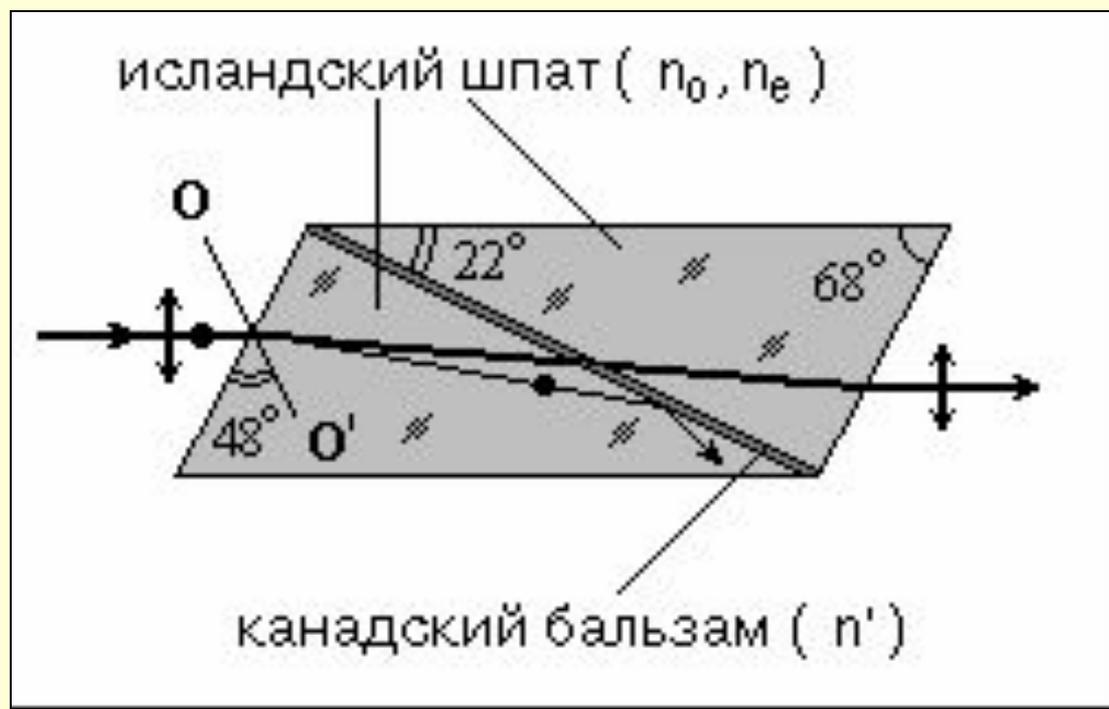


Главные направления
пластинки совпадают с
главными осями эллипса:
ЭПС \longrightarrow ЛПС



Поляризационные устройства

Призма Николя

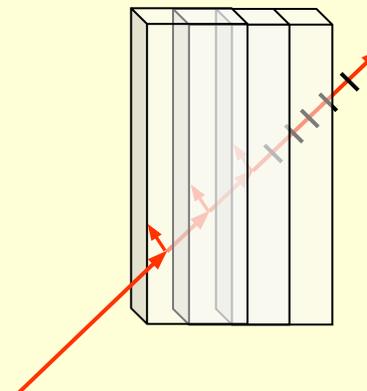
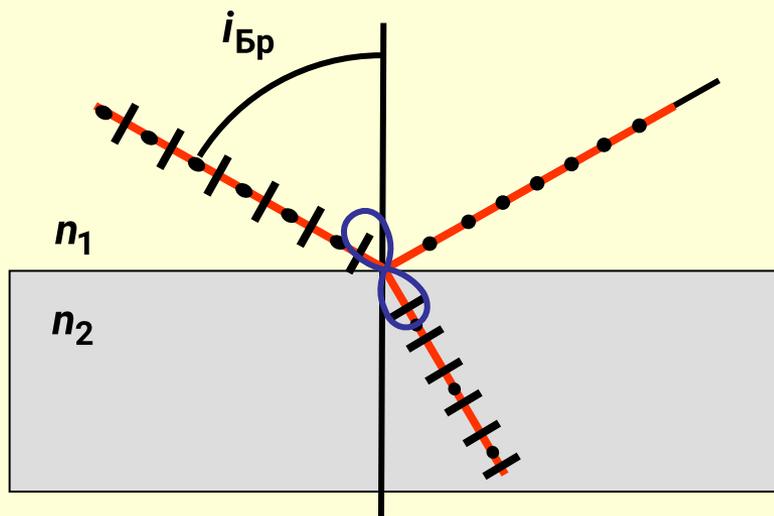


$$n_B = 1,550; n_e = 1,486; n_o = 1,658$$

$$n_o < n' < n_e$$



Стопа Столетова

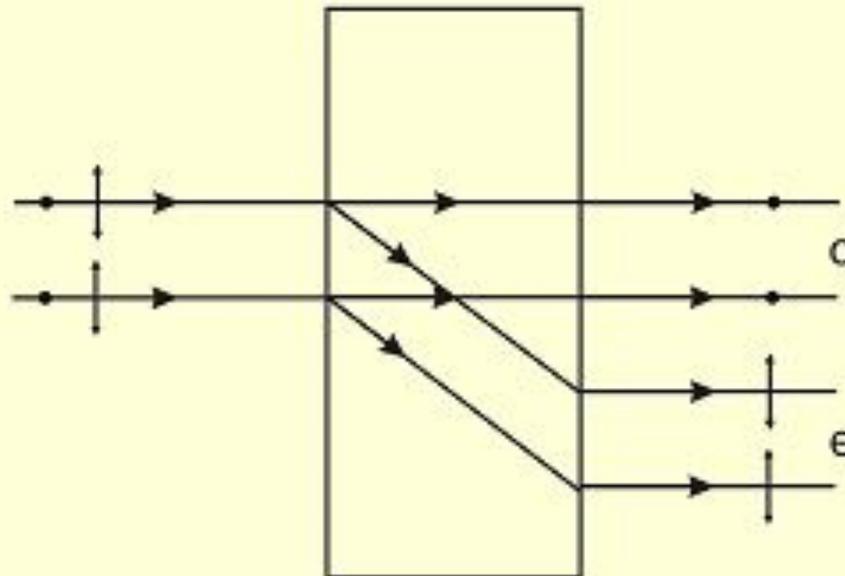


Если имеется 8 -10 пластинок, то при падении под углом Брюстера и отраженный и прошедший свет оказываются практически полностью поляризованными.



Поляризаторы

**Действие
двойкопреломляющего
кристалла как
поляризатора**



$$n = \sqrt{\epsilon}$$

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

$$n_o = \frac{c}{v_o}$$

Недостатки:

- ✓ кристалл должен быть однородным и достаточной толщины,
- ✓ световой пучок должен быть узким

Поляризаторы



Дихроизм - зависимость поглощения света от направления колебаний вектора **E** электрического поля волны

Кристаллы турмалина

толщина 1 мм –
обыкновенный луч
полностью поглощается

Недостаток:

- ✓ для некоторых участков спектра и необыкновенный луч поглощается

Поляроиды



Поляриод - целлулоидная пленка, прозрачная для видимого света, в которую вкраплены ориентированные микрокристаллики сильно дихроичного вещества **герапатита** или его соединений

Преимущества:

- ✓ большая площадь
- ✓ толщина 0,1 мм

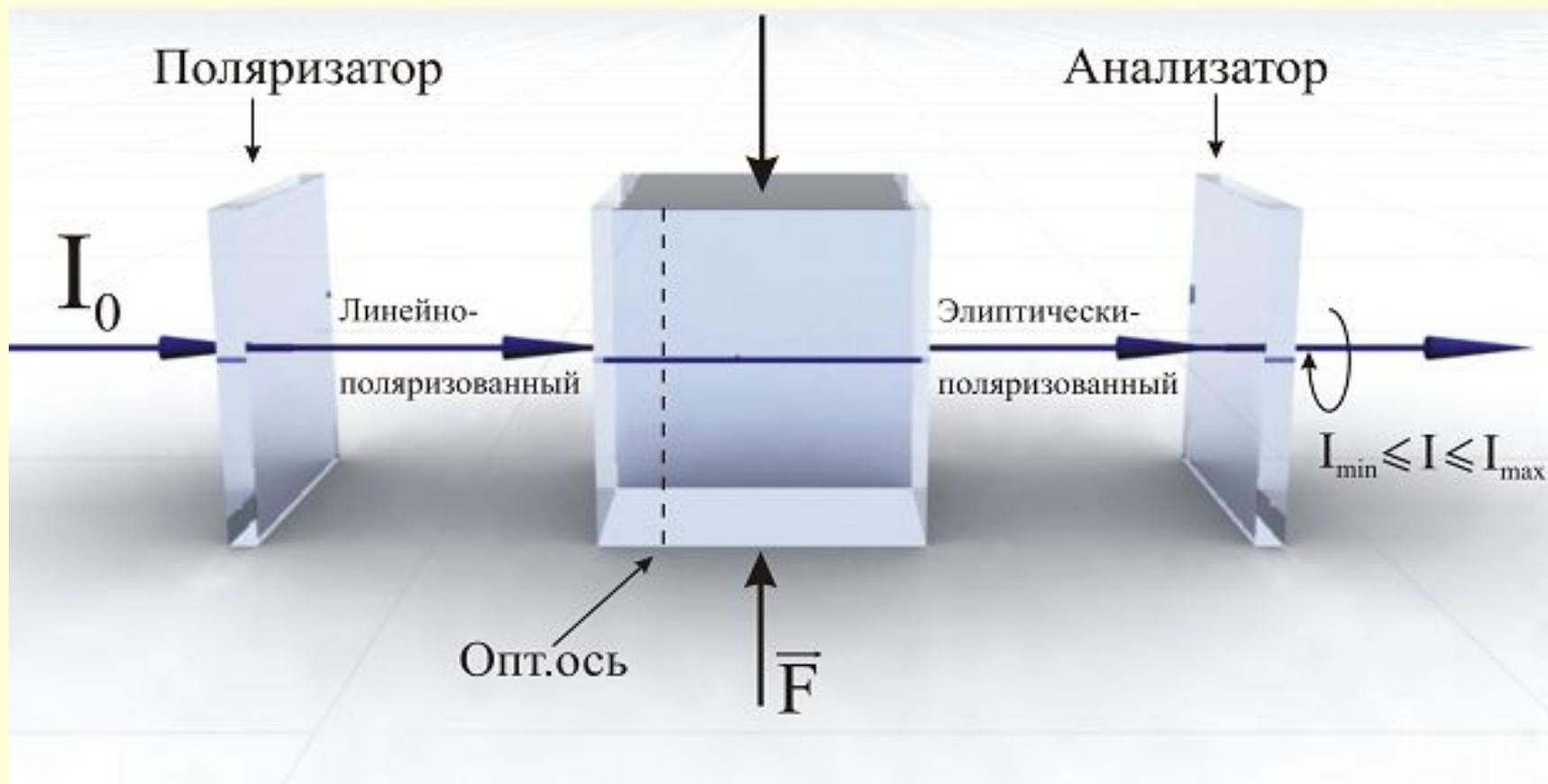
Недостаток:

- ✓ спектральная селективность поглощения герапатита



Искусственная анизотропия

I. Анизотропия при деформации (фотоупругость)

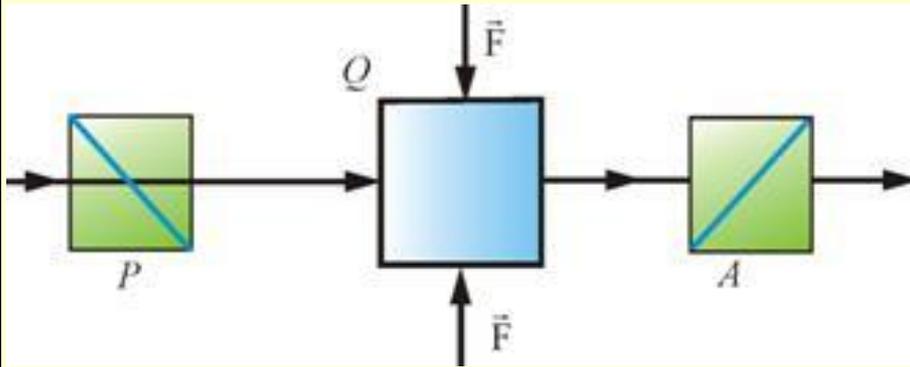


Деформационное двойное лучепреломление

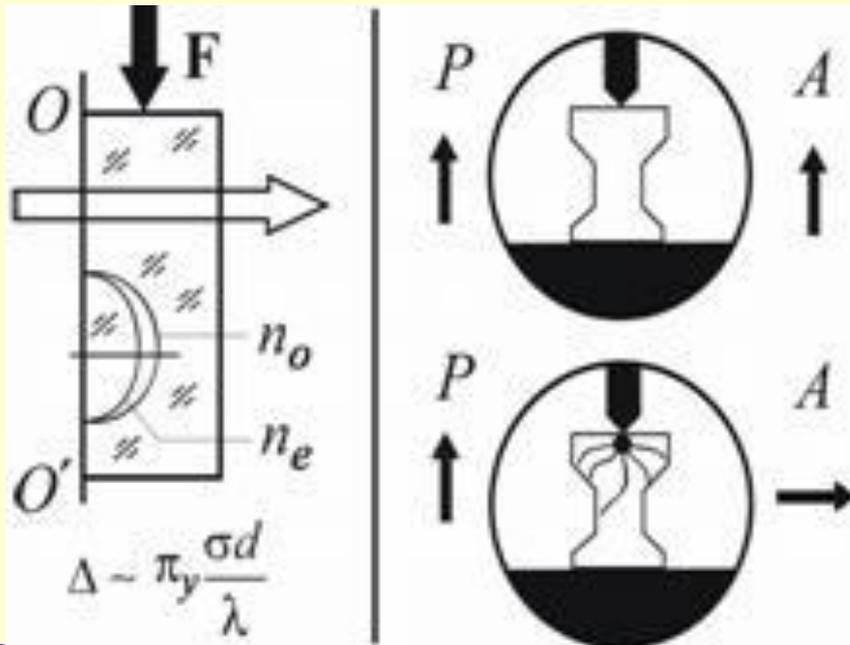
$n_o - n_e = k\sigma$, где σ – напряжение, k – коэффициент фотоупругости

Применение: фотоупругий метод анализа механических напряжений.

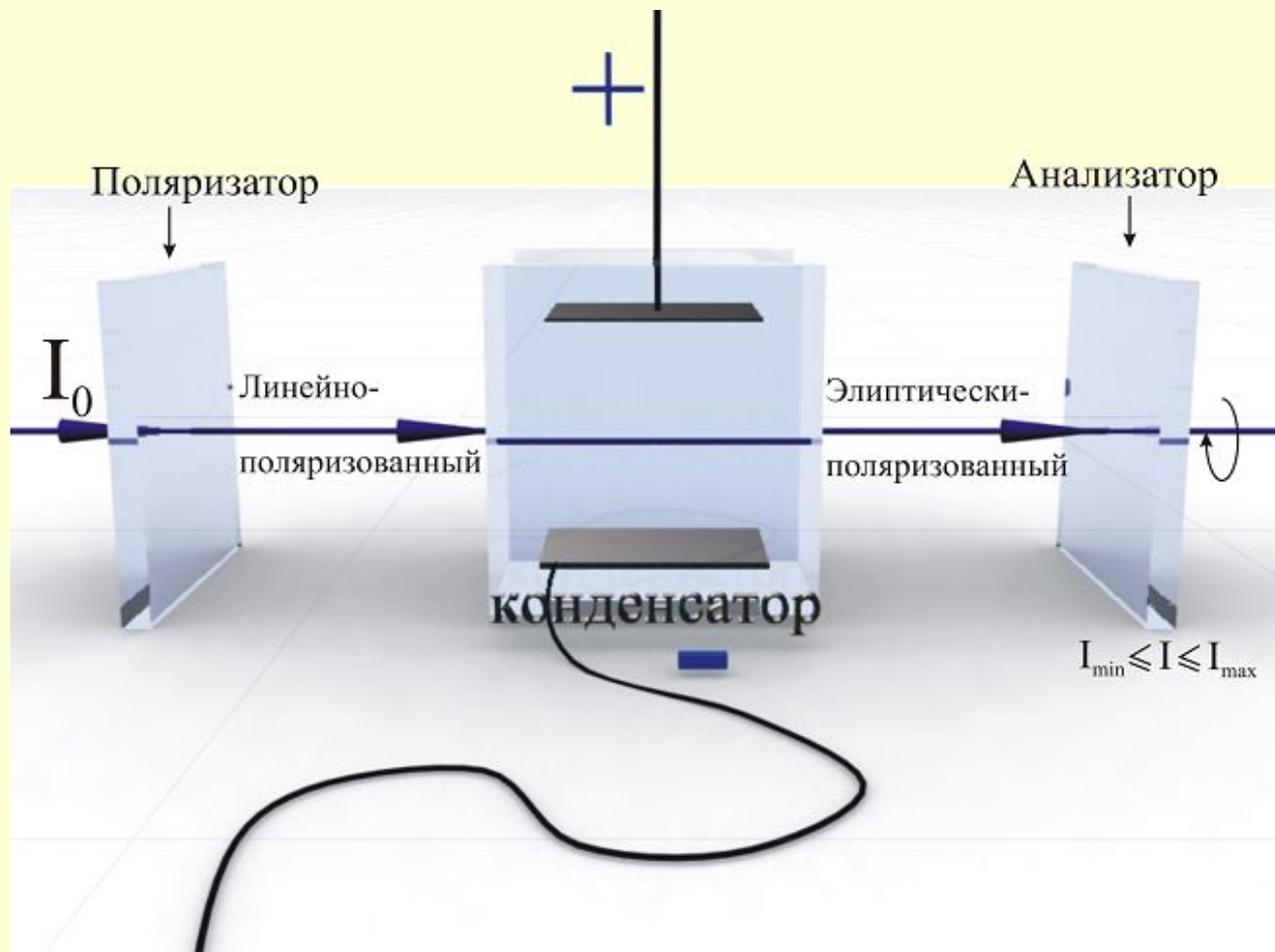
Анизотропия при деформации



1. В отсутствие механической деформации свет через систему не проходит.
2. При наличии деформации свет проходит.
3. По распределению цветных полос можно судить о распределении напряжений в стеклянной пластинке.



II. Анизотропия в электрическом поле (эффект Керра)



Двойное
лучепреломление
в электрическом
поле

Быстродействие
до 10^{-12} с.

Для нитробензола
 $V = 2,2 \cdot 10^{-10}$ см/ V^2

$n_e - n_o = V E^2$
 V – постоянная
Керра

Применение ячейки Керра:

- модуляторы света и оптические затворы
- управление режимом работы лазеров

Вращение плоскости поляризации



Оптически активные вещества поворачивают плоскость поляризации света вокруг направления пучка (кварц, скипидар, раствор сахара в воде).

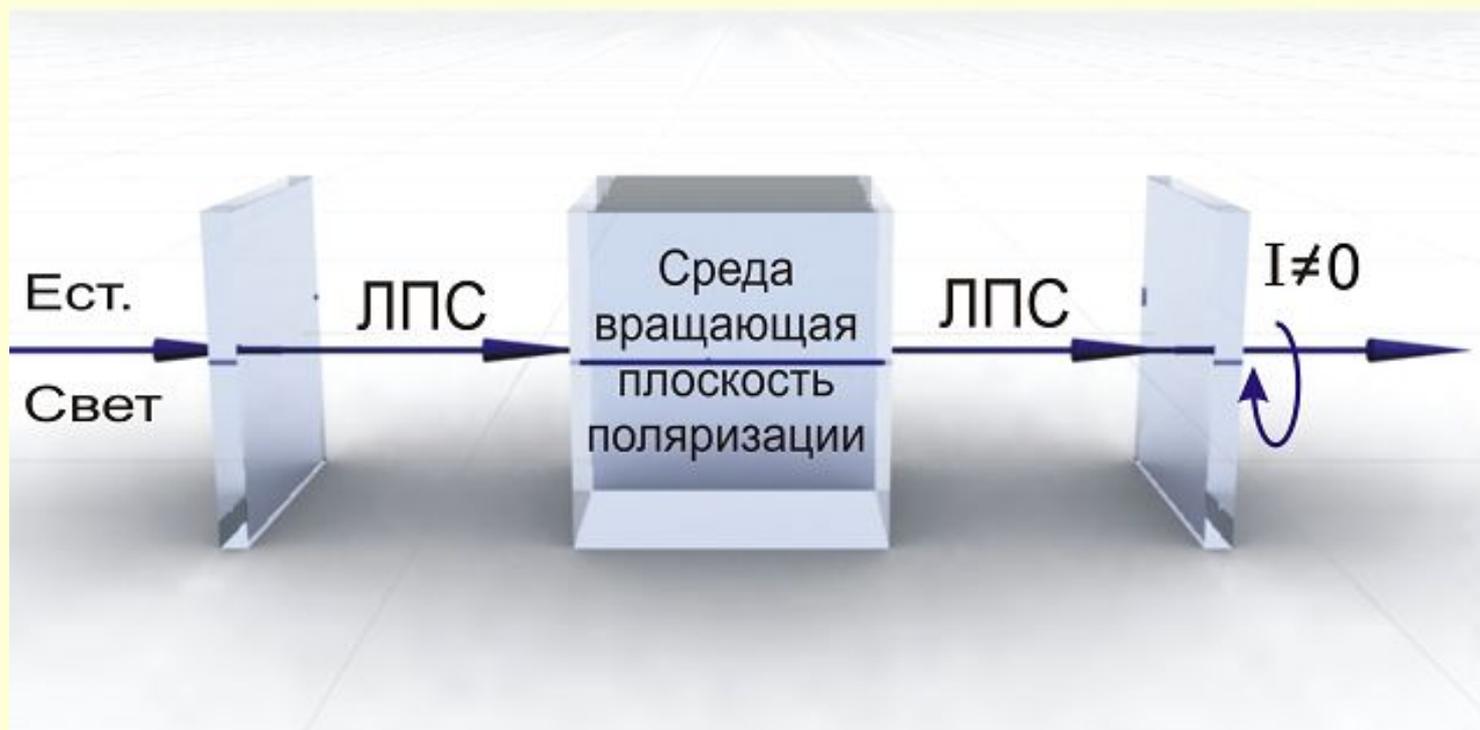


Схема наблюдения оптической активности



Вращение плоскости поляризации

ЛУИ ПАСТЕР (1822-1895)

В **1848** г. сделал свое первое открытие - оптическую изомерию молекул: оптически активные вещества существуют в двух разновидностях – правовращающей и левовращающей, которые являются зеркальным отображением друг друга.



Вращение плоскости поляризации

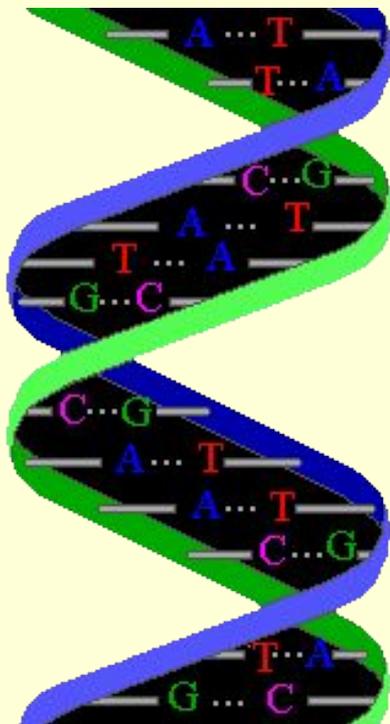
Многие биологические молекулы могут существовать в двух формах, которые являются зеркальным отражением друг друга. Зеркальные изомеры обладают идентичными физическими свойствами:

- одинаковой внутренней энергией, растворимостью, температурой плавления, кипения и т.д.
- единственное их физическое различие состоит в том, что они вращают плоскость поляризации проходящего через них света в противоположных направлениях.

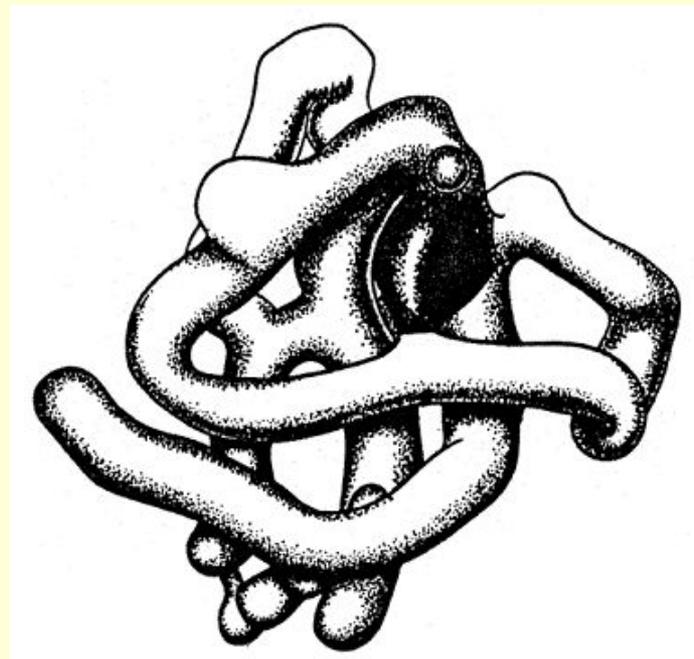
В неживой природе левые и правые молекулы содержатся в равных количествах (**рацематы**).



Все живое обладает определенной асимметрией



*ДНК всегда
правосторонние*



*Белки всегда
левосторонние*



Вращение плоскости поляризации

$$\varphi = \alpha L$$

в оптически активных кристаллах и чистых жидкостях

$$\varphi = \alpha C L$$

в оптически активных растворах

C (кг/м³) – объемно-массовая концентрация раствора

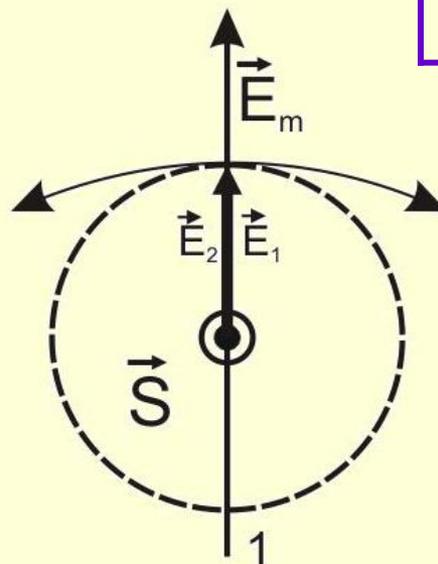
$$\Delta\Phi_{12} = (2\pi/\lambda)L\Delta n_{12}$$

$$\varphi = \Delta\Phi_{12}/2$$

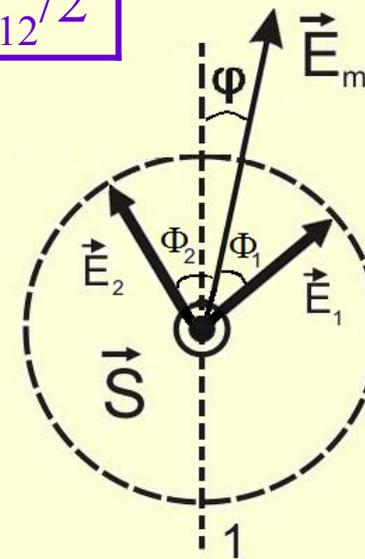
α – удельное вращение или постоянная вращения. Зависит от природы вещества, температуры и длины волны света в вакууме.

Структура волны на входе в активное вещество (а) и выходе (б).

ЛПВ E_m \longrightarrow 2 ЦПВ E_1 и E_2



а)



б)

Вращение плоскости поляризации



Эффект Фарадея или магнитное вращение плоскости поляризации – приобретенная оптически неактивной средой способность под действием внешнего магнитного поля вращать плоскость поляризации света, распространяющегося вдоль направления поля.

$$\phi = VHL$$

где **L** – толщина слоя вещества,

H – напряженность внешнего магнитного поля,

V – постоянная Верде, зависящая от природы вещества и длины волны света.

*Быстродействие
до 10^{-9} с.*

Применение:

- ✓ модуляторы света и оптические затворы
- ✓ лазерные гироскопы