

Поляризация света

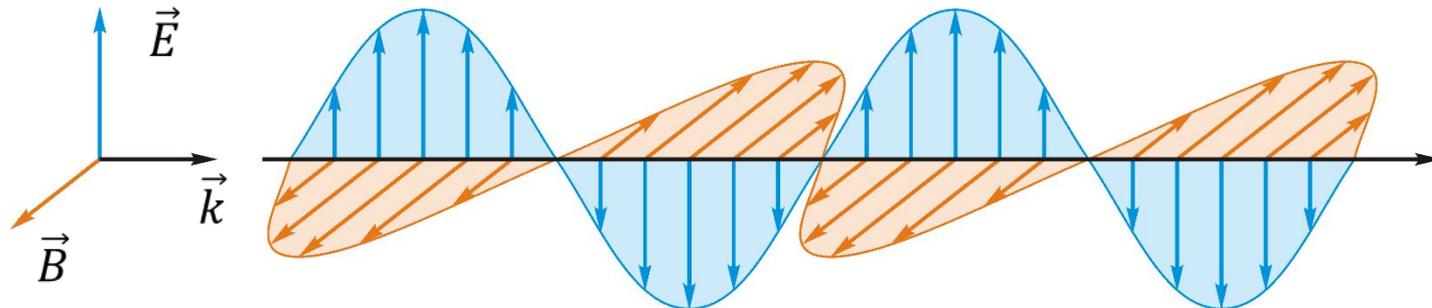
Виды поляризации

Согласно электромагнитной теории света электромагнитная волна **поперечна**: три вектора: \vec{E} , \vec{B} и волновой вектор \vec{k} взаимно перпендикулярны.

Действие света на вещество определяется в основном колебаниями вектора напряженности \vec{E} . В соответствии с этим вектор напряженности называют еще световым вектором.

Гармоническая электромагнитная волна

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r}), \quad \vec{B} = \vec{B}_0 \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r})$$

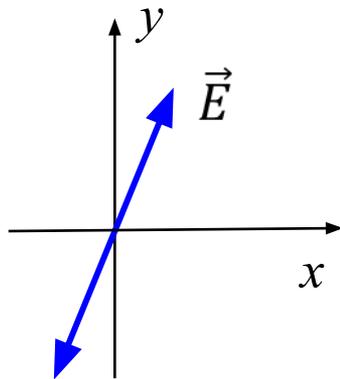


Поляризованным называется свет, в котором направления колебаний светового вектора упорядочены каким-либо образом.

Плоско-поляризованный (линейно-поляризованный) свет

Колебания вектора \vec{E} происходят в одной плоскости, проходящей через луч.

Эту плоскость называют плоскостью поляризации (плоскостью колебаний светового вектора).

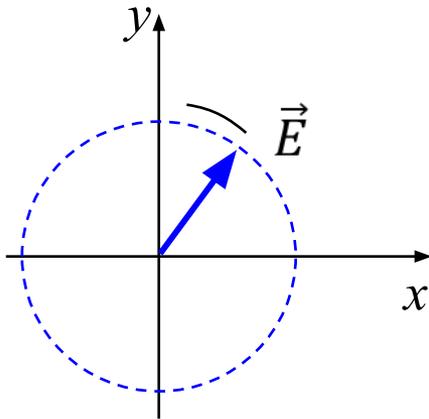


$$E_x = A_x \cos \omega t$$

$$E_y = A_y \cos \omega t$$

Круго-поляризованный свет

Вектор \vec{E} вращается вокруг луча, описывая окружность.



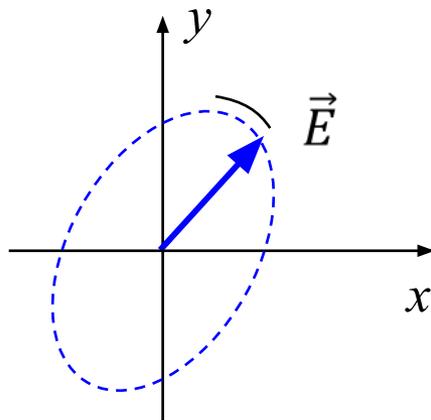
$$E_x = A \cos \omega t$$

$$E_y = A \sin \omega t$$

Правая (левая) круговая поляризация – вращение вектора \vec{E} происходит по (против) часовой стрелке, если смотреть навстречу лучу света.

Эллиптически-поляризованный свет

Вектор \vec{E} вращается вокруг луча, описывая эллипс.

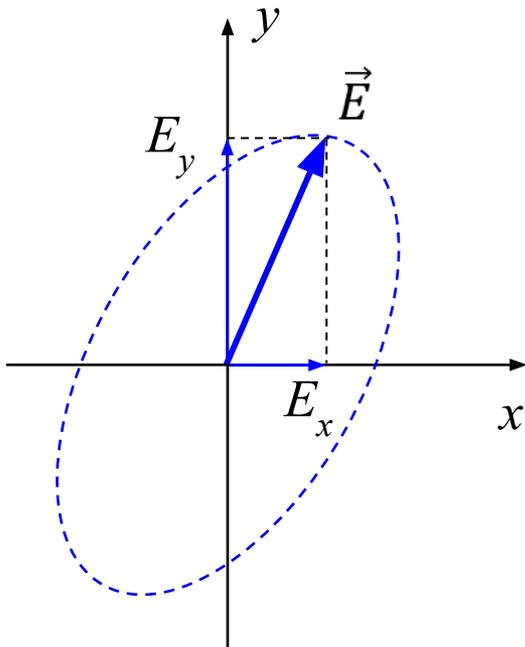


$$E_x = A_x \cos \omega t$$

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

Правая (левая) эллиптическая поляризация – вращение вектора \vec{E} происходит по (против) часовой стрелке, если смотреть навстречу лучу света.

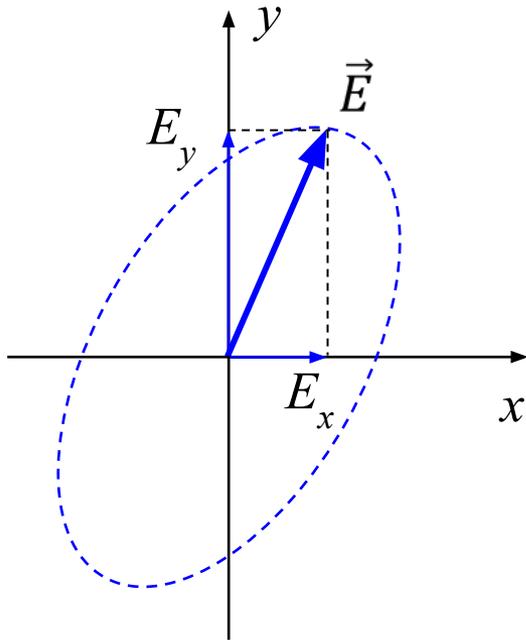
Волну с эллиптической поляризацией можно представить как две взаимно перпендикулярные линейно-поляризованные волны с взаимно ортогональными плоскостями поляризации.



$$E_x = A_x \cos \omega t$$

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

Эллиптически-поляризованная волна – это наиболее общий вид поляризации.



$$E_x = A_x \cos \omega t$$

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

$$\delta = 0, \pi \quad \longrightarrow$$

линейно-поляризованный свет

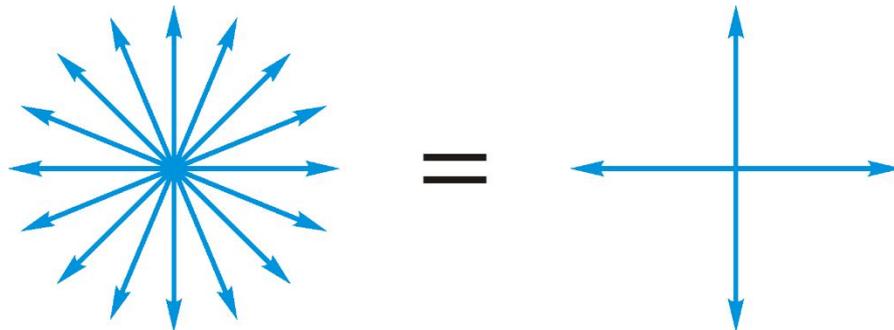
$$\delta = \pm \frac{\pi}{2}; \quad A_x = A_y \quad \longrightarrow$$

круго-поляризованный свет

Естественный свет

В естественном свете колебания различных направлений быстро и беспорядочно сменяют друг друга.

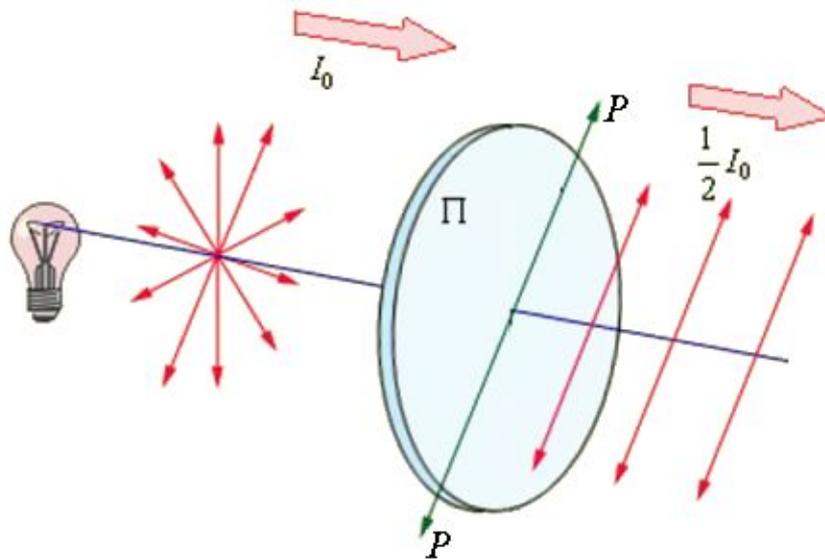
Естественный свет можно представить как наложение двух некогерентных световых волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях и имеющих одинаковую интенсивность.



Поляризаторы

Поляризаторы свободно пропускают колебания, параллельные некоторой плоскости (*плоскости пропускания поляризатора*), и полностью или частично задерживают колебания перпендикулярные этой плоскости.

Поляризация естественного света



PP – плоскость пропускания

На выходе из поляризатора в общем случае получается свет, в котором колебания одного направления преобладают над колебаниями другого.

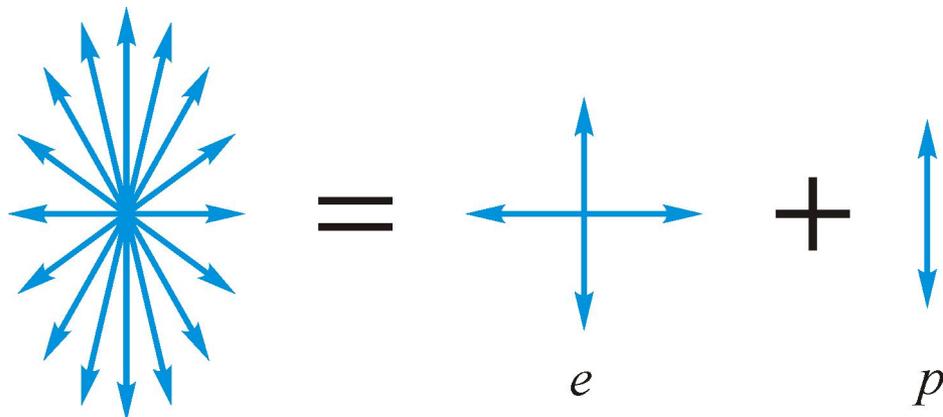
Такой свет называется *частично поляризованным*.

Частично поляризованный свет, как и естественный, можно представить в виде наложения двух некогерентных плоско поляризованных волн с взаимно перпендикулярными плоскостями колебаний, но разными по интенсивности. Его также можно рассматривать как смесь естественной и плоско-поляризованной составляющих.

Если пропустить частично поляризованный свет через идеальный поляризатор, то при его вращении вокруг направления луча интенсивность прошедшего света будет изменяться в пределах от

I_{\max} до I_{\min} .

Степень поляризации

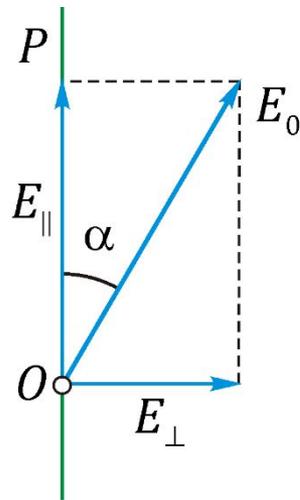


$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{I_p}{I_0}$$

I_p – интенсивность поляризованной составляющей

$I_0 = I_{\max} + I_{\min}$ – полная интенсивность

Закон Малюса



На идеальный поляризатор падает плоско-поляризованный свет интенсивности I_0 .

Анализатор пропускает только составляющую $E_{\parallel} = E_0 \cos \alpha$

Интенсивность $I \sim E^2$ \longrightarrow

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad \text{— закон Малюса}$$

Пусть естественный свет проходит два поляризатора, плоскости пропускания которых образуют угол φ .

Интенсивность на выходе

$$I = \frac{1}{2} I_{\text{ест}} \cos^2 \varphi$$

Поляризация света при отражении и преломлении. Закон Брюстера

Из формул Френеля, определяющих амплитуды преломленной и отраженной волн

$$\Rightarrow \rho_{\perp} = \frac{I'_{\perp}}{I_{\perp}} = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)}, \quad \rho_{\parallel} = \frac{I'_{\parallel}}{I_{\parallel}} = \frac{\operatorname{tg}^2(\theta_1 - \theta_2)}{\operatorname{tg}^2(\theta_1 + \theta_2)}$$

ρ – коэффициенты отражения линейно-поляризованного света,

ρ_{\perp} – плоскость поляризации перпендикулярна плоскости падения,

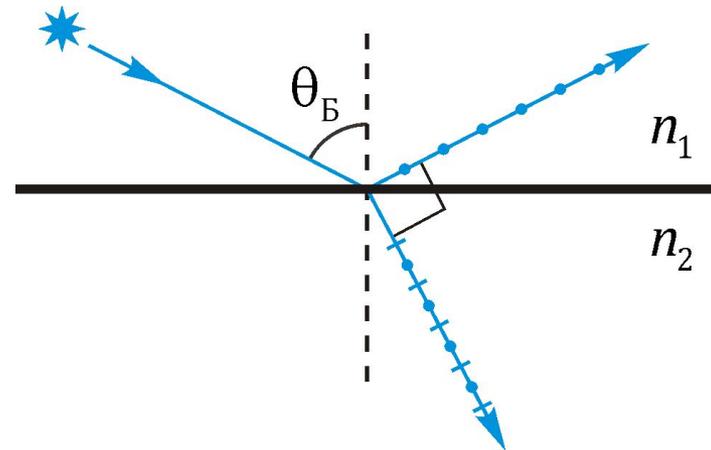
ρ_{\parallel} – плоскость поляризации параллельна плоскости падения

При $\theta_1 + \theta_2 = \pi/2$, $\text{tg}(\theta_1 + \theta_2) \rightarrow \infty \quad \Rightarrow$

Отраженный свет будет полностью поляризован $\rho_{\parallel} = 0$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \\ \theta_1 + \theta_2 = \pi/2 \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\theta_1 + \theta_2 = \pi/2$$



$$\boxed{\text{tg } \theta_{\text{Б}} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}}$$

– закон Брюстера

$\theta_{\text{Б}}$ – угол Брюстера

Поляризация при двойном лучепреломлении

Особенности строения молекул и кристаллической решетки 

многие прозрачные кристаллы оптически анизотропны, т.е. оптические свойства света зависят от направления.

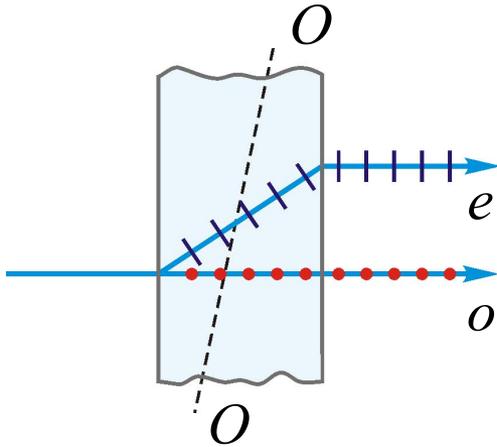
Проявление: **двойное лучепреломление** – раздвоение преломленного луча на два луча, распространяющихся в общем случае в разных направлениях и с разными скоростями.

Существуют *одноосные* и *двуосные* кристаллы.

В одноосных кристаллах существует одно направление, в которых свет не разделяется на два луча.

В двуосных кристаллах существует два таких направления.

Одноосные кристаллы



OO – направление в кристалле, вдоль которого лучи распространяются не разделяясь с одинаковой скоростью.

OO – *оптическая ось*

o – *обыкновенный луч*, подчиняется обычному закону преломления,

e – *необыкновенный луч*, не подчиняется обычному закону преломления.

Главная плоскость (сечение) – плоскость, проходящая через луч и оптическую ось

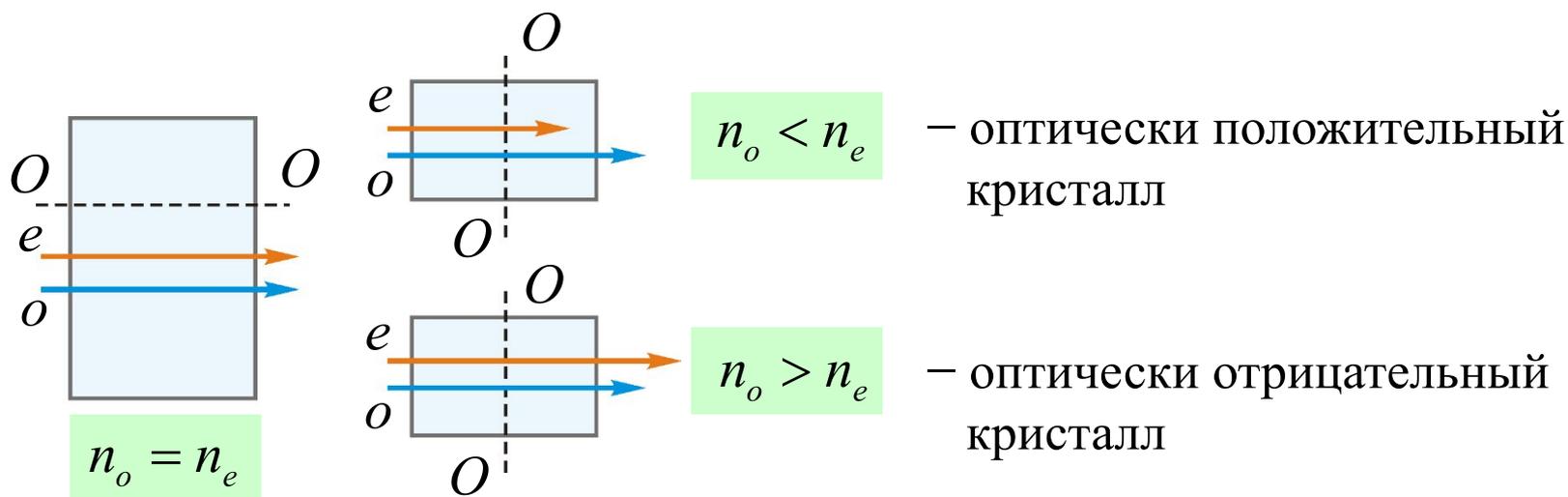
o -луч поляризован нормально к ней, e -луч – параллельно ей.

Показатели преломления n_o и n_e

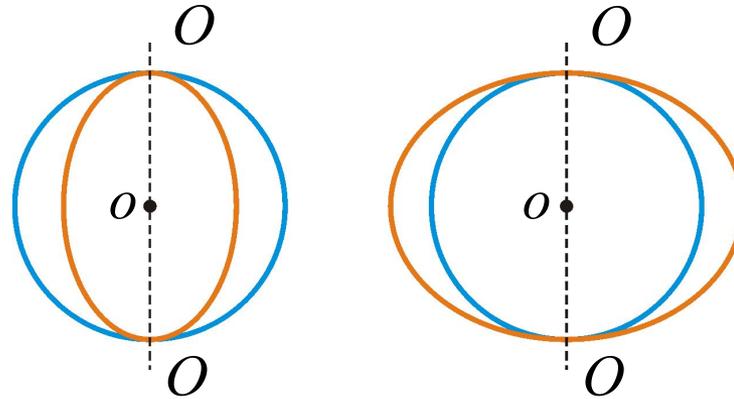
Вдоль оптической оси OO и перпендикулярно к ней лучи идут не разделяясь,

в первом случае их скорость одинакова, а во втором – разная.

$n_o = \text{const}$, n_e зависит от направления луча.



Поверхности лучевых скоростей



Положительный

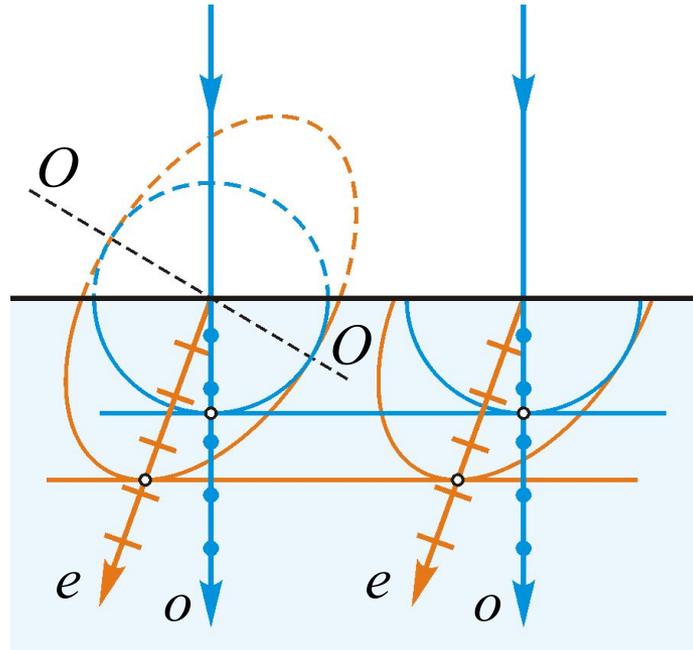
Отрицательный

Расстояние от точки o до точки на поверхности пропорционально
лучевой скорости в данном направлении.

Для o -луча – сфера,

Для e -луча – эллипсоид вращения.

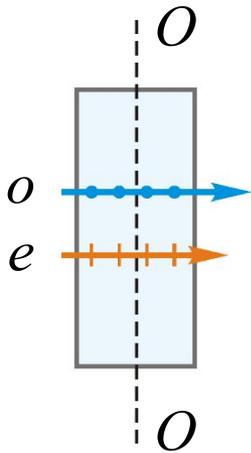
Построение Гюйгенса



Оптическая ось образует произвольный угол с преломляющей гранью кристалла. Свет падает по нормали.

Анализ поляризованного света

Пластинка в четверть волны



После прохождения пластинки между лучами возникает дополнительная разность фаз

$$\delta = 2\pi \frac{(n_o - n_e)d}{\lambda_0}$$

При условии

$$|n_o - n_e| d = m \frac{\lambda_0}{2} + \frac{\lambda_0}{4} \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

Пластинка называется *пластинкой в четверть волны*

Плоско-поляризованный свет

Свет пропускается через поляризатор: при вращении поляризатора свет полностью гасится.

Круго-поляризованный свет

Свет пропускается последовательно через пластинку в четверть волны и через поляризатор: при вращении поляризатора свет полностью гасится.

Эллиптически-поляризованный свет

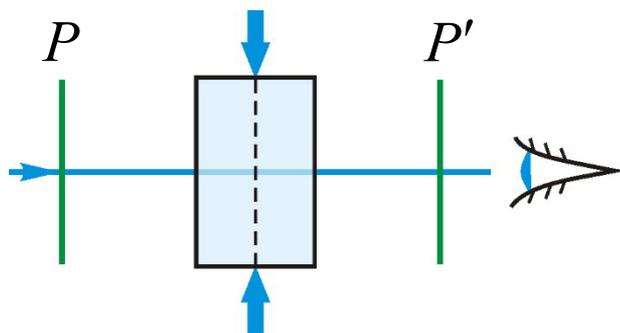
Свет пропускается последовательно через пластинку в четверть волны и через поляризатор: при некотором положении пластинки при вращении поляризатора свет полностью гасится.

Искусственное двойное лучепреломление

Первоначально оптически изотропные вещества становятся оптически анизотропными под действием:

- 1) одностороннего сжатия или растяжения – *фотоупругость*;
- 2) электрического поля – *эффект Керра*;
- 3) магнитного поля – *явление Коттон-Мутона*.

Фотоупругость



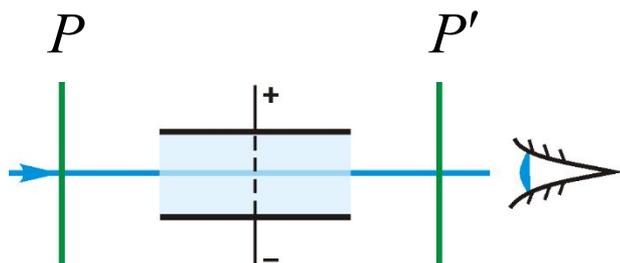
$$n_o - n_e = k\sigma$$

σ – нормальное напряжение

k – коэффициент

Искусственное двойное лучепреломление

Эффект Керра

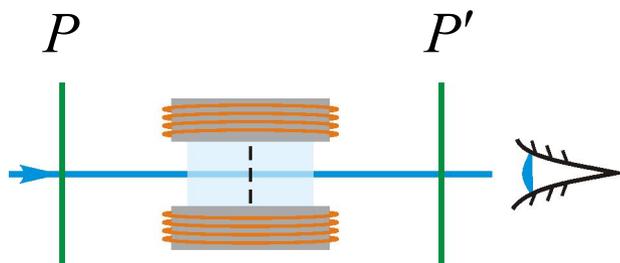


$$n_e - n_o = K\lambda_0 E^2$$

K – постоянная Керра

λ_0 – длина волны света

Явление Коттон-Мутона



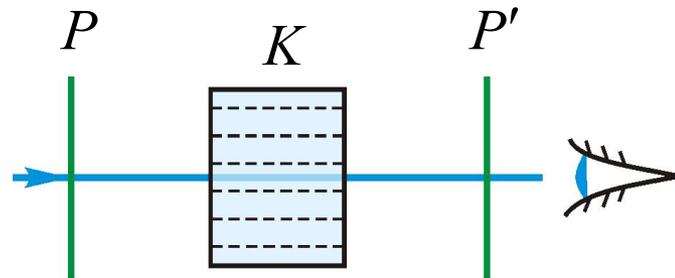
$$n_e - n_o = C\lambda_0 B^2$$

C – постоянная

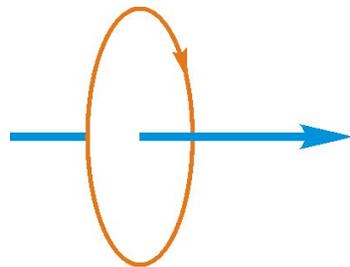
λ_0 – длина волны света

Вращение плоскости поляризации

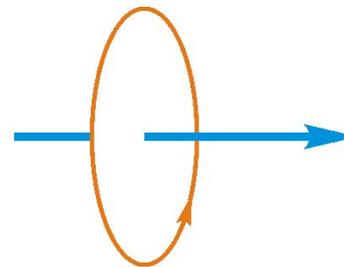
Некоторые вещества (кварц, сахар), называемые *оптически активными*, обладают способностью вращать плоскость поляризации линейно-поляризованного света.



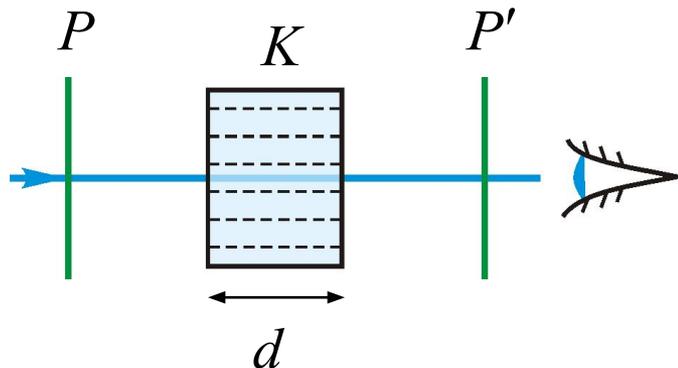
Эти вещества подразделяются на *право-* и *лево-вращающие* (направление вращения не зависит от направления луча)



правовращающие



лево-вращающие



Для оптически активных кристаллов и чистых жидкостей

$$\Delta\varphi = \alpha d$$

α – постоянная вращения

Для оптически активных растворов

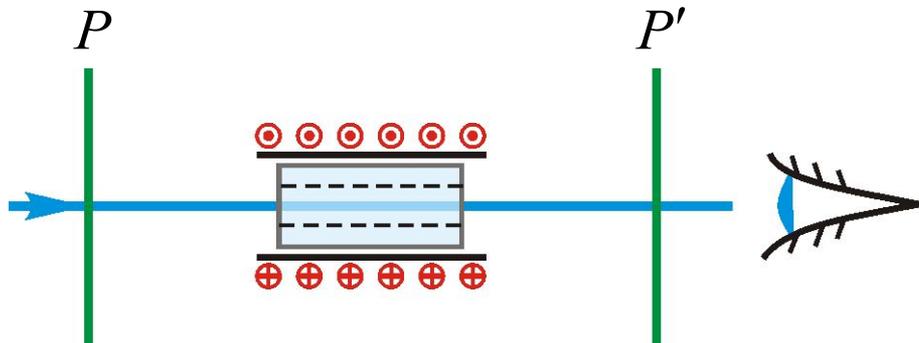
$$\Delta\varphi = [\alpha] C d$$

$[\alpha]$ – удельное вращение,

C – массовая концентрация

оптически активного вещества

Магнитное вращение (эффект Фарадея)



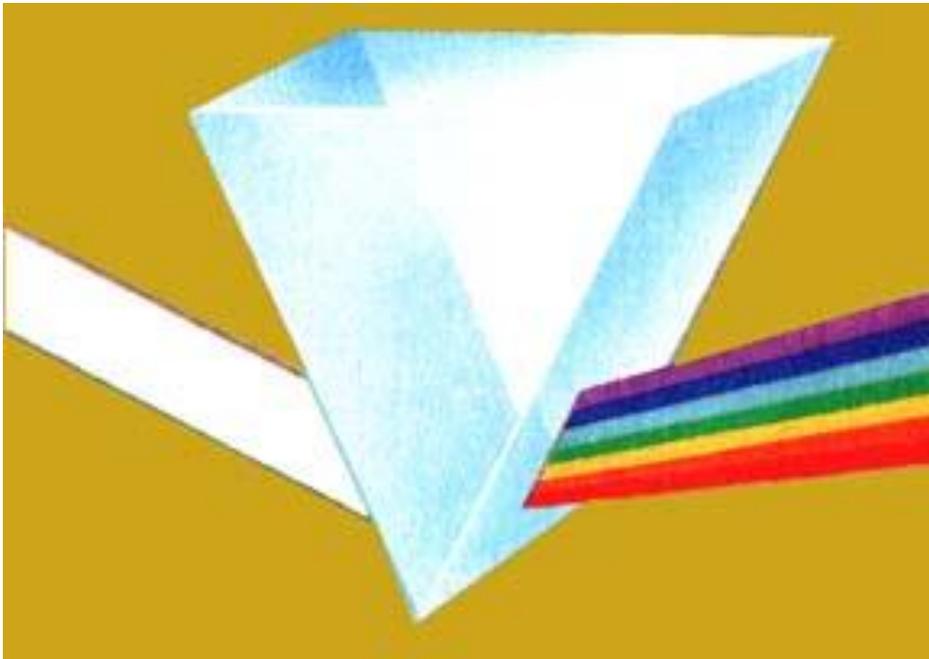
Оптически неактивные вещества приобретают способность вращать плоскость поляризации под действием магнитного поля (направление вращения определяется направлением магнитного поля)

$$\Delta\varphi = V l H$$

V – постоянная Верде, l – длина пути,
 H – напряженность магнитного поля

Дисперсия света

Дисперсия света – явления, обусловленные зависимостью показателя преломления вещества от частоты $n = f(\omega)$.



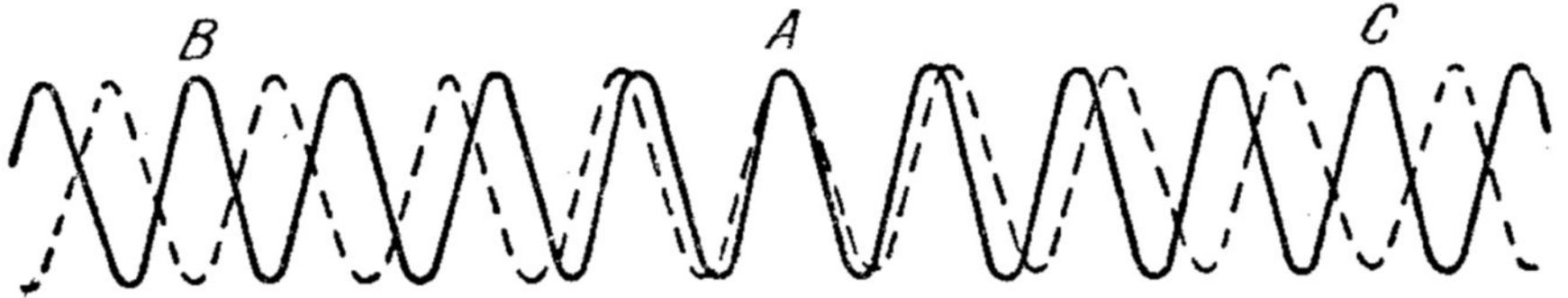
Реальная волна, передающая сигнал, представляет собой импульс. Согласно теореме Фурье его можно представить как наложения полей с частотами, заключёнными в интервале $\Delta\omega$. Суперпозиция таких волн называется волновым пакетом

$$E(x, t) = \int_{\omega_0 - \Delta\omega/2}^{\omega_0 + \Delta\omega/2} A(\omega) \cos(\omega t - k_\omega x + \alpha_\omega) d\omega$$

$$(\Delta k \cdot \Delta x \approx 2\pi)$$

$$a_1 = A \cos(\omega t - kx) \quad a_2 = A \cos[(\omega + \Delta\omega)t - (k + \Delta k)x]$$

$$a = a_1 + a_2 = \left[2A \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}x\right) \right] \cos(\omega t - kx)$$



Максимуму амплитуды соответствует $\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}x_m = 0$

x_m - координата центра группы волн



групповая скорость $u = dx_m/dt = \Delta\omega/\Delta k$

Связь групповой (u) и фазовой (v) скоростей:

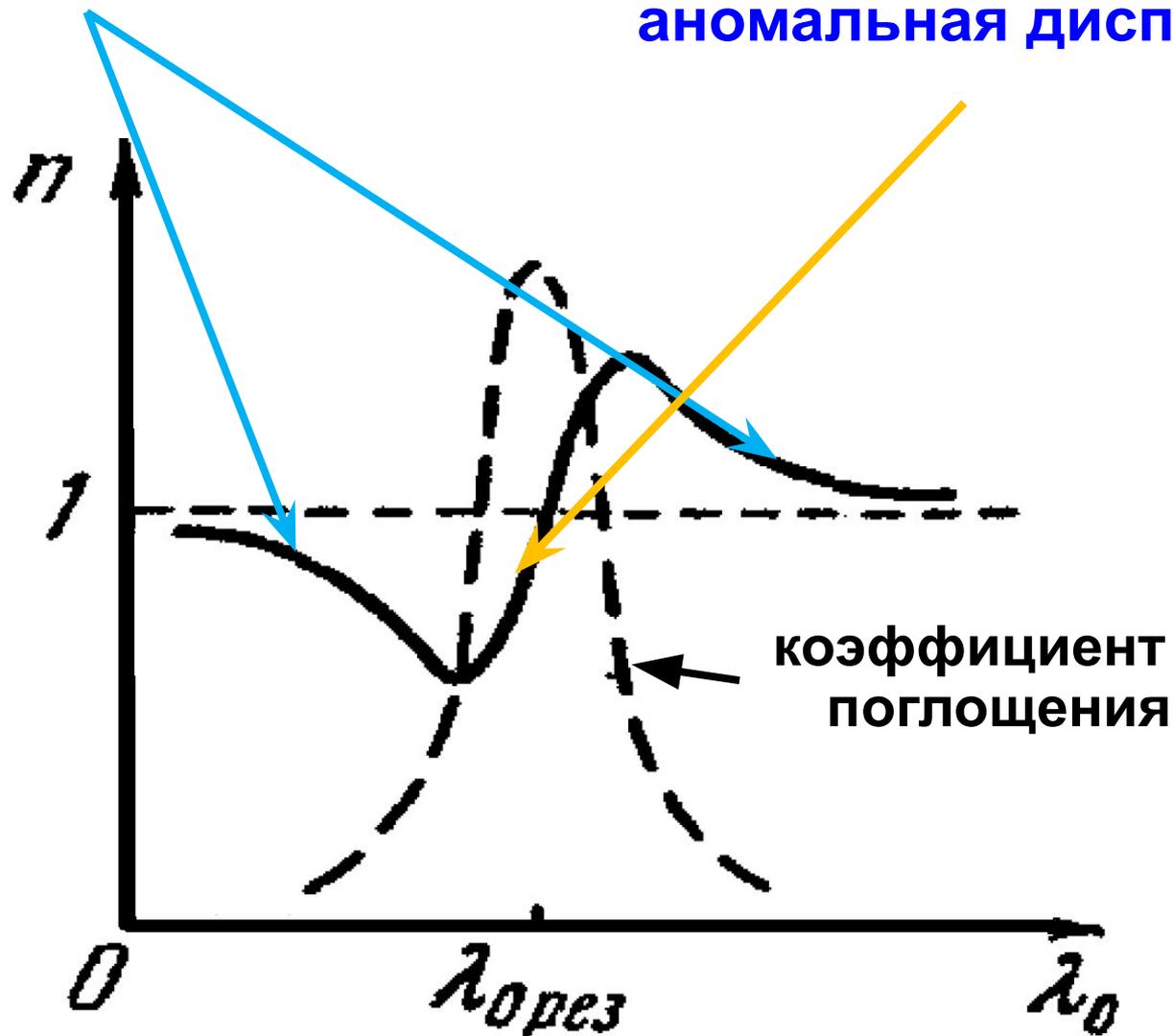
$$u = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(vk)}{dk} = v + k \frac{dv}{dk} = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}$$

Если дисперсии нет, то

$$\frac{dv}{d\lambda} = 0, \quad u = v$$

нормальная дисперсия

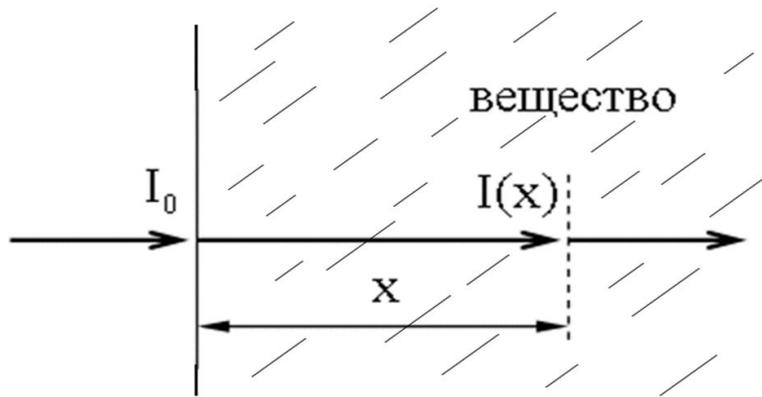
аномальная дисперсия



Поглощение света

Световая волна, проходя через вещество, возбуждает вынужденные колебания электронов в атомах, на поддержание которых затрачивается энергия волны, и волна затухает.

Переход энергии световой волны во внутреннюю энергию вещества называется *поглощением* света.



$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad - \text{закон Бугера}$$

I_0 – интенсивность падающего света,

α – коэффициент поглощения вещества.

Рассеяние света

Рассеянием называется дифракция света на мелких неоднородностях. Это явление наблюдается в мутных средах (дымы, эмульсии, взвеси).

Если размеры неоднородностей не превышают $0,2 \lambda$, то рассеяние называют рэлеевским.

Закон Рэля

$$I \sim \omega^4 \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

I - интенсивность рассеиваемого света

Эффект Доплера для электромагнитных волн

из уравнений специальной теории относительности:

$$\omega = \omega_0 \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 + \frac{v}{c} \cos\theta}$$



ω - циклическая частота в системе отсчета приемника,

ω_0 - циклическая частота в системе отсчета источника,

c - скорость света,

v - скорость источника относительно приёмника (наблюдателя),

θ - угол между направлением на источник и вектором скорости в системе отсчёта приёмника. Если источник радиально удаляется от наблюдателя, то $\theta = 0$, если приближается, то $\theta = \pi$.