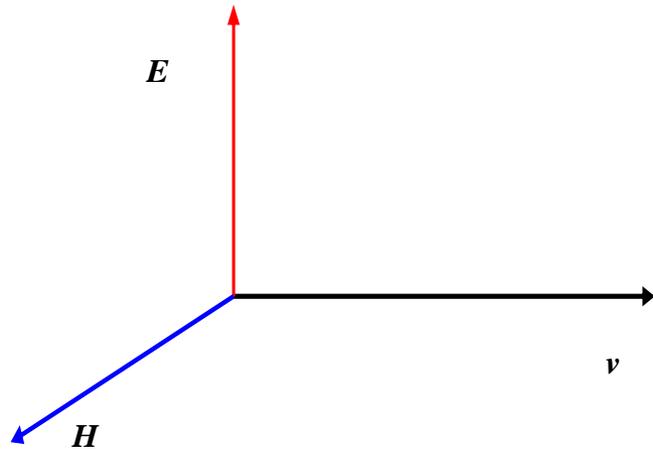


Дисперсия и поляризация света

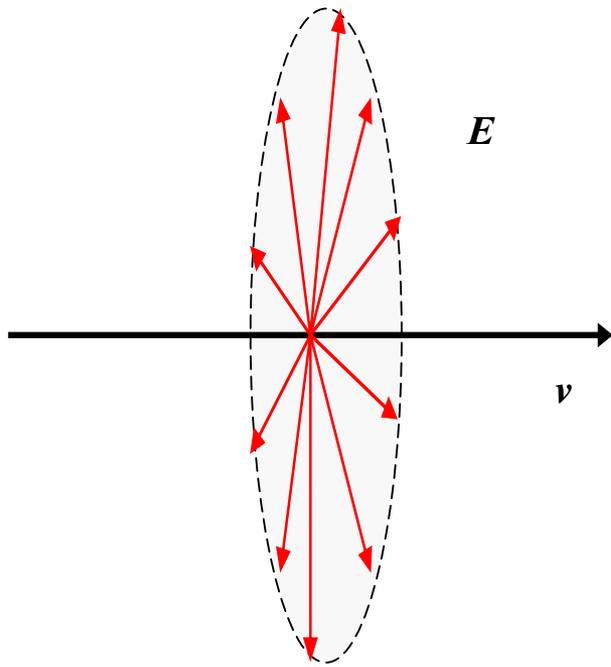
Поляризация света

Световая волна имеет электромагнитную природу.



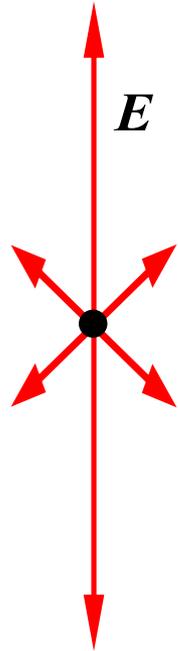
Её представляют как колебания векторов E и H во взаимно перпендикулярных направлениях перпендикулярно направлению распространения волны (правовинтовая тройка). Следовательно, световая волна – *поперечная*.

Обычно рассматривают только вектор E , т.к. при действии света на вещество основное воздействие оказывает электрическое поле волны на электроны в атомах вещества.



Свет – суммарное электромагнитное излучение множества атомов, которые излучают независимо друг от друга. Следовательно, результирующий вектор \mathbf{E} равномерно распределён в плоскости перпендикулярной направлению распространения света.

Естественный свет – свет со всевозможными равновероятными ориентациями векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} .

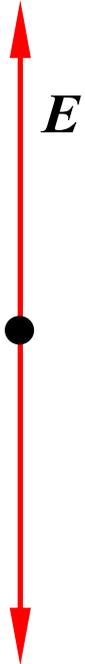


Поляризованный свет:

направления колебаний
вектора ***E*** упорядочены
каким-то образом.

Частично поляризованный свет

имеет преимущественное
направление вектора ***E***.



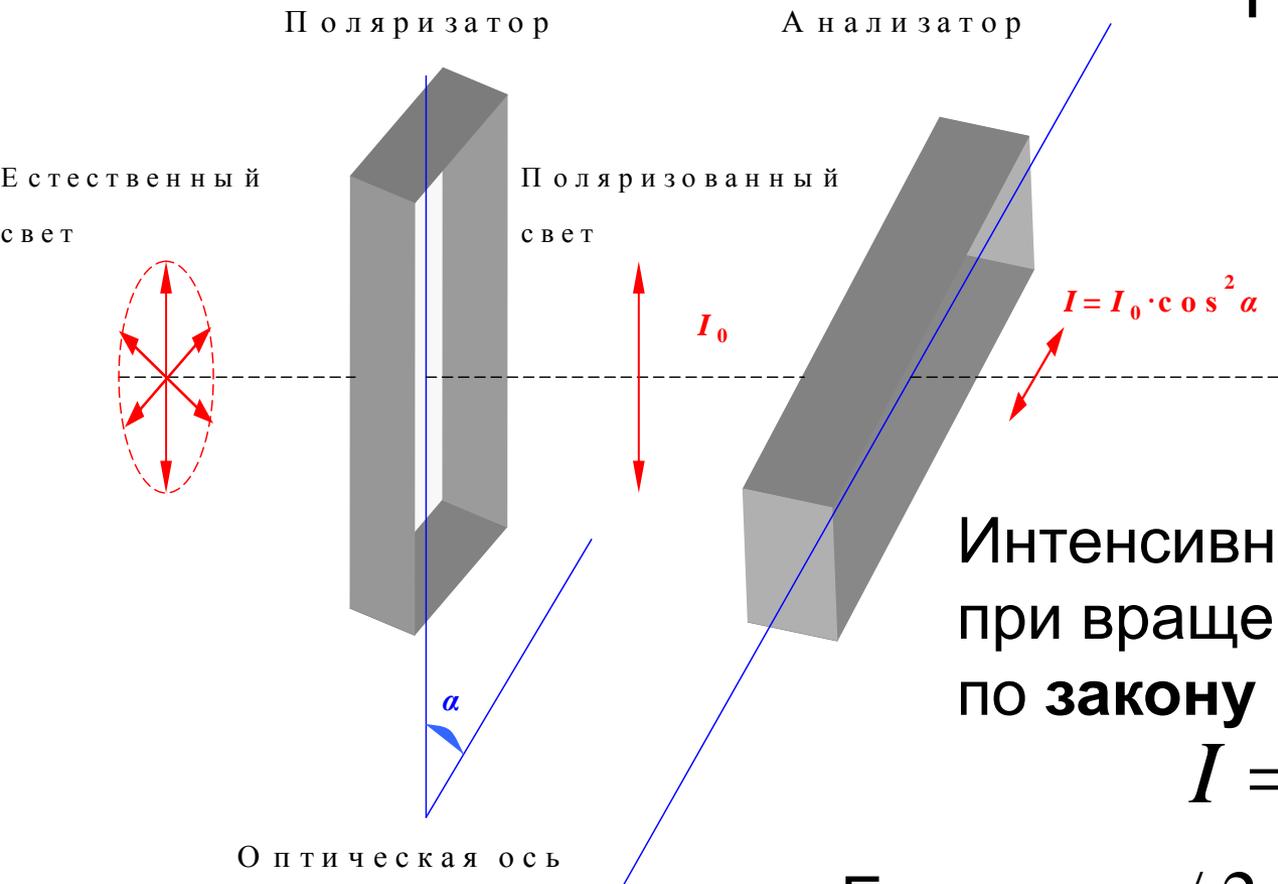
*Плоскополяризованный
(линейно поляризованный)
свет* вектор E колеблется
только в одном
направлении.

**Поляризация света –
выделение
плоскополяризованного
света из естественного или
частично поляризованного.**

Способы получения поляризованного света.

- Поляризаторы – вещества, пропускающие колебания только определенного направления.

Например, кристаллы (турмалин).



После

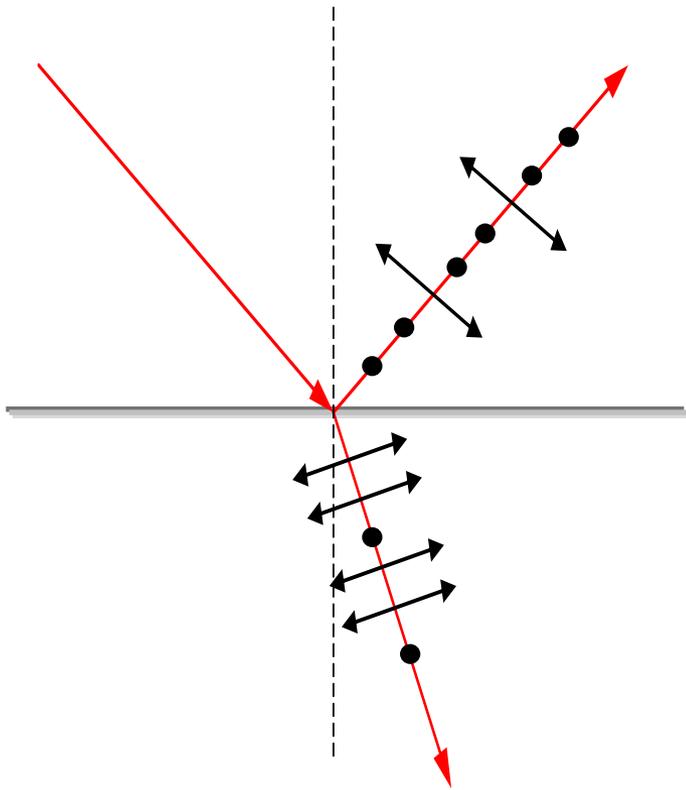
поляризатора
интенсивность
света не
меняется при
его вращении.

Интенсивность света меняется
при вращении анализатора
по **закону Малюса:**

$$I = I_0 \cos^2 \alpha,$$

Если $\alpha = \pi / 2, I \rightarrow 0$.

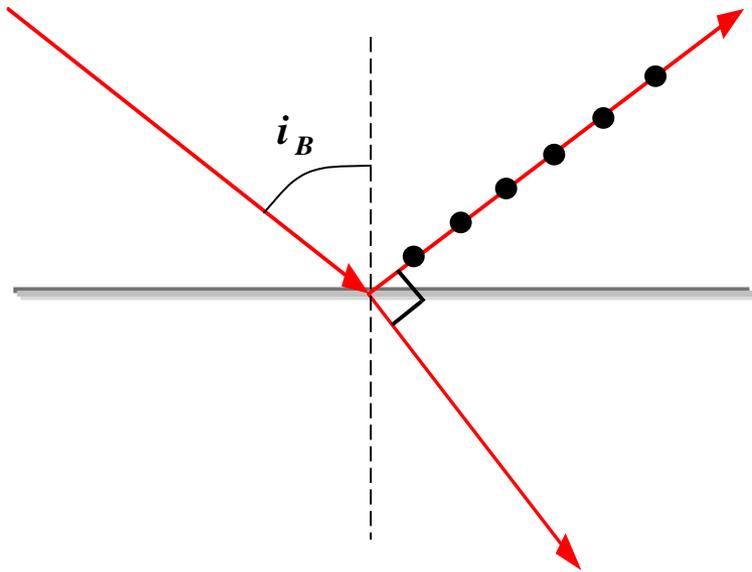
- Поляризация света при отражении и преломлении на границе двух диэлектриков.



- В *отраженном свете* преобладают колебания, перпендикулярные плоскости падения.
- В *преломленном свете* – параллельные плоскости падения.

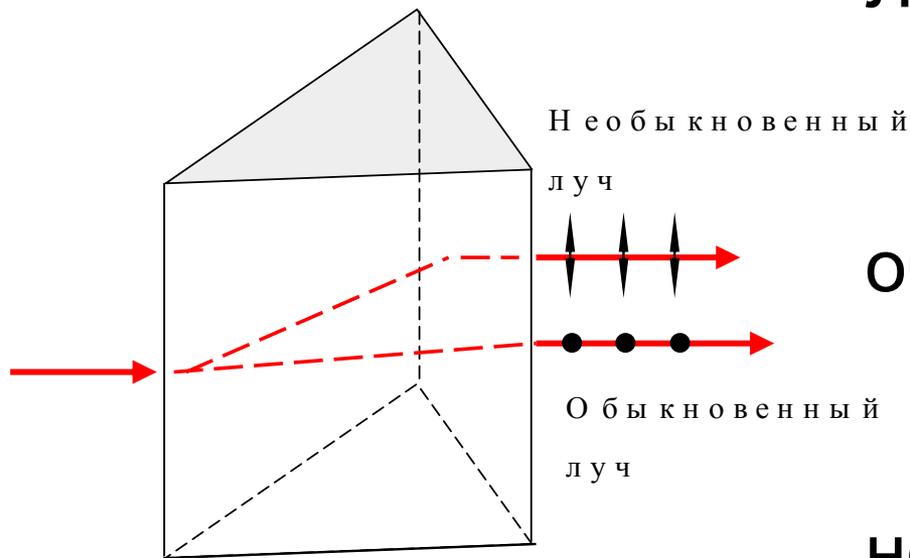
Закон Брюстера: степень поляризации зависит от угла падения лучей и показателя преломления.

При угле Брюстера, $\operatorname{tgi}_B = n_{21}$:



1. отраженный луч плоскополяризован,
2. преломленный луч поляризован максимально, но не плоскополяризован,
3. отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны.

- Двойное лучепреломление в прозрачных кристаллах (исландский шпат CaCO_3), обладающих естественной оптической анизотропией.



Луч внутри кристалла
расщепляется на два
луча:

обыкновенный – ведет
себя согласно закону
преломления,

необыкновенный – не
подчиняется закону
преломления.

Эти лучи направлены параллельно, плоскополяризованы
во взаимно перпендикулярных плоскостях.

- Искусственная оптическая анизотропия – сообщение оптической анизотропии естественно изотропным веществам под действием

- одностороннего сжатия или растяжения (кристаллы с кубической симметрией, стекла);
- электрического поля – эффект Керра (жидкости, аморфные тела, газы);
- магнитного поля (жидкости, стекла).

Вращение плоскости поляризации наблюдается у оптически активных веществ (кварц, сахар, водный раствор сахара, винная кислота, скипидар) при прохождении света через них.

- Для оптически активных кристаллов и чистых жидкостей

$$\varphi = \alpha \cdot d \text{ – угол поворота.}$$

- Для оптически активных жидкостей

$$\varphi = \alpha \cdot cd,$$

$$\varphi = \alpha \cdot d$$

$$\varphi = \alpha \cdot cd,$$

α – удельное вращение, равное углу поворота плоскости поляризации света слоем оптически активного вещества единичной толщины (для растворов – единичной концентрации), зависит от вещества, температуры, длины волны λ света,

d – расстояние, пройденное светом в оптически активном веществе,

c – массовая концентрация, [кг/м³].

- *Правовращающие* оптически активные вещества – если смотреть навстречу лучу, то плоскость поляризации вращается вправо.
- *Левовращающие* – влево.

Метод определения концентрации растворов оптически активных веществ – **поляриметрия (сахариметрия)**.

Эффект Фарадея (магнитное вращение плоскости поляризации) – в оптически неактивных веществах вращение плоскости поляризации под действием магнитного поля.

Эффект Доплера для световых волн

При движении источника и приемника электромагнитных волн друг относительно друга наблюдается эффект Доплера.

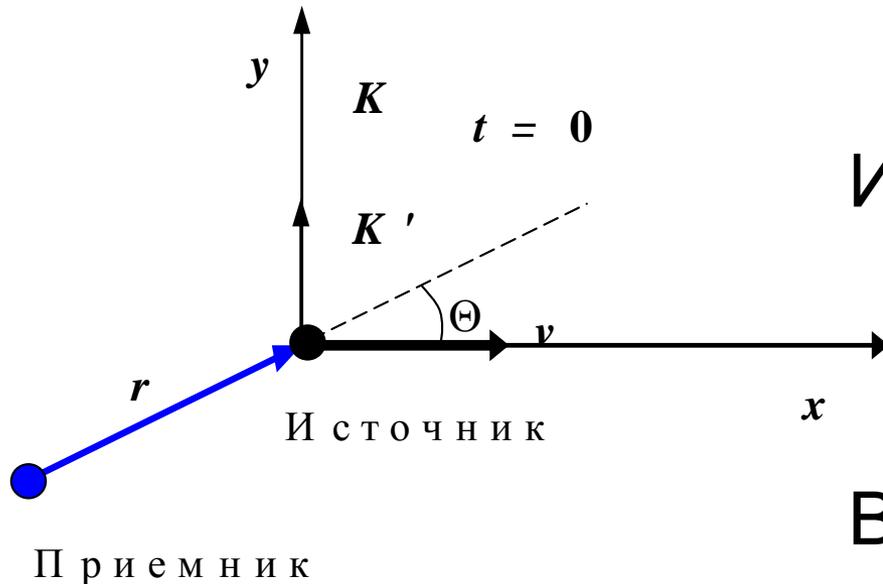
Закономерности этого явления для электромагнитных волн устанавливаются на основе специальной теории относительности.

Приемник неподвижен относительно K .

Источник движется относительно системы K вдоль x со скоростью v .

Источник неподвижен относительно системы K' , которая движется относительно K .

В момент времени $t = 0$: источник находится в начале координат системы K .



Θ – угол между направлением наблюдения и вектором скорости v , измеренный в системе отсчета приемника (K).

Согласно принципу относительности Эйнштейна, уравнения световой волны, посылаемой источником в направлении приемника, в системе K и K' имеют тождественный вид. Делая в уравнениях замену переменных (x', y', t') \rightarrow (x, y, t) в соответствии с преобразованиями Лоренца, можно получить уравнения для частот:

$$\omega = \frac{\omega_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}{1 + \frac{v}{c} \cos \Theta}; \quad \nu = \frac{\nu_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}{1 + \frac{v}{c} \cos \Theta},$$

$$\omega = \frac{\omega_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}{1 + \frac{v}{c} \cos \Theta}; \quad \nu = \frac{\nu_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}{1 + \frac{v}{c} \cos \Theta},$$

$\omega_0; \nu_0$ – частота световой волны, испускаемой источником,

$\omega; \nu$ – частота световой волны, воспринимаемая приемником.

При небольших скоростях движения $v \ll c$, релятивистская формула эффекта Доплера (применяется разложение в ряд) совпадает с классической формулой:

$$\nu \approx \nu_0 \left(1 - \frac{v}{c} \cos \Theta \right)$$

- Если источник движется относительно приемника вдоль соединяющей их прямой ($\Theta = 0; \pi$), то наблюдается *продольный эффект Доплера*.
- В случае сближения источника и приемника ($\Theta = \pi$) относительная скорость отрицательная:

$$v = \frac{v_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}{1 - \frac{v}{c}}$$

$$\begin{aligned}
\nu &= \frac{\nu_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}{1 - \frac{v}{c}} = \frac{\nu_0 \sqrt{\left(1 - \frac{v}{c}\right)\left(1 + \frac{v}{c}\right)}}{1 - \frac{v}{c}} = \nu_0 \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{v}{c}\right)\left(1 + \frac{v}{c}\right)}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)^2}} = \\
&= \nu_0 \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} > \nu_0
\end{aligned}$$

Наблюдается сдвиг в более коротковолновую область

$\nu > \nu_0; \lambda < \lambda_0$ – фиолетовое смещение.

В случае взаимного удаления $\Theta = 0$)

относительная скорость положительная:

$$v = v_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} < v_0; \lambda > \lambda_0 \quad - \text{красное смещение.}$$

Если источник движется

перпендикулярно к линии наблюдения $\Theta = \frac{\pi}{2}$

наблюдается **поперечный эффект**

Доплера:

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}.$$

Поперечный эффект Доплера значительно слабее продольного (ввиду малости $\frac{v}{c}$).

Эффект Доплера

Этот эффект обусловлен различием хода времени в системах отсчета, связанных с приемником и источником волн.

Следовательно, экспериментальное обнаружение продольного эффекта Доплера явилось бы подтверждением СТО.

Эффект Доплера, связанный с тепловым движением излучающих свет атомов газа, вызывает уширение спектральной линии ($\nu_{пр}$ – частота, регистрируемая приемником):

$$\nu_0 - \frac{\Delta\nu_D}{2} < \nu_{пр} < \nu_0 + \frac{\Delta\nu_D}{2},$$

ν_0 – частота излучения неподвижного атома,

$$\Delta\nu_D \sim \sqrt{\frac{T}{m}};$$

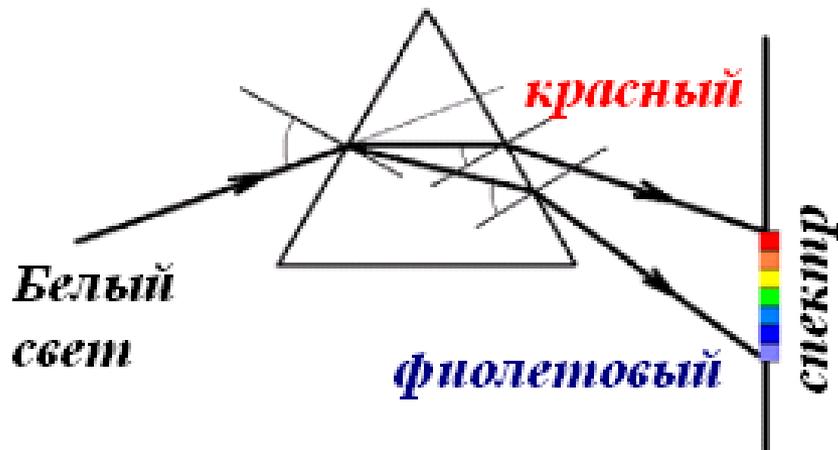
T – абсолютная температура,
 m – масса атома.

Дисперсия света.

Нормальная и аномальная дисперсия

Дисперсия света – зависимость фазовой скорости света (показателя преломления

$$n = \frac{c}{v} \quad) \text{ в среде от его частоты (длины волны } \lambda): \quad n = f(\lambda).$$



Следствие дисперсии:
разложение в спектр пучка белого света при прохождении через призму.

Зависимости $n = f(\lambda)$; $n = f(\nu)$ – нелинейные

и немонотонные. *Дисперсия вещества* –

величина, определяемая соотношениями:

$$D = \frac{dn}{d\lambda}; D = \frac{dn}{d\nu}.$$

Области значений ν , λ , в

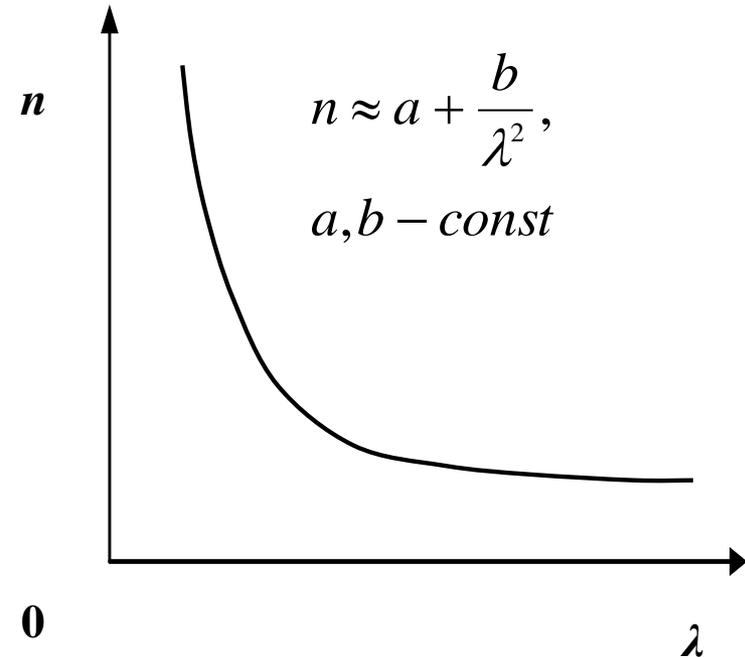
которых дисперсия D

увеличивается по модулю с

ростом ν , с уменьшением λ

соответствуют *нормальной*

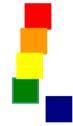
дисперсии света.



Нормальной дисперсии света

Наблюдается у веществ прозрачных для света.

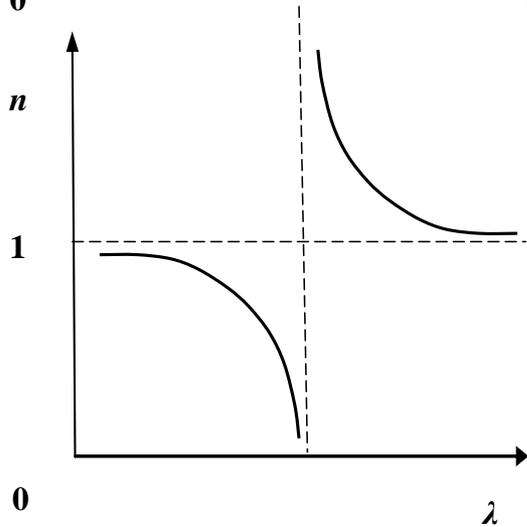
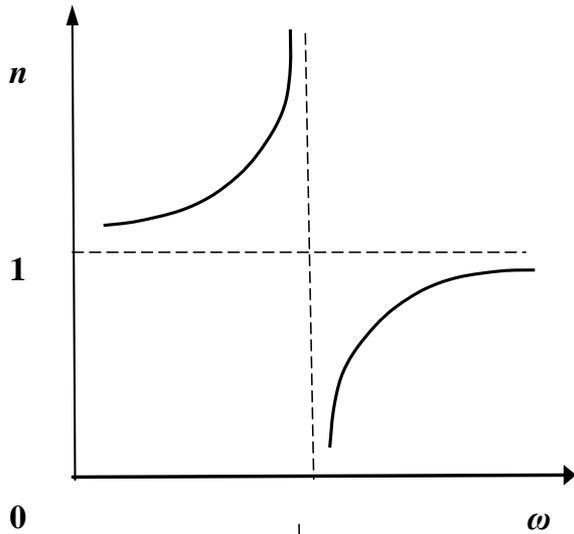
Например, обычное стекло прозрачно для видимого света, и в этой области наблюдается нормальная дисперсия света в стекле.



Если вещество поглощает часть лучей, то в области поглощения и вблизи неё ход дисперсии обнаруживает аномалию, т.е. на некоторых участках более короткие волны преломляются меньше, чем более длинные.

Такой характер дисперсии называется *аномальной дисперсией*.

Например, у обычного стекла эти полосы находятся в инфракрасной и ультрафиолетовой частях спектра.



Волновой пакет. Групповая скорость

Гармоническая волна описывается уравнением: $S_0 = A_0 \cos(\omega t - kx)$,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\omega}{v} \quad \text{— волновое число,}$$

$$v = \frac{\omega}{k} \quad \text{— фазовая скорость.}$$

Исходя из принципа суперпозиции и разложения в ряд Фурье, любую волну можно представить в виде суперпозиции (суммы) гармонических волн, мало отличающихся друг от друга по частоте, — **волнового пакета** (группы волн).

Для двух волн, распространяющихся вдоль оси ОХ, результирующая волна представляется в виде:

$$S = 2A_0 \underbrace{\cos\left(\frac{t \cdot d\omega - x \cdot dk}{2}\right)}_{A(x,t)} \cdot \cos(\omega t - kx)$$

-негармоническая волна.

Скорость распространения этой волны (волнового пакета) – скорость перемещения максимума амплитуды волны:

при условии $t \cdot d\omega - x \cdot dk = const \Rightarrow \frac{dx}{dt} = \frac{d\omega}{dk} = u$ – групповая скорость.

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \frac{d\omega}{dk} = u \\ \omega = 2\pi\nu; \quad k &= \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\underbrace{\nu T}} = \frac{2\pi n \nu}{c} \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{d\omega}{dk} = \frac{d(2\pi\nu)}{d\left(\frac{2\pi n \nu}{c}\right)} = \frac{2\pi d\nu}{\frac{2\pi}{c}(dn \cdot \nu + n d\nu)} = \frac{c d\nu}{dn \cdot \nu + n d\nu} \Rightarrow$$

$$u = \frac{c}{n + \nu \frac{dn}{d\nu}} = \frac{v}{1 + \frac{\nu}{n} \frac{dn}{d\nu}}$$

- При *нормальной дисперсии* групповая скорость меньше фазовой: $u < v$.

$$\left(\frac{dn}{dv} > 0 \Rightarrow u = \frac{v}{1 + \underbrace{\frac{v}{n} \frac{dn}{dv}}_{>1}} \right)$$

- При *аномальной дисперсии*: $u > v$.

Классическая электронная теория дисперсии света

Оптически прозрачные среды немагнитные ($\mu \approx 1$). Следовательно, показатель

преломления $n = \sqrt{\varepsilon\mu} \approx \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{1 + \varkappa}$, (1)

\varkappa – диэлектрическая восприимчивость среды.

$$\varepsilon = 1 + \varkappa = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E}, (2)$$

P – мгновенное значение поляризованности обусловлено **электронной поляризацией**, т.к.

$\nu_{\text{света}} \sim 10^{15}$ Гц, что велико для поляризации молекул.

$$n^2 = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E}. (3)$$

Если каждая молекула содержит один *оптический электрон* (внешний электрон), то вектор поляризованности среды

$$\vec{P} = n_0 \vec{p}_l; (4) \quad \vec{p}_l = e \cdot \vec{r}, (5)$$

n_0 – концентрация атомов,

e – заряд электрона,

r – смещение электрона из положения равновесия под действием вектора E световой волны.

Подставляем (5)→(4)→(3):
$$n^2 = 1 + \frac{n_0 e r}{\varepsilon_0 E}, \quad (6)$$

т.е. для определения n необходимо найти смещение электрона r под действием следующих сил:

1. возвращающая квазиупругая сила

$$\vec{F}_{\text{возвр}} = -m\omega_0^2 \vec{r},$$

ω_0 – циклическая частота свободных незатухающих колебаний;

2. сила сопротивления
$$\vec{F}_{\text{сопр}} = -2\beta m \frac{d\vec{r}}{dt},$$

β – коэффициент затухания свободных колебаний электрона;

3. вынуждающей силы $\vec{F} = -e\vec{E}$
со стороны переменного электрического поля \mathbf{E}
волны.

Уравнение вынужденных колебаний:

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} + 2\beta \frac{d\vec{r}}{dt} + \omega_0^2 \vec{r} = -\frac{e\vec{E}}{m} = \frac{eE_0}{m} \cos \omega t. (7)$$

$2\beta \frac{d\vec{r}}{dt}$ можно пренебречь, если среда не
поглощает свет, $\beta = 0$.

Для случая линейно поляризованного света
правая часть уравнения (7): $\frac{eE_0}{m} \cos \omega t$.

Решением уравнения (7) является уравнение вынужденных колебаний оптического электрона:

$$r = A \cos \omega t, (8)$$

$$A = \frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}. (9)$$

Подставляем (9) → (8) → (6):

$$n^2 = 1 + \frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 m} \cdot \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)} (10) \Rightarrow n = n(\omega).$$

Если в веществе различные молекулы (m_i) содержат различные заряды (e_i), совершающие колебания с различными собственными частотами (ω_{0i}), то

$$n^2 = 1 + \frac{n_0}{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{\frac{e_i^2}{m_i}}{\omega_{0i}^2 - \omega^2} \quad (11) \Rightarrow n = n(\omega).$$

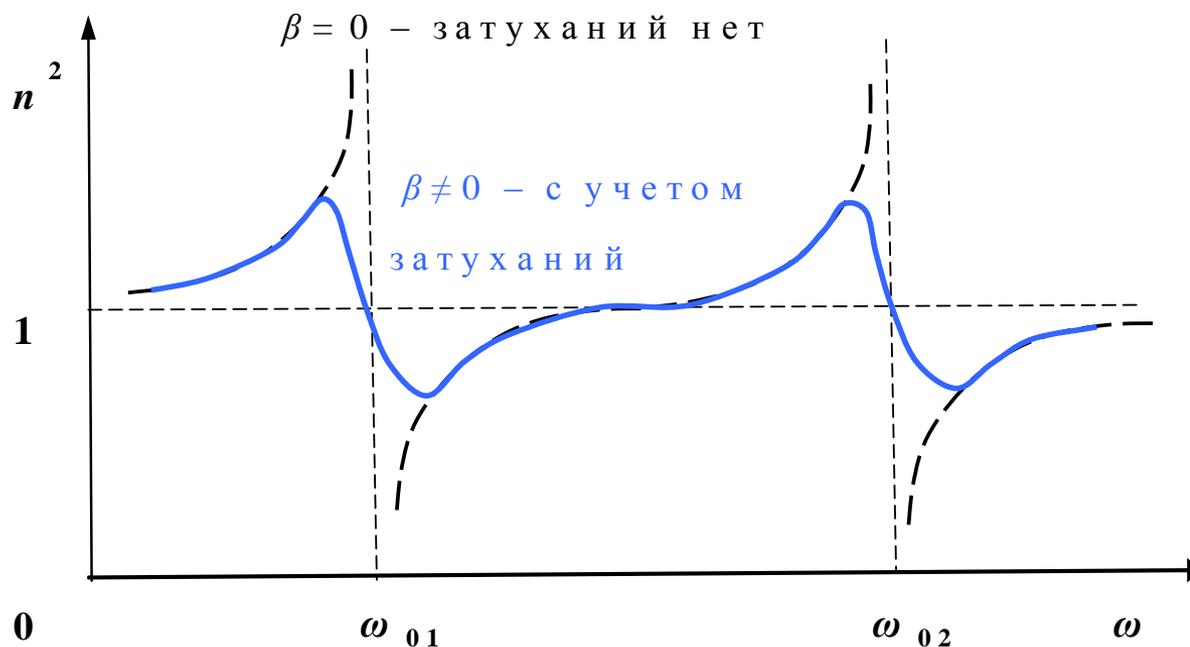
Если частота света ω заметно отличается от

ω_{0i} – собственной частоты электронов

$$\frac{e_i^2}{m_i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_{0i}^2 - \omega^2} \ll 1 \Rightarrow n^2 \approx 1.$$

Если $\omega \rightarrow \omega_{0i}$: и функция терпит разрыв
 $+\infty$ при $\omega < \omega_{0i}$,
 $-\infty$ при $\omega > \omega_{0i}$. В этих точках наблюдается
аномальная дисперсия.

В остальных областях с ростом ω растет и n ,
наблюдается *нормальная дисперсия*.



Поглощение (абсорбция) света

Поглощение света – явление уменьшения энергии световой волны при её распространении в веществе, происходящее вследствие преобразования энергии волны во внутреннюю энергию вещества или энергию вторичного излучения, имеющего другой спектральный состав и иные направления распространения.

Поглощение света может вызывать: нагревание вещества, возбуждение или ионизацию атомов или молекул, фотохимические реакции и другие процессы в веществе.

Описывается *уравнением Бугера-Ламберта* (закон Бугера):

$$I = I_0 e^{-\alpha l},$$

I_0, I – значения интенсивности света на входе и выходе из слоя среды толщиной l ,

α – показатель поглощения среды (линейный коэффициент поглощения), зависит от химической природы и состояния поглощающей среды и от длины световой волны λ .

$$I = I_0 e^{-\alpha l}$$

При $l = \frac{1}{\alpha}$ интенсивность света уменьшается в e раз.

Зависимость $\alpha(\lambda)$ объясняет окрашенность поглощающих тел. Тело при освещении белым светом будет казаться того цвета, λ которых оно плохо поглощает.

Зависимость $\alpha(\lambda)$, характеризующая *спектр поглощения света* в этой среде, связана с явлением резонанса при вынужденных колебаниях электронов в атомах и атомах в молекулах диэлектрика.

- У разряженных одноатомных газов – *линейчатый спектр* поглощения.
- У газов с многоатомными молекулами – *полосы поглощения*.
- Жидкие и твердые диэлектрики – *сплошной спектр* поглощения (широкие полосы поглощения, в пределах которых $\alpha \gg 1$).