

# **Взаимодействие света с веществом**

## **Содержание лекции:**

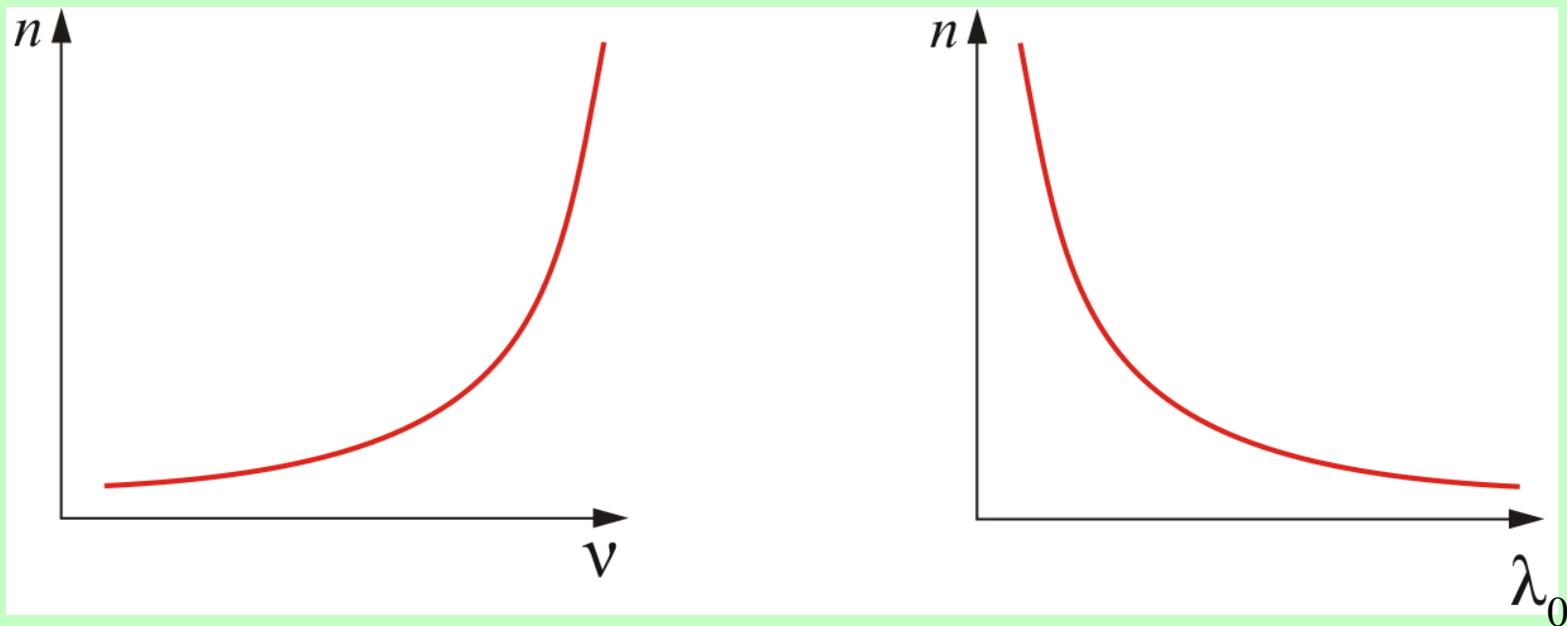
- **Дисперсия света**
- **Групповая скорость**
- **Элементарная теория дисперсии**
- **Поглощение света**
- **Рассеяние света**

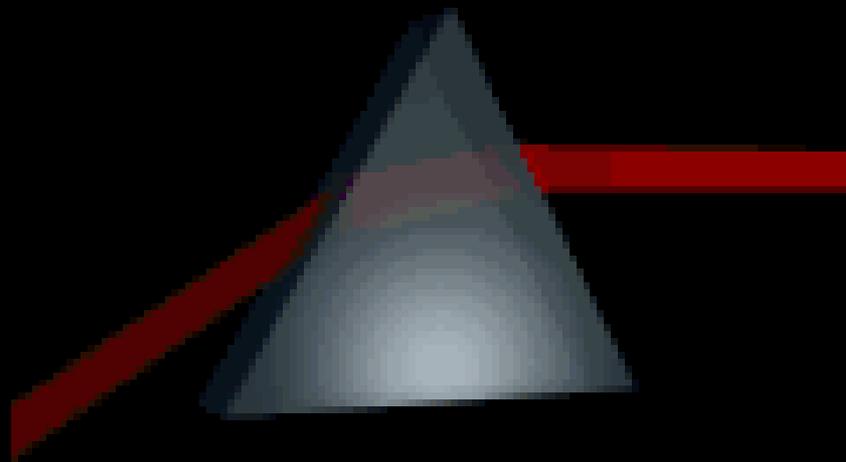
# 1. Дисперсия света

*Дисперсией* света называется зависимость показателя преломления  $n$  вещества от частоты  $\nu$  (длины волны  $\lambda$ ).

$$n = f(\nu) \quad \text{или} \quad n = f(\lambda_0)$$

$\lambda_0$  - длина волны в вакууме.





Разложение светового пучка в дисперсионный спектр вследствие дисперсии света на стеклянной призме

**Дисперсия вещества** показывает, как быстро меняется показатель преломления с длиной волны:

$$D = \frac{dn}{d\lambda_0}$$

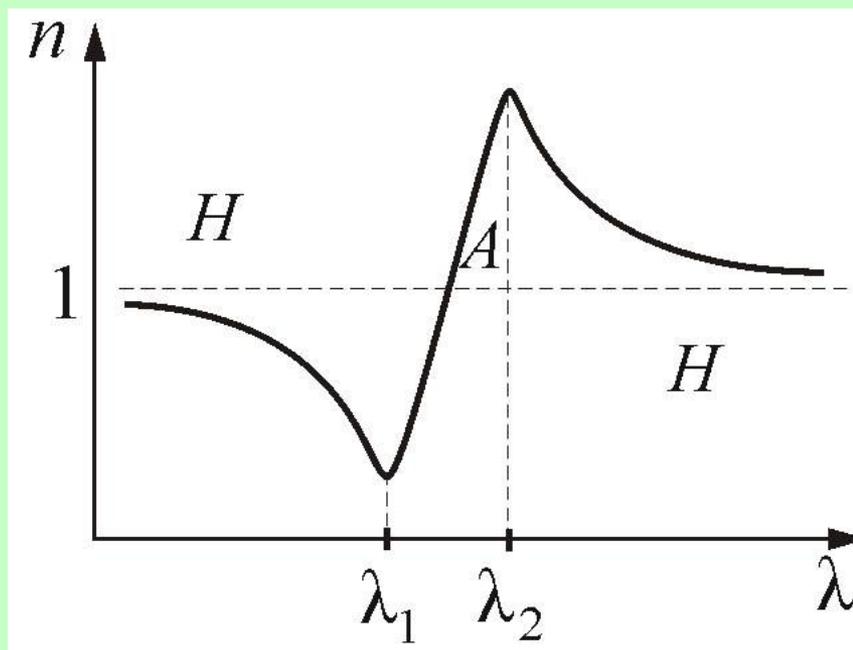
$$\frac{dn}{d\lambda_0} < 0$$

- **нормальная дисперсия**: с ростом длины волны показатель преломления уменьшается.

$$\frac{dn}{d\lambda_0} > 0$$

- **аномальная дисперсия**: с ростом длины волны показатель преломления увеличивается.

Среды, обладающие дисперсией, называют **диспергирующими**.



**Зависимость показателя преломления от длины волны:**

*H* – участок, соответствующий нормальной дисперсии;

*A* – участок, соответствующий аномальной дисперсии.

## 2. Групповая скорость

*Строго монохроматическая волна вида*

$$E = A \cos(\omega t - kx + \varphi)$$

*никакого сигнала не переносит* (все ее участки, отличающиеся по фазе на  $2\pi$ , эквивалентны между собой).

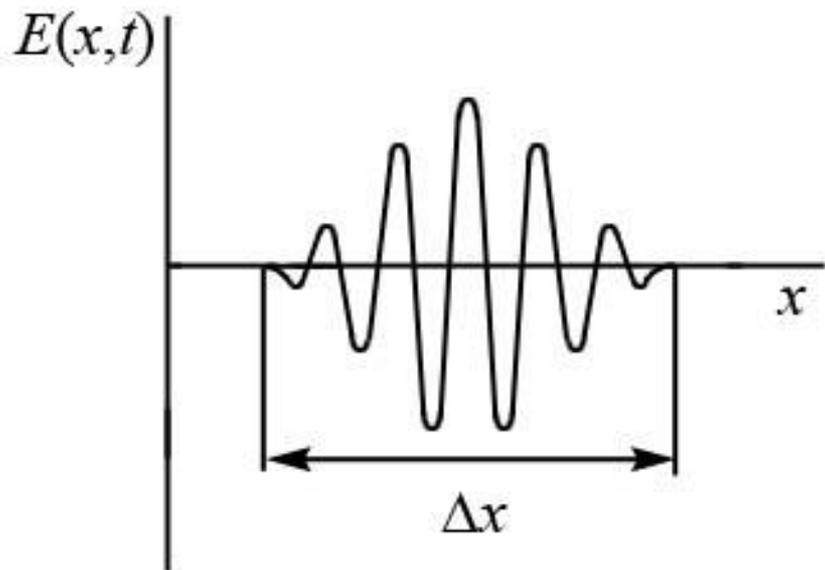
Поэтому для передачи сигнала используется *световой импульс*, который можно рассматривать как *наложение монохроматических волн с частотами, заключенными в некотором интервале  $\Delta\omega$* .

*Волновой пакет (группа волн)* – суперпозиция волн, мало отличающихся по частоте.

Аналитическое выражение для группы волн:

$$E(x, t) = \int_{\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}} A_{\omega} \cos(\omega t - k_{\omega} x + \varphi_{\omega}) d\omega \quad (\Delta\omega \ll \omega_0)$$

$A_{\omega}$ ,  $k_{\omega}$ ,  $\varphi_{\omega}$  – для разных частот разные.



- график функции  $E(x, t)$  для фиксированного  $t$ .

$\Delta x$  – **ширина волнового пакета**.

В пределах пакета волны усиливают друг друга, вне пакета – гасят друг друга.

**Чем меньше ширина волнового пакета, тем больший интервал частот (волновых чисел) требуется для его описания:**

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

**В недиспергирующей среде все плоские волны – составляющие пакета – перемещаются с одинаковой фазовой скоростью  $v$ :**

- скорость пакета совпадает с фазовой;
- его форма со временем не изменяется.

**В диспергирующей среде пакет со временем расплывается (его ширина увеличивается).**

**Если дисперсия невелика: расплывание пакета происходит не слишком быстро.**

В этом случае движение пакета происходит со скоростью, равной скорости центра пакета (точки с максимальным значением  $E$ ) – **групповая скорость  $u$**  (с ней совпадает скорость переноса энергии волной)

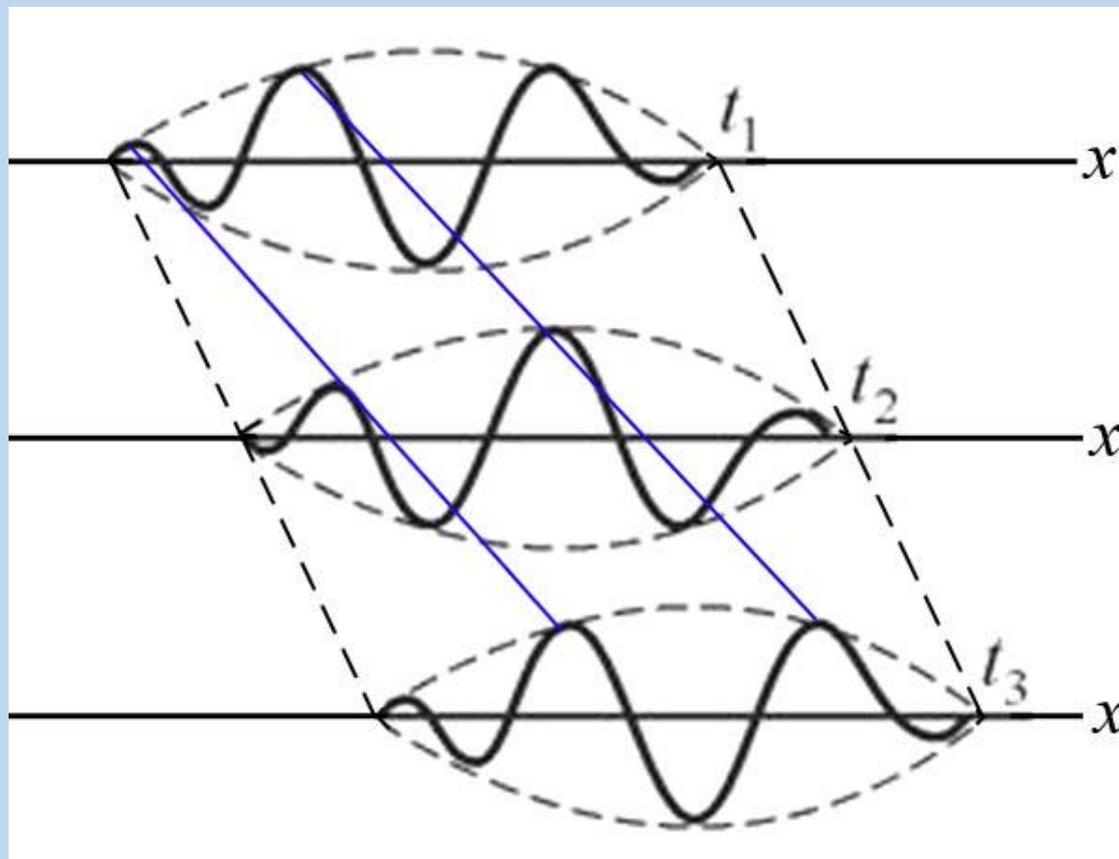
$$u = \frac{d\omega}{dk} = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}$$

**В зависимости от знака  $dv/d\lambda$  групповая скорость может быть**

- меньше фазовой  $\left( \frac{dv}{d\lambda} > 0 \right)$  - нормальная дисперсия;
- больше фазовой  $\left( \frac{dv}{d\lambda} < 0 \right)$  - аномальная дисперсия.

**В отсутствие дисперсии групповая скорость совпадает с фазовой:**

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



**Волновой пакет в 3 последовательных момента времени**  
(групповая скорость меньше фазовой скорости)

пакет движется со скоростью  $u$ ,

его компоненты движутся со скоростью  $v$

(движение «горбов» и «впадин» внутри пакета происходит быстрее перемещения самого пакета)

### 3. Элементарная теория дисперсии

Дисперсия света является результатом взаимодействия электромагнитной волны с заряженными частицами, входящими в состав вещества. Движение электронов в атоме подчиняется законам квантовой механики.

Предполагается, что электроны внутри атома связаны квазиупруго. При выведении их из положения равновесия (смещаются в основном валентные электроны) электроны совершают затухающие колебания, теряя энергию на излучение электромагнитных волн.

При прохождении через вещество электромагнитной волны каждый электрон находится под действием следующих сил:

1. Квазиупругая сила  $F_{\text{упр}} = -k_{\text{упр}} r$

2. Сила трения излучения  $F_{\text{сопр}} = -k_{\text{сопр}} \dot{r}$

3. Вынуждающая сила – сила Лоренца:  $F = -eE_0 \cos(\omega t + \varphi)$

$\varphi$  – величина, определяемая координатами данного электрона,  
 $E_0$  - амплитуда напряженности электрического поля волны.

Уравнение движения электрона имеет вид:

$$\ddot{r} + 2\beta\dot{r} + \omega_0^2 r = -\frac{e}{m} E_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

Его решение:

$$r(t) = -\frac{(e/m)E(t)}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

Можно показать, что

$$n^2 = 1 + \frac{N}{\epsilon_0} \sum_k \frac{e^2 / m}{\omega_{0k}^2 - \omega^2}$$

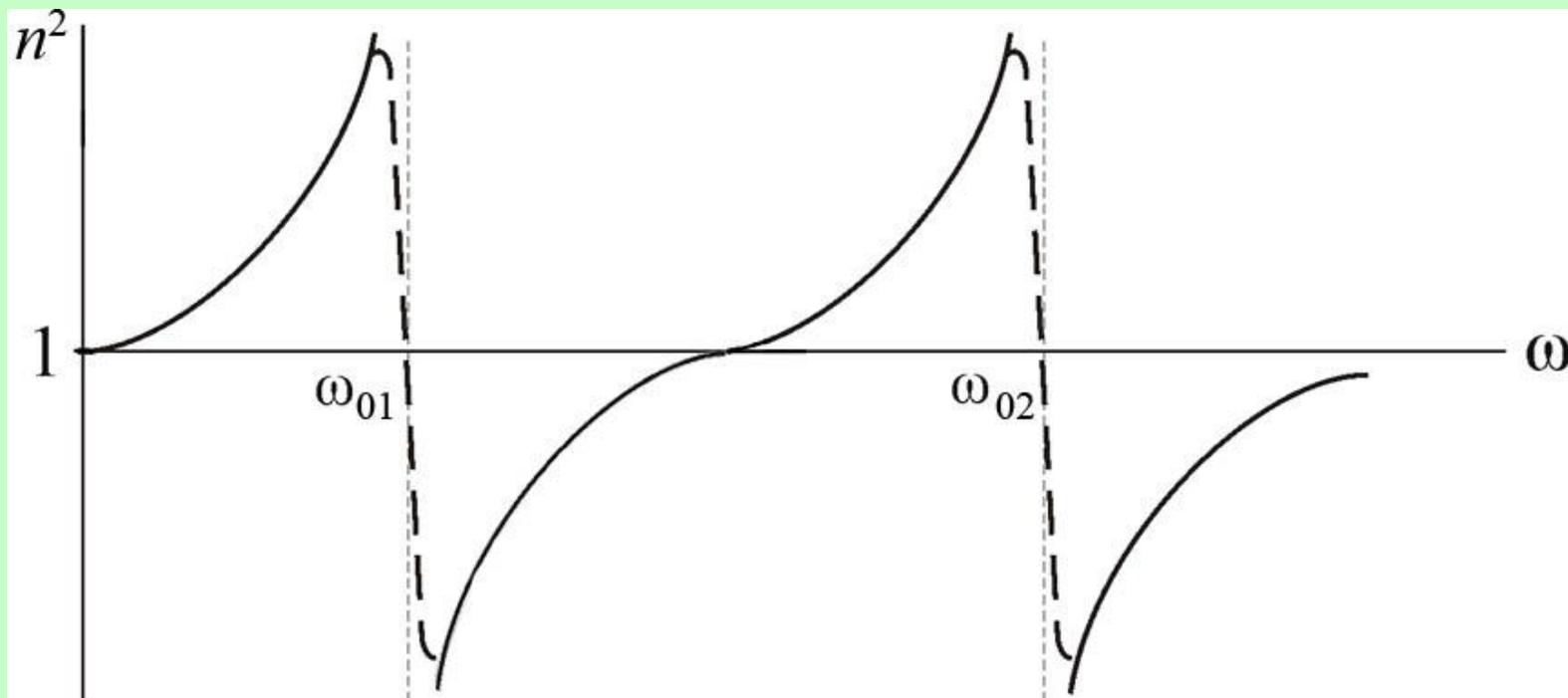
$n$  – показатель преломления вещества;

$N$  – число молекул в единице объема;

$\omega_{0k}$  – собственная частота  $k$ -го электрона в молекуле.

При  $\omega \rightarrow \omega_{0k}$   $n^2 \rightarrow \infty$

При  $\omega$ , далекой от  $\omega_{0k}$ ,  $n^2 \rightarrow 1$



В процессе вынужденных (под действием падающей световой волны) колебаний электронов с частотой  $\nu$ , равной частоте вынуждающей силы, **периодически изменяются дипольные электрические моменты атомов с той же частотой.**

Среднее расстояние между атомами вещества много меньше протяженности одного цуга волн. Следовательно, **вторичные волны, излучаемые большим числом соседних атомов, когерентны как между собой, так и с первичной волной.**

При сложении эти волны интерферируют, в результате чего получаются все наблюдаемые оптические явления, связанные со взаимодействием света с веществом.

## 4. Поглощение света

*Поглощением (абсорбцией) света* называется явление потери энергии световой волной, проходящей через вещество.

Потеря энергии происходит из-за возбуждения колебаний электронов, т.е. энергия света переходит во внутреннюю энергию вещества.

*Интенсивность света при прохождении через вещество убывает по экспоненциальному закону:*

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

$I_0$  – интенсивность волны на входе в среду;

$l$  – толщина поглощающего слоя;

$\alpha$  – коэффициент поглощения.

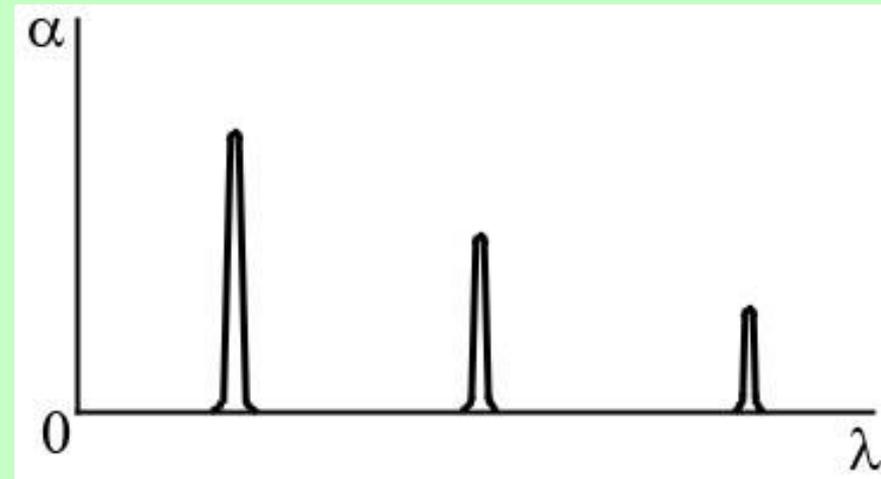
При  $\alpha = \frac{1}{l}$  интенсивность света в  $e$  раз меньше  $I_{\phi} = \frac{I_0}{e}$

Т.е. *коэффициент поглощения* есть величина, обратная толщине слоя, при прохождении которого интенсивность волны убывает в  $e$  раз.

**Зависимость коэффициента поглощения от длины волны  $\alpha(\lambda)$  определяет спектр поглощения материала.**

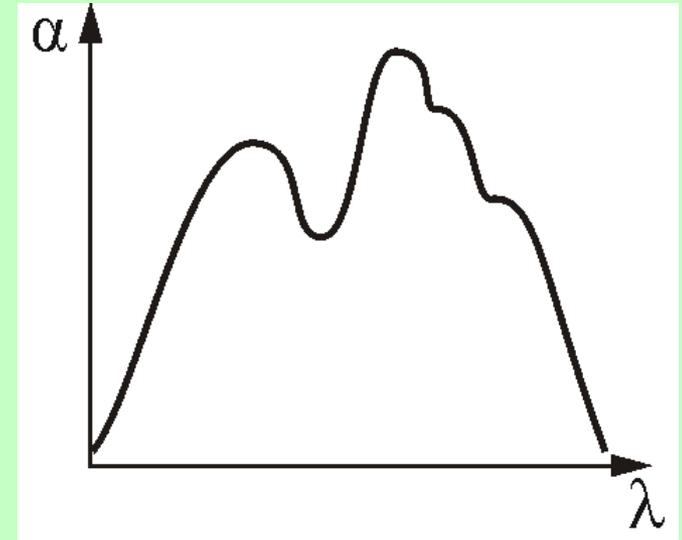
**1. У веществ, атомы (молекулы) которых слабо взаимодействуют друг с другом (газы, пары металлов):**

$\alpha \neq 0$  в узком интервале длин волн (шириной  $\sim 10^{-2}$  Å) – **резкие максимумы, соответствующие резонансным частотам колебаний электронов внутри атомов.**



2. При увеличении давления газа полосы поглощения расширяются, при высоких давлениях спектр поглощения газов приближается к спектрам поглощения жидкостей.

**Расширение полос поглощения есть результат взаимодействия атомов (молекул) в среде.**

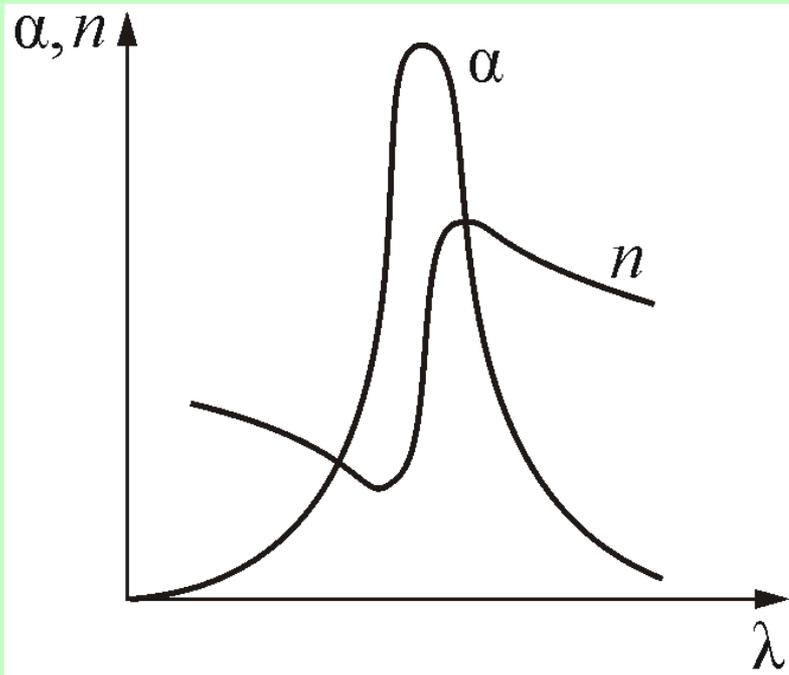


3. **Металлы практически непрозрачны для света из-за наличия свободных электронов:**

При падении света

- свободные электроны приходят в движение,
- возникают быстропеременные токи,
- выделяется тепло Джоуля – Ленца,  
- энергия световой волны переходит во внутреннюю энергию металла.

**Внутри полосы поглощения наблюдается аномальная дисперсия ( $n$  убывает с уменьшением  $\lambda$ )**



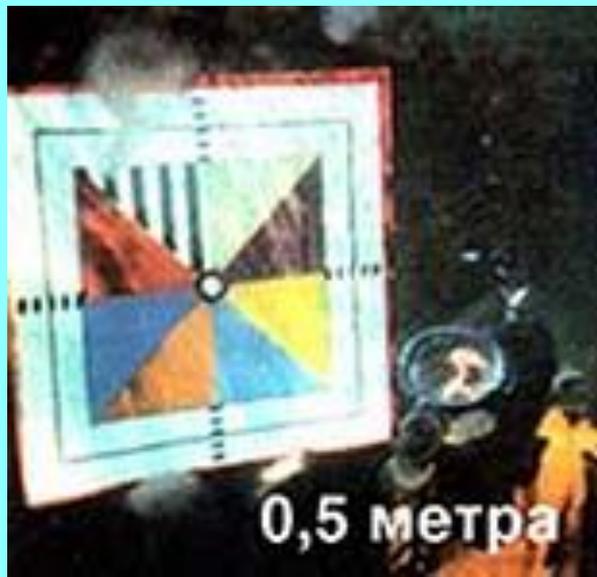
Исследование спектров поглощения лежит в основе **спектрального анализа**, основанном на измерениях частот и интенсивностей линий (полос) поглощения.

**Структура спектров поглощения определяется составом и строением молекул**, поэтому изучение спектров поглощения является одним из основных методов количественного и качественного исследования веществ.

**Зависимостью коэффициента поглощения от частоты (длины волны) объясняется окрашенность поглощающих тел.**



Разнообразие пределов селективного (избирательного) поглощения у различных веществ объясняет разнообразие цветов в окружающем мире.



**Чем меньшей энергией обладает свет, тем быстрее он поглощается:**

Длинноволновые части спектра, красный и оранжевый цвета, поглощаются почти полностью уже на глубине 5-8 метров.

Затем исчезают желтые цвета.

Гораздо дольше проникают синий и зеленый.

## 5. Рассеяние света

В неоднородной среде световые волны **дифрагируют на неоднородностях среды – рассеиваются.**

*Среды с ярко выраженной оптической неоднородностью называют **мутными**:*

1. **Дымы** – взвеси в газах мельчайших твердых частиц;
2. **Туманы** - взвеси в газах мельчайших капель жидкости;
3. **Взвеси (суспензии)** – жидкости с плавающими в них твердыми частицами;
4. **Эмульсии** – взвеси частиц одной жидкости в другой, не растворяющие первую;
5. **Некоторые твердые тела** (опал, перламутр...)

- **Если размеры неоднородностей малы по сравнению с длиной волны:**

В результате рассеяния света интенсивность в направлении распространения убывает быстрее, чем в случае только поглощения:

$$I = I_0 e^{-(\alpha + \alpha')l}$$

$\alpha'$  – **коэффициент экстинкции.**

**Интенсивность рассеянного света:**

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

- **закон Рэля.**

**Рассеянный свет является частично поляризованным.**

- **Если размеры неоднородностей сравнимы с длиной волны:**

Электроны, находящиеся в различных местах неоднородности, колеблются с заметным сдвигом по фазе.

В результате **интенсивность рассеянного света:**

$$I \propto \omega^2 \propto \frac{1}{\lambda^2}$$

***Молекулярное рассеяние*** – рассеяние, обусловленное флуктуациями плотности жидкости или газа.

Флуктуации вызваны хаотическим движением молекул вещества.



**Рассеянный свет (туман)**

## Рассеянный свет (раннее утро)



Голубые и синие лучи рассеиваются сильнее, чем желтые и красные (закон Рэлея), обуславливая голубой цвет неба

## Рассеяние света под водой

Рассеяние света, как правило, значительно интенсивнее поглощения,



Т.о. с увеличением глубины преобладает уже не направленный, а рассеянный свет, идущий со всех сторон.

Поэтому на достаточно больших глубинах, вне видимости дна и поверхности, можно стать жертвой эффекта так называемой «голубой пелены» и потерять представление о том, где верх, а где низ.