Лекция 12

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТА С ВЕЩЕСТВОМ

Лектор: к.т.н., доц. Якимов А.Н.

Кафедра медицинской и биологической физики, медицинской информатики, биостатистики

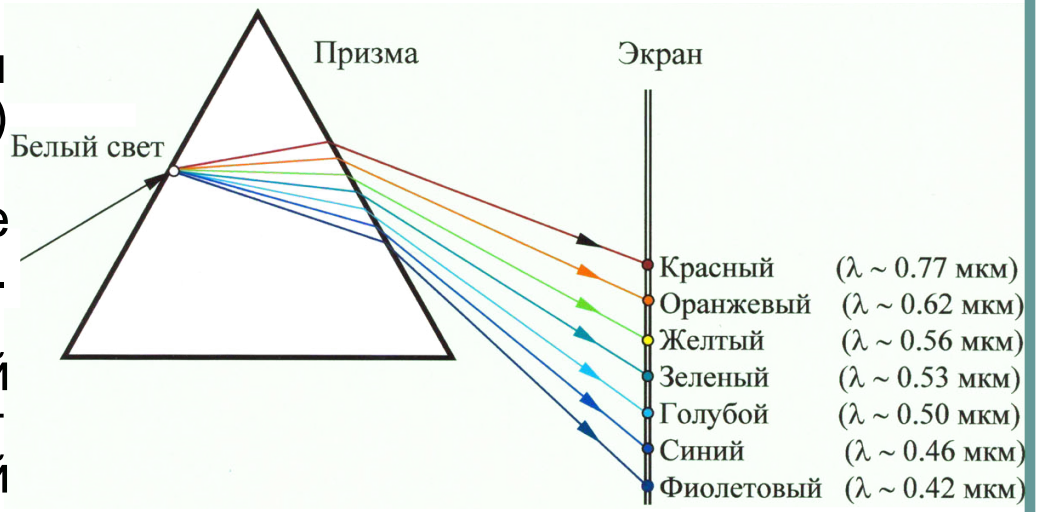
ГУ «Луганский государственный медицинский университет»

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

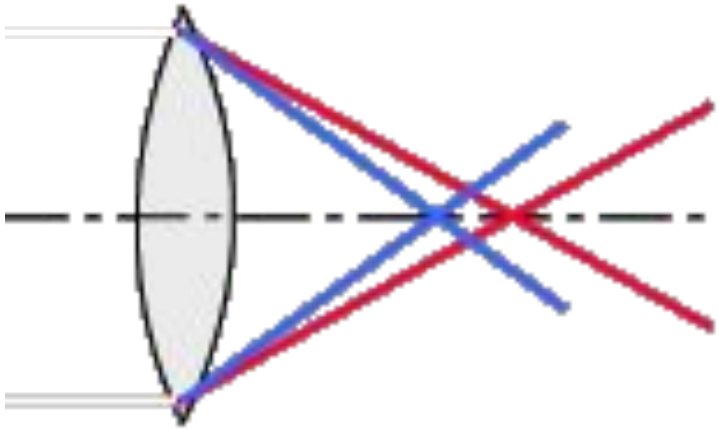
- ***Дисперсией света*** называют явления, обусловленные зависимостью показателя преломления вещества *n* от длины световой волны λ.
- Световые волны различных длин *l* распространяются в вакууме с одинаковыми скоростями (с = 3×10^8 м/с), а в веществе - с различными. Например, в обыкновенном стекле красный свет распространяется с большей скоростью, чем фиолетовый. Также дисперсия вызывает нежелательную аберрацию света в линзах.

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Свет разных длин волн (разного цвета) преломляется неодинаково на границе двух прозрачных сред. Различная преломляемость лучей разного цвета позволяет разложить сложный (белый) свет на его монохроматические составляющие («моно» - один, «хромос» - цвет). Такой опыт был впервые (1672 г.) предложен Исааком Ньютоном.



Аберрация света в линзе из-за дисперсии.



ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

- Обычно дисперсию материалов характеризуют, измеряя показатель F голубой линии водорода (486.1 nm), желтой линии натрия D (589.3 nm), и красной линии водорода C (656.3 nm).
- Дисперсия характеризуется стандартным параметром, называемым число Аббе, или значением ν или числом V, что является одним и тем же:

натрий, желтая

$$\nu = \frac{(n_D - 1)}{(n_F - n_C)}$$

водород, голубая

водород, красная

Стекла с $\nu \geq 55$ (малая дисперсия) называют кронами

с $\nu < 50$ (большая дисперсия) называют флинтами

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

- **Пример дисперсии**
- Дисперсия в оптических стеклах обычно характеризуется значениями показателя преломления для трех стандартных длин волн.
-

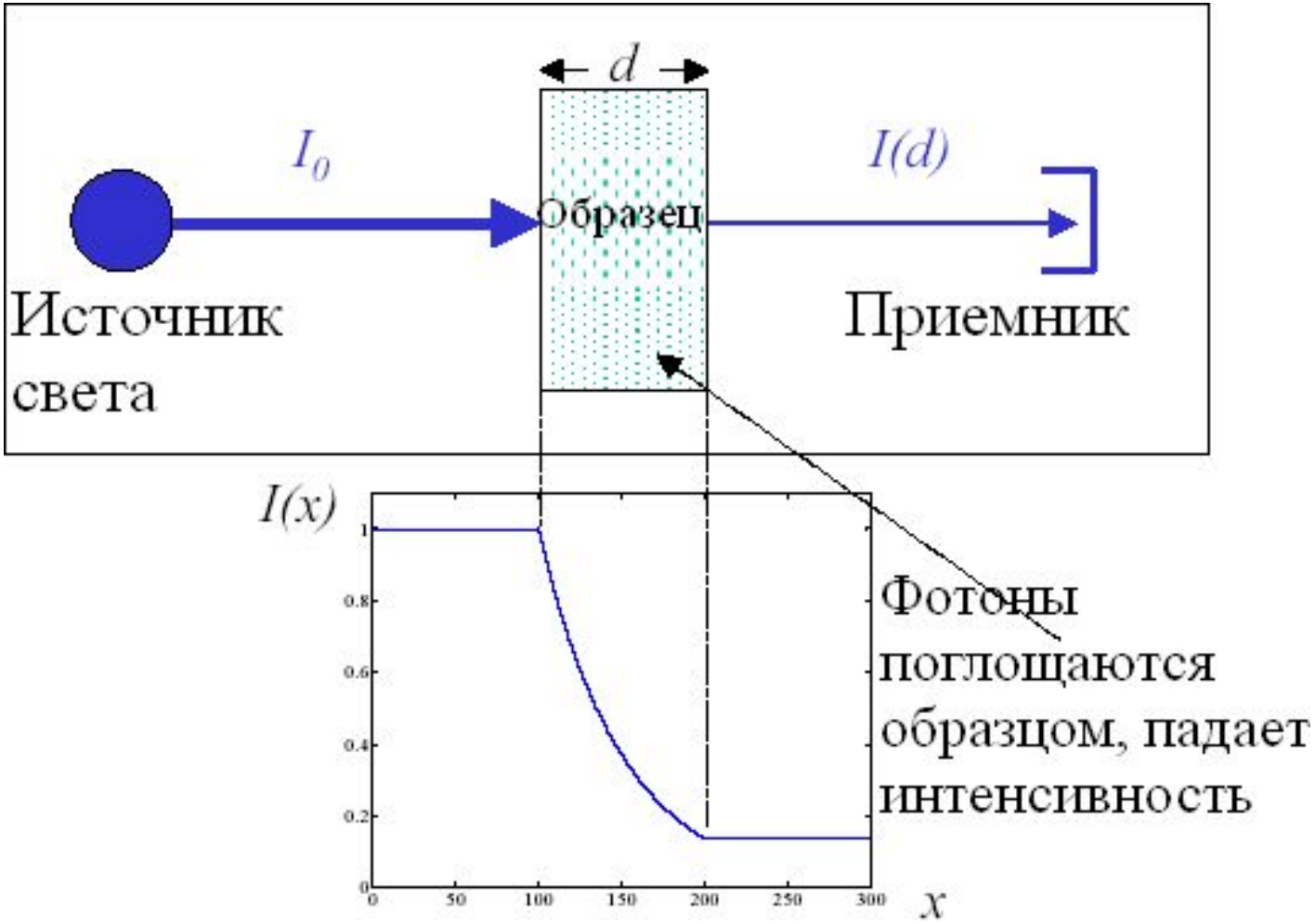
линия Фраунгофера	Цвет	Длина волны, нм	Прозрачное крон	Сверхплотное флинт
			показатель преломления	
F	голубой(водород)	486.1	1.5293	1.7378
D	желтый(натрий)	589.3	1.5230	1.7200
C	красный(водород)	656.3	1.5204	1.7130
$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$ = число Аббе			ν	
			59	29

- Малые значения ν соответствуют большой дисперсии.

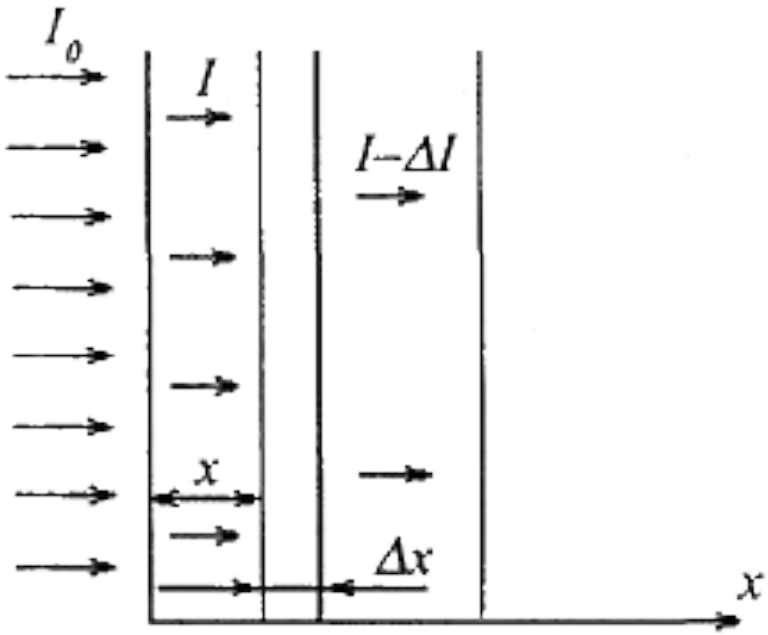
ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА

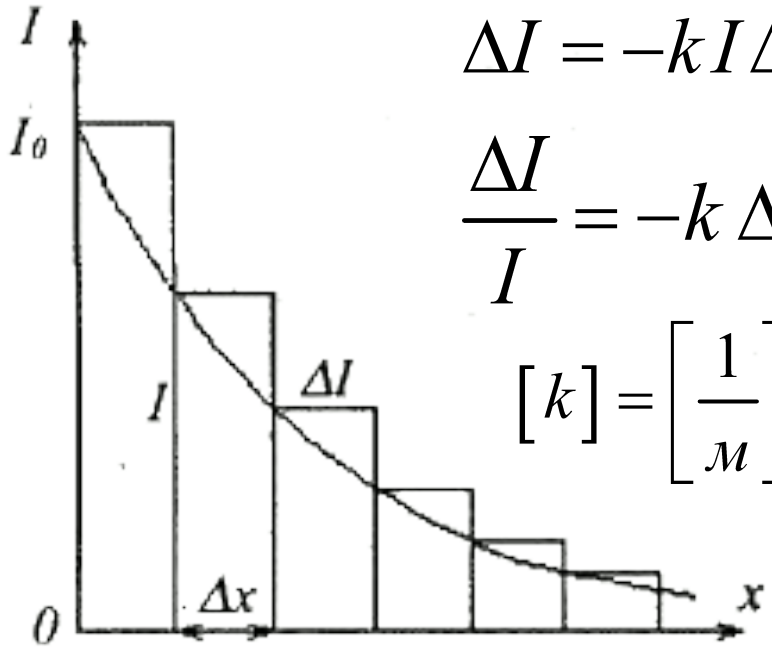
Когда световое излучение действует на вещество, состоящее из дискретных зарядов, они вынужденно колеблются с частотой действующего электрического поля. Таким образом, в данном случае, резонанс наблюдается вокруг естественных частот, посредством чего энергия передается от действующего поля системе, и амплитуда вибрации значительно увеличивается. Атомы или молекулы будут обычно терять свою энергию, сталкиваясь друг с другом, таким образом увеличивая кинетическую энергию других частиц, вовлеченных в столкновения. Следовательно, энергия, связанная с действующим полем, рассеивается на нагрев среды. **Этот процесс называется поглощением.**

ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА



ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА





$$\Delta I = -kI\Delta x$$

$$\frac{\Delta I}{I} = -k\Delta x$$

$$[k] = \left[\frac{1}{м}\right]$$

Пусть на толщине Δx поглощается некоторая доля интенсивности света. Соединяя на рисунке ординаты, соответствующие интенсивностям света, вышедшим из слоев Δx, получим график изменения интенсивности света в веществе. Естественно, что доля поглощения тем больше, чем больше толщина Δx.

ЗАКОН БУГЕРА-ЛАМБЕРТА-БЕРА

Закон Бугера — Ламберта — Бера - физический закон, определяющий ослабление параллельного монохроматического пучка света при распространении его в поглощающей среде. Соотношение между поглощением света в абсорбирующей среде и толщиной среды было впервые найдено в 1729 Бугером. Ламберт в 1760 получил математическое выражение для зависимости, известной как закон Ламберта-Бугера, которая описывает, как каждый следующий слой **d*x*** среды поглощает ту же часть **d*I*/*I*** интенсивности ***I*** для постоянной k_λ, известной как коэффициент поглощения:

$$\frac{dI}{I} = k_\lambda \cdot dx$$

ЗАКОН БУГЕРА-ЛАМБЕРТА-БЕРА

Интенсивность входящего пучка $\boldsymbol{I_0}$, следовательно, интенсивность потока $\boldsymbol{I}$ на расстоянии $\boldsymbol{d}$

$$\int_{I_o}^{I} \frac{dI}{I} = \int_{o}^{d} k_\lambda \cdot dx$$

$$\boxed{I = I_o \cdot e^{-k_\lambda \cdot d}}$$

k_λ - показатель поглощения, зависящий от свойств вещества и длины волны λ (частоты падающего света).

Интенсивность света уменьшается в геометрической прогрессии, если толщина слоя увеличивается в арифметической прогрессии. k_λ - величина, обратная расстоянию, на котором интенсивность света уменьшается в результате поглощения средой в е раз.

ЗАКОН БУГЕРА-ЛАМБЕРТА-БЕРА

На практике закон Бугера обычно представляют в виде показательной функции с основанием 10:

$$I_l = I_o \cdot 10^{-k'_\lambda d},$$

где $k_\lambda'=0{,}43\ k_\lambda$.

В 1852 Бер выяснил, что коэффициент поглощения состава линейно связан с его концентрацией ***c*** растворенной в неабсорбирующей среде.

$k_\lambda = \alpha_\lambda \cdot C$, или $k'_\lambda = \alpha'_\lambda \cdot C$

где α_λ - монохроматический коэффициент поглощения соответствующий концентрацию вещества. α'_λ - удельный коэффициент поглощения.

ЗАКОН БУГЕРА-ЛАМБЕРТА-БЕРА

Закон Бера справедлив только для растворов низких концентраций, в концентрированных растворах, он не соблюдается из-за влияния взаимодействий между близко расположенными молекулами абсорбирующего вещества.

Подставив $\mathbf{k_\lambda}$ в закон Ламберта-Бугера, получим закон Бугера-Ламберта-Бера:

$$I_l = I_o \cdot e^{-k_\lambda \cdot C \cdot d}$$

или

$$I_l = I_o \cdot 10^{-\alpha'_\lambda \cdot C \cdot d},$$

Соотношение $I_d/I_o = \tau$ называется коэффициентом пропускания.

ОПТИЧЕСКАЯ ПЛОТНОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ

$D = lg\ (1/\tau) = lg(I_o/I_d)$ - оптическая плотность или спектральная поглощательная способность вещества (раствора).

Тогда мы имеем: $D = \alpha_\lambda' \cdot C \cdot d$

В растворе, содержащем смесь ***n*** абсорбирующих компонент, полная спектральная поглощательная способность - сумма отдельных коэффициентов поглощения, умноженных на концентрацию ***C*** и расстояние ***d***:

$$D = D_1 + D_2 + \ldots + D_n = (\alpha_{\lambda\,1}' \cdot C_1 + \alpha_{\lambda\,2}' \cdot C_2 + \ldots + \alpha_{\lambda\,n}' \cdot C_n) \cdot d$$

Это уравнение справедливо только для низких концентраций растворов и лежит в основе метода колориметрии.

КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ КОЛОМЕТРИЯ

Фотометрический метод определения концентрации вещества в окрашенных растворах основан на измерении их оптической плотности. Такие измерения осуществляют двумя классами устройств: фотометрами или фотоколориметрами.

Приборы, используемые для сравнения силы света световых потоков (проходящих через стандартные и изучаемые растворы), называются ***фотометрами***. Они бывают:

- визуальными,
- объективными (фотографические, электрические). ***Фотоколори́метр*** — оптический прибор для измерения концентрации веществ в растворах.

КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ КОЛОМЕТРИЯ

- Измерения должны осуществляться в монохроматическом свете наиболее поглощаемого содержащимся в растворе конкретным исследуемым веществом участка спектра 315 нм - 980 нм. Другие компоненты раствора должны поглощать этот свет относительно слабо. Для этого фотоколориметр может быть снабжен набором соответствующих светофильтров.
- Принцип действия колориметра основан на серии измерений светового потока Φ_0 проходящего через растворитель или контрольный раствор, и потока Φ_1, проходящего через исследуемый раствор. В колориметре световые потоки Φ_0 и Φ_1 преобразуются в электрические сигналы U_0 и U_1, регистрируемые гальванометром как коэффициент передачи (τ), оптическая плотность (D) или концентрация.

КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ КОЛОМЕТРИЯ

- Коэффициент пропускания изучаемого раствора

$$\tau = \frac{U_s}{U_o} \cdot 100\%$$

- Оптическая плотность:

$$D = -\log \frac{U_s}{U_o}$$

$$D = a + b \cdot C$$

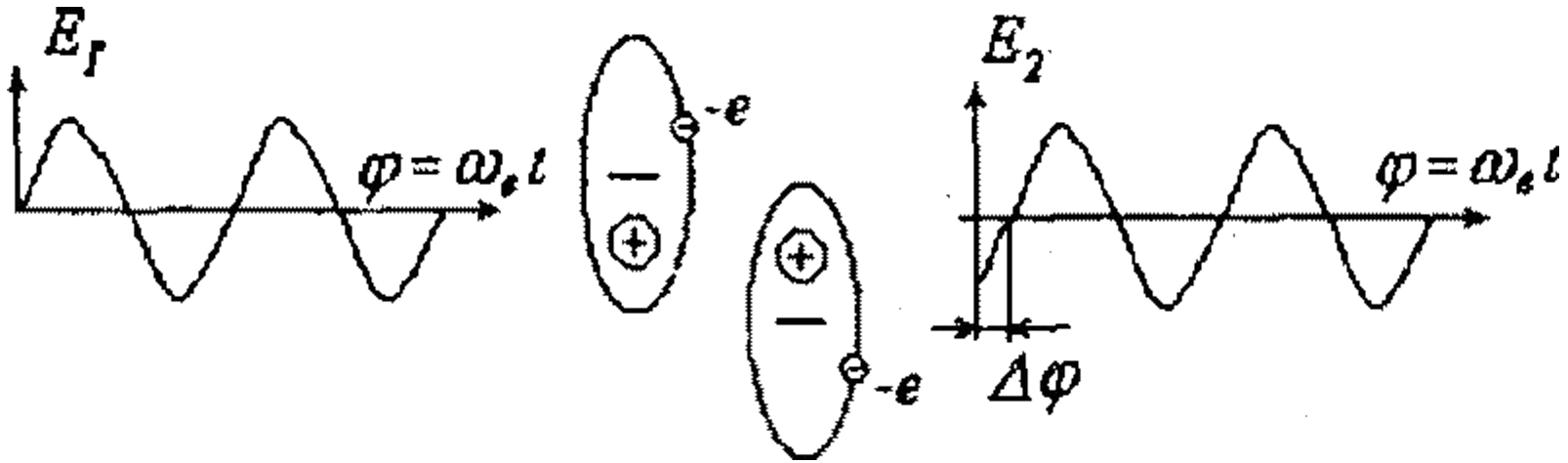
Концентрация раствора выражается как:

$$C = (D - a) / b,$$

где *a* и *b* – константы, определяемые по градуировочной характеристике.

РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ

Резонансное поглощение происходит при частотах, близких к собственным, энергия передается от действующего поля атомам вещества, и амплитуда их колебаний значительно возрастает. Заряженные частицы среды приводятся в колебательное движение электрическим полем действующей волны и повторно испускают свет той же частоты как у первичной волны.



РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ

При падении светового луча на вещество, энергия электромагнитных колебаний расходуется на возбуждение *вынужденных* колебаний электронной орбиты атомов

$$E_1 = E_m \sin \omega_в t$$

где E_1 и E_m - текущая и максимальная напряженности электрического поля в электромагнитной волне, ω– циклическая частота вынужденных колебаний.

$$E_2 = E_m \sin(\omega_в t - \Delta\varphi)$$

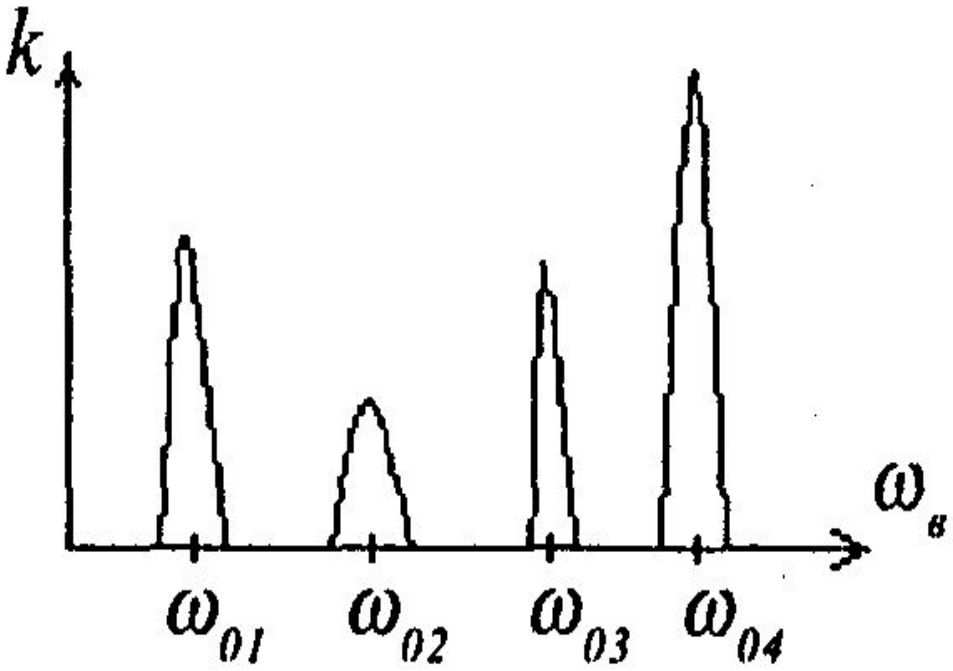
где Δφ – отставание фаза вынужденных колебаний электронных орбит относительно колебаний вынуждающей силы $F_c = eE_1$.

РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ

1. Электромагнитная волна, испускаемая переменным диполем, имеет частоту вынужденных колебаний, равную частоте вынуждающей силы. Изменений частоты света при переходе из одной среды в другую не происходит.
2. Отставание по фазе $\Delta\varphi$ определяет задержку фазовой скорости света в среде относительно вакуума.
3. Если частота вынужденных колебаний совпадает с собственной частотой колебаний электронной орбиты атома, это сопровождается резонансом с резким увеличением поглощения энергии волны. Следовательно, зависимость коэффициента поглощения света k от его частоты носит линейный характер.

РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ

Величины ω_{0i} – собственные частоты колебаний электронных орбит атомов вещества. Следующая характеристика называется **спектром**



на
реакции,
ектронов и т.д.

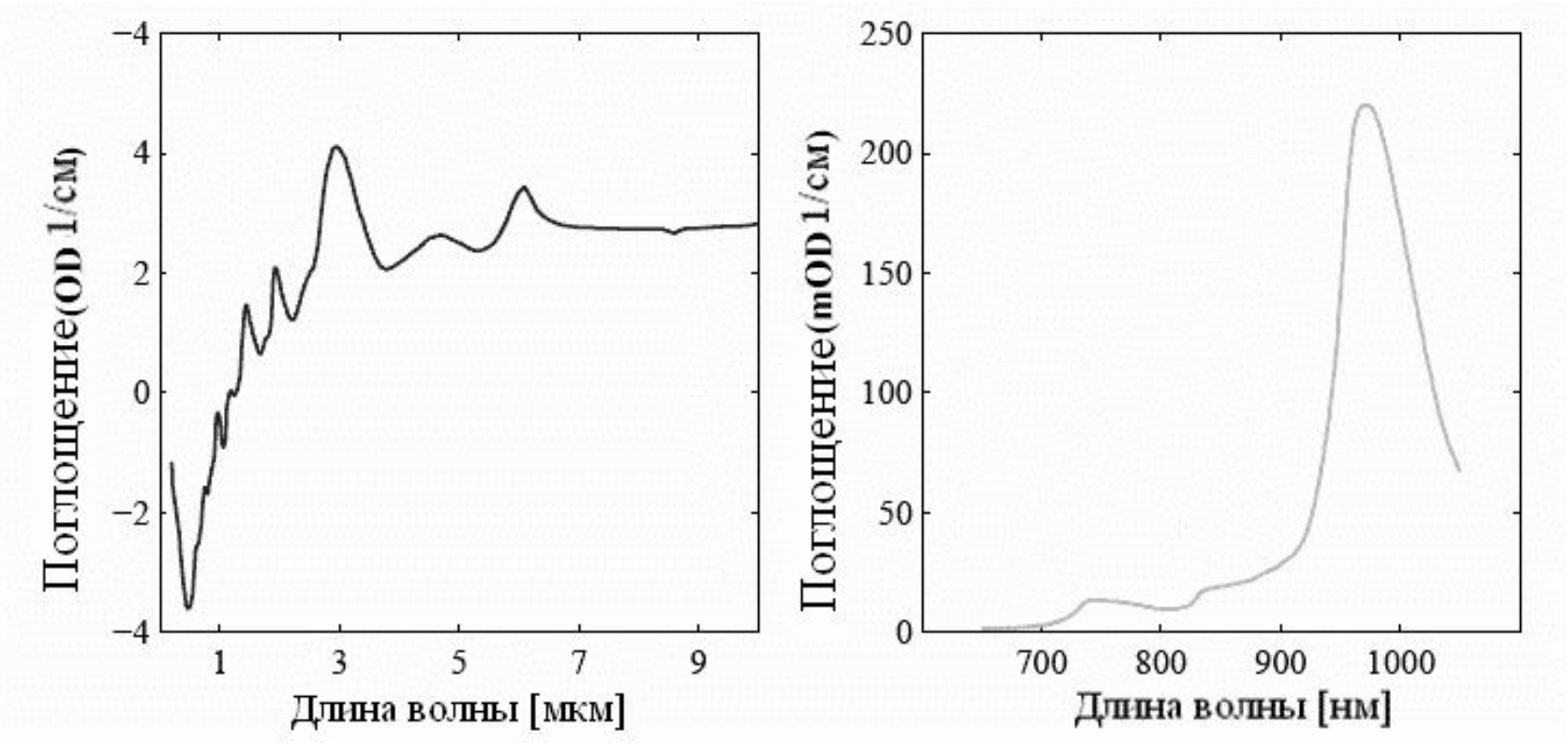
ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА БИОЛОГИЧЕСКИМИ ТКАНЯМИ

- Есть много составляющих биологических тканей, поглощающих световое излучение, имеющих общее название хромофоры тканей, каждого из них имеет собственный уникальный спектр.
- Полный коэффициент поглощения смеси составов равен сумме их коэффициентов поглощения, с учетом их относительных концентраций. Поэтому, рассматривая ткань как гомогенную смесь составов, полное поглощение света в ткани для данной длины волны зависит от типа и концентрации имеющихся хромофоров.

СПЕКТР ПОГЛОЩЕНИЯ ВОДЫ

- Вода - основное химическое вещество в человеческом теле, составляет 60 - 80% массы тела. Содержание воды меняется в зависимости от типа тканей и определяется возрастным и половым признаком. Например, у новорожденного мозг содержит до 90% массы воды, тогда как содержание воды во скелетной мышце взрослого составляет приблизительно 74%. Из-за ее высокой концентрации в большей части биологических тканей, вода является одним из самых важных хромофоров при измерениях спектроскопии тканей.
- Спектр поглощения воды показывают в диапазоне длин волн 200-10 000 нм и в увеличенном масштабе от 650 до 1050 нм. Между 200 и 900 нм существует область относительно низкого поглощения. Выше 900 нм коэффициент поглощения увеличивается довольно быстро до пика приблизительно в 970 нм.

СПЕКТР ПОГЛОЩЕНИЯ ВОДЫ



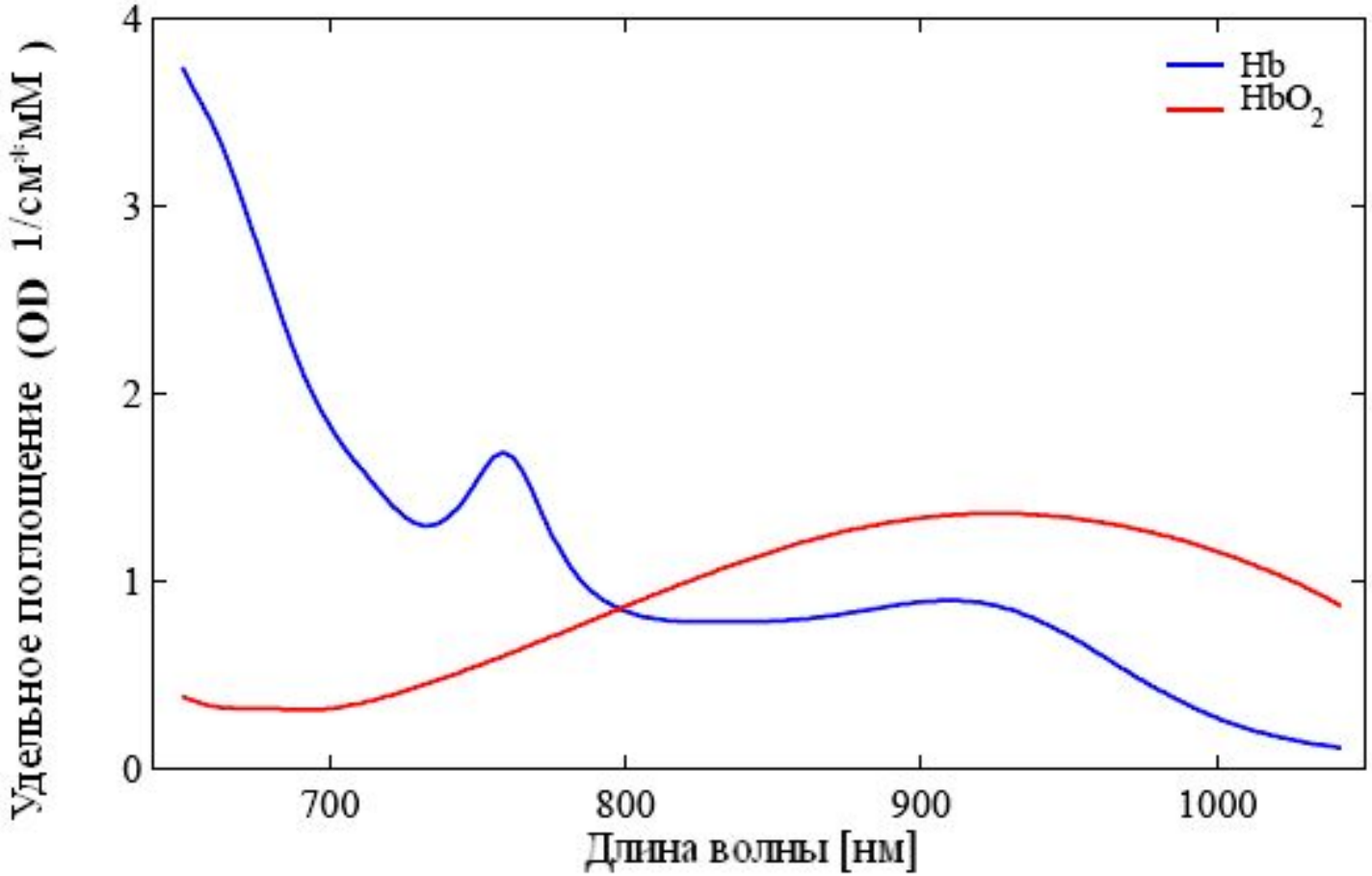
ГЕМОГЛОБИН

- В окне прозрачности воды доминирует поглощение света близкого к инфракрасному гемоглобином в его различных формах.
- Гемоглобин содержится в эритроцитах и составляет приблизительно 40-45% цельной крови, обеспечивает перенос кровью кислорода от легких к тканям и транспорт углекислоты от тканей к легким. Другой функцией гемоглобина является поддержание кислотно-щелочного равновесия в организме.
- Молекула гемоглобина состоит из 1 молекулы простого белка глобина – белка типа альбуминов (содержит остатки аминокислот изолейцина и цистина) и 4 молекул железосодержащей небелковой группы – гема. Глобин придает гему способность связывать кислород. Гем обеспечивает устойчивость глобина к действию кислот, нагреванию, расщеплению ферментами и обусловливает его кристаллизацию. Молекула гемоглобина может нести четыре молекулы кислорода.

ГЕМОГЛОБИН

- В крови здоровых мужчин содержится от 13 до 16% гемоглобина (145 г/л). В крови здоровых женщин содержится в среднем от 12 до 14% гемоглобина (130 г/л).
- Гемоглобин синтезируется клетками костного мозга. При разрушении эритроцитов, после отщепления гема гемоглобин превращается в желчный пигмент биллирубин, который с желчью поступает в кишечник и после превращений выводится с калом.
- В норме гемоглобин содержится в виде 2-х физиологических соединений. Гемоглобин, присоединивший кислород, превращается в оксигемоглобин — HbO_2. Оксигемоглобин, отдавший кислород, называют восстановленным (деоксигемоглобином) — Hb.
- Удельные спектры поглощения окси- и деоксигемоглобина, показанные на слайде, значительно отличаются, особенно в красной области видимого и инфракрасного света.

ГЕМОГЛОБИН


Hb
HbO2
Удельное поглощение (OD 1/см*мМ)
Длина волны [нм]
0
1
2
3
4
700
800
900
1000

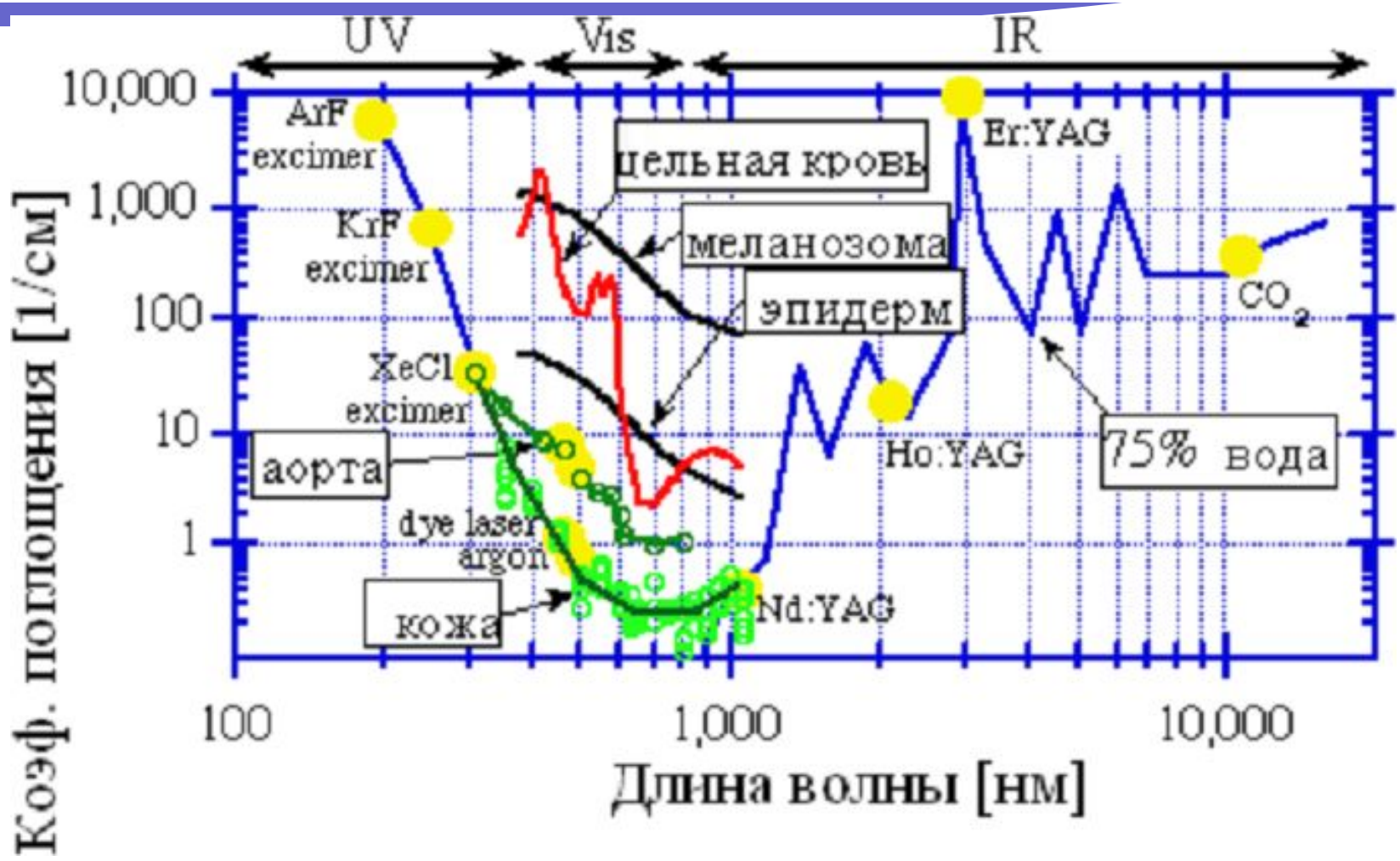
ГЕМОГЛОБИН

- Это различие в поглощении объясняет видимые цветовые различия между венозной и артериальной кровью. Артериальная кровь, которая у взрослых обычно на 98% насыщена кислородом, ярко-красная, тогда как венозная кровь, у которой насыщение приблизительно 75%, выглядит темно-красной или фиолетовой.
- Хотя спектральные поглощательные способности для инфракрасного света имеют меньшие амплитуды чем в видимом диапазоне, спектры достаточно отличаются, чтобы различить две формы гемоглобина.

МЕЛАНИН И МИОГЛОБИН

- Важные хромофоры тканей: меланин и миоглобин.
- У меланина, пигмента, содержащегося в эпидермальном слое кожи человека, большой коэффициент рассеивания в УФ-диапазоне, он защищает кожу от разрушительной солнечной радиации; и значительный коэффициент поглощения красного УФ. Не зависящий от кислородонасыщения ткани, вклад меланина в полное ослабление света значителен.
- Миоглобин, содержащийся в клетках скелетных мышц, является красным пигментом, связывающим кислород, подобно гемоглобину в эритроцитах и со схожим спектром поглощения красного УФ.
- Миоглобин намного менее чувствителен к кислородонасыщению ткани, чем гемоглобин и кислородный транспорт должен значительно уменьшиться, прежде чем изменится спектр поглощения миоглобина

СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ



РАССЕЯНИЕ СВЕТА

Рассеяние света происходит при нерезонансных частотах, т.е. интенсивности рассеивания относительно невелики по сравнению с амплитудами вынужденных колебаний частиц при собственном резонансе. В большинстве жидкостей и твердых тел, однако, межмолекулярные взаимодействия расширяют частоты поглощения, так что рассеяние и поглощение света происходят для всех длин волн

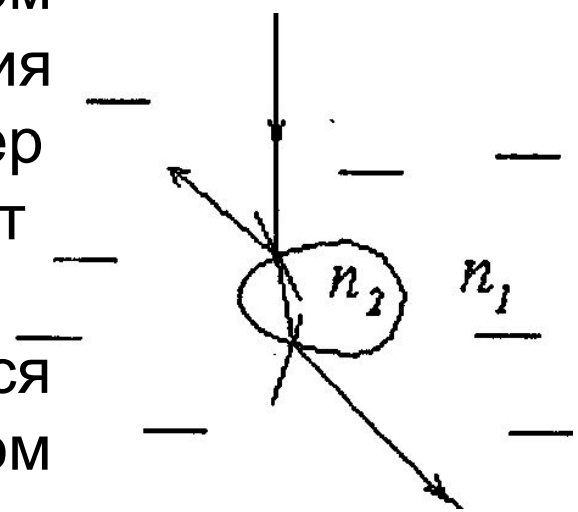
РАССЕЯНИЕ СВЕТА

- Если в прозрачной среде с показателем преломления n_1 имеются неоднородности (частицы) с иным показателем преломления n_2, чем основная среда, то световой луч отклоняется от своего первоначального направления и делится на множество лучей. Наблюдается рассеяние света.
- В зависимости от соотношения между размерами частиц и длиной волны падающего света различают три области рассеяния.

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ РАССЕЯНИЕ

Геометрическое рассеяние – это рассеяние, обусловленное в основном законами отражения и преломления света. Оно наблюдается, если размер частиц **Δ** значительно превышает длину волны света *λ* (**Δ** >> *λ*).

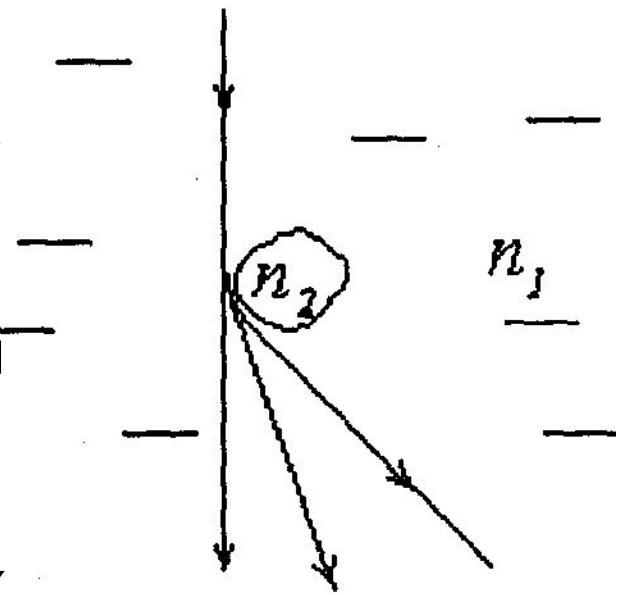
Например, в растворе находятся крупные коллоидные частицы. В этом случае интенсивность рассеянного света изменяется обратно пропорционально квадрату длины волны.



$$I_{scat} \sim \frac{1}{\lambda^2}$$

ДИФРАКЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ

Если размеры частиц соизмеримы с длиной полны света Δ ~ λ то основным явлением, вызывающим рассеяние, является дифракция света на частицах примеси. Это так называемое дифракционное рассеяние. При этом происходит как изменение направления светового луча, так и деление его интенсивности по различным порядкам дифракционных максимумов



РАССЕЯНИЕ РЕЛЕЯ

Если частицы значительно меньше длины волны света, то есть ($\Delta << \lambda$), интенсивность рассеянного света подчиняется закону Рэлея. В этом случае рассеяние связано в основном с взаимодействием квантов света с атомами и молекулами вещества. Интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна четвертой степени длины волны.

$$I_{scat} \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

РАССЕЯНИЕ РЕЛЕЯ

В случае однократного рассеяния, следовательно, существует новое экспоненциальное соотношение для интенсивности рассеивающегося пучка света *I*, в зависимости от исходной интенсивности I_0, прошедшего расстояние *d* в поглощающей среде при однократном рассеянии

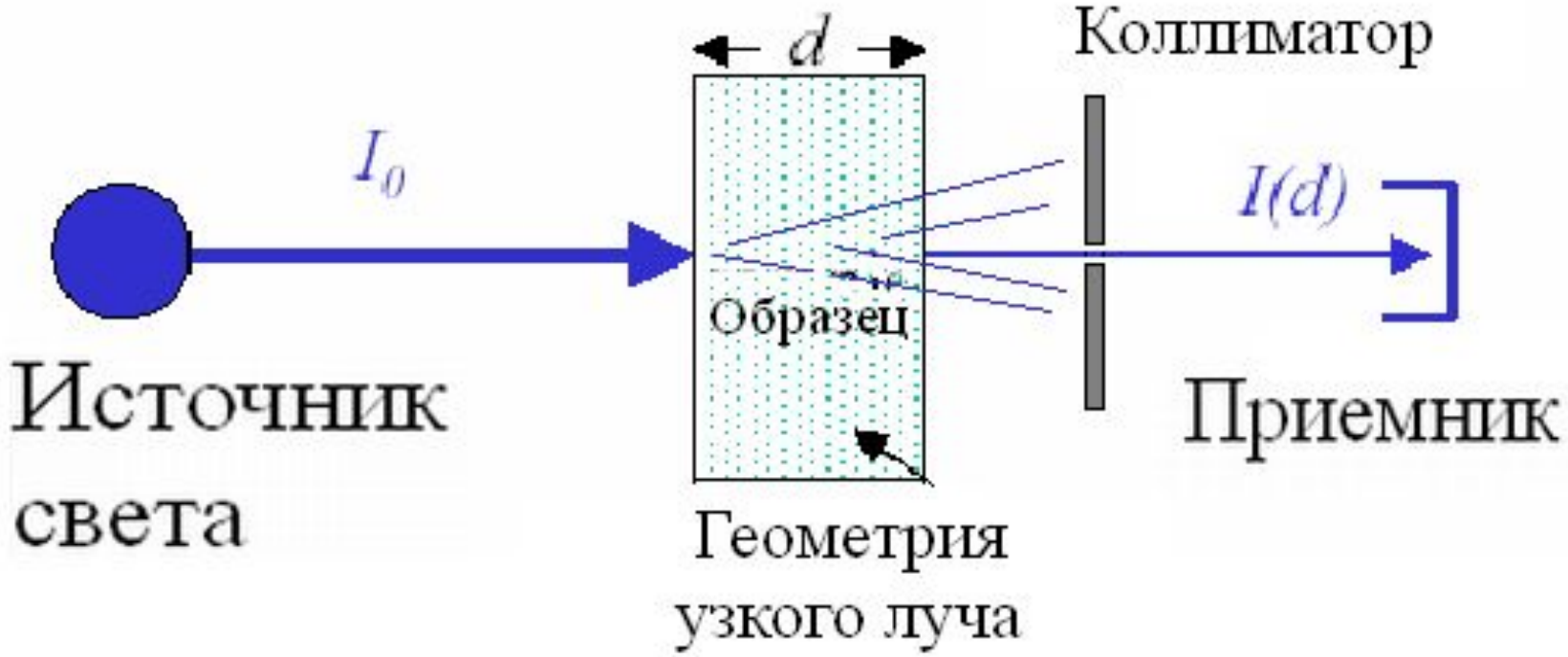
$$I = I_o \cdot e^{-k_t \cdot d}$$

где k_t - полный показатель ослабления, найденный как

$$k_t = k_a + k_s$$

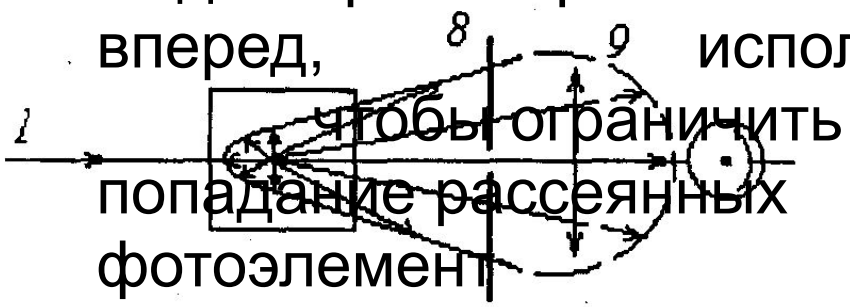
and k_s - показатель рассеяния.

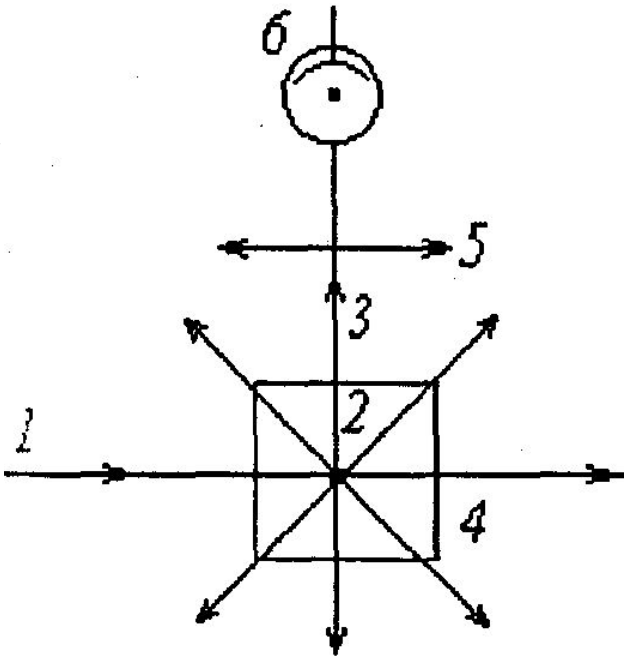
РАССЕЯНИЕ РЕЛЕЯ



ТУРБИДИМЕТРИЯ

- Нефелометрия и турбидиметрия – это методы определения концентрации частиц в коллоидном или суспендированном, содержащем дисперсные непрозрачные частицы, делающие среду мутной.
- Метод измерения концентрации суспензии в проходящем свете называется турбидиметрией. Главная задача - выделить лучи, не взаимодействовавшие с частицами раствора. Индикатриса рассеяния 9 сильно вытянута вперед, используется диафрагма 8, чтобы ограничить попадание рассеянных лучей на фотоэлемент



НЕФЕЛОМЕТРИЯ

- В нефелометрии проводят измерение интенсивности света 3, рассеянного в кювете с исследуемым раствором 4, перпендикулярно падающему лучу 1. Рассеяние идет на частицах 2 во все стороны, поэтому для регистрации фотоэлементом 6 используется лишь незначительная часть рассеянного света, который собирается линзой 5. Это ограничивает чувствительность метода.