

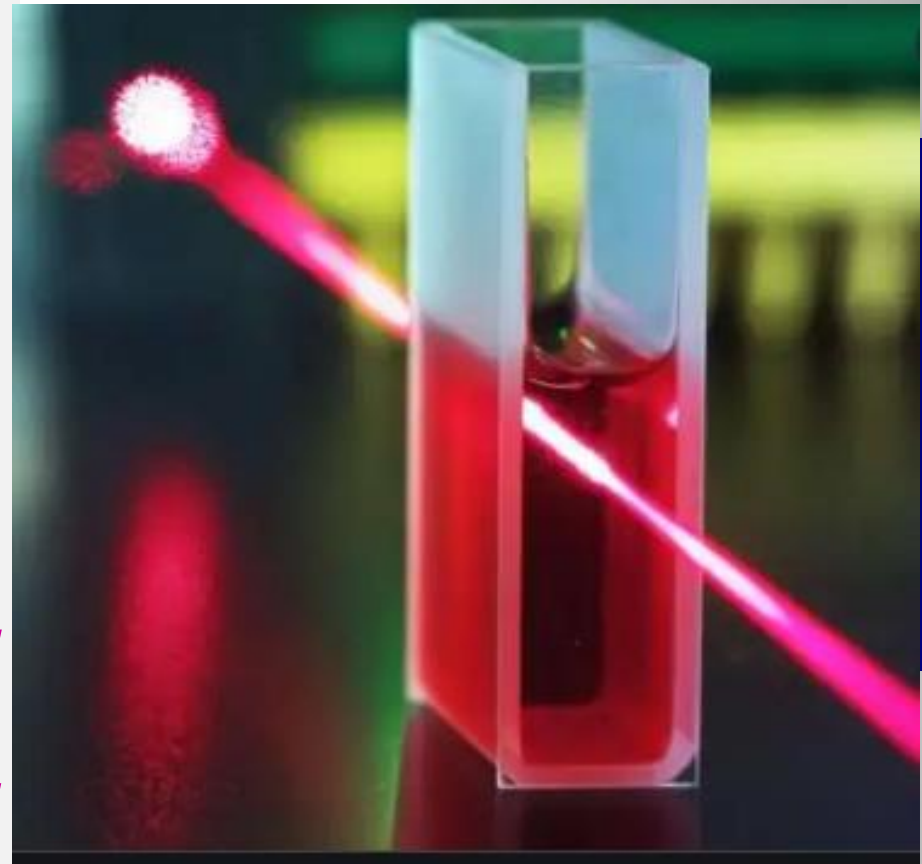
Министерство здравоохранения Республики Беларусь
УО «Гомельский государственный медицинский университет»
(кафедра медицинской и биологической физики)

**Поглощение света и его законы.
Фотоколориметрия и
спектрофотометрия.**

Петрова Е.С., к.ф-м.н, доцент
кафедра медицинской и биологической физики

Petrova E.S., PhD
Department of Medical and Biological Physics

- ❖ Поглощение света и его законы.
- ❖ Фотокolorиметрия и спектрофотометрия.
- ❖ Оптические атомные спектры
- ❖ Постулаты Бора
- ❖ Обобщенная формула Бальмера
- ❖ *Рассеяние света. Закон Релея. Нефелометрия.*
- ❖ *Эмиссионный и абсорбционный спектральный анализ, его медицинское применение.*



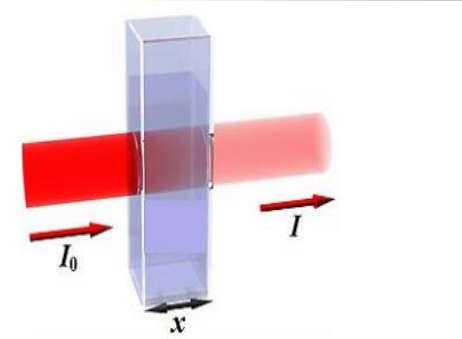
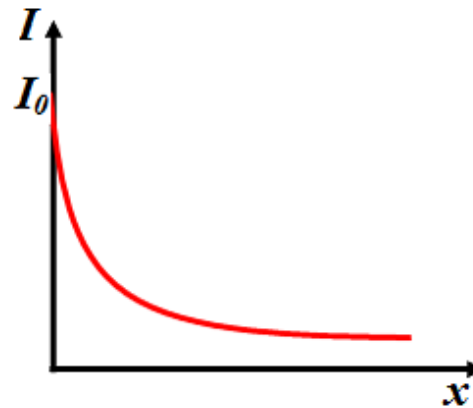
Поглощение света. Закон Бугера

- **Поглощение света** – явление уменьшения энергии световой волны при ее распространении в веществе вследствие преобразования энергии волны в другие виды энергии.

Интенсивность света при прохождении однородного вещества **уменьшается по экспоненциальному закону**

– **ЗАКОН БУГЕРА.**

$$I = I_0 e^{-kx}$$



Величина показателя поглощения вещества зависит от природы вещества и длины волны падающего излучения $k(\lambda)$

Закон **Бера** выполняется для растворов **небольших концентраций**

$$k = \alpha C$$

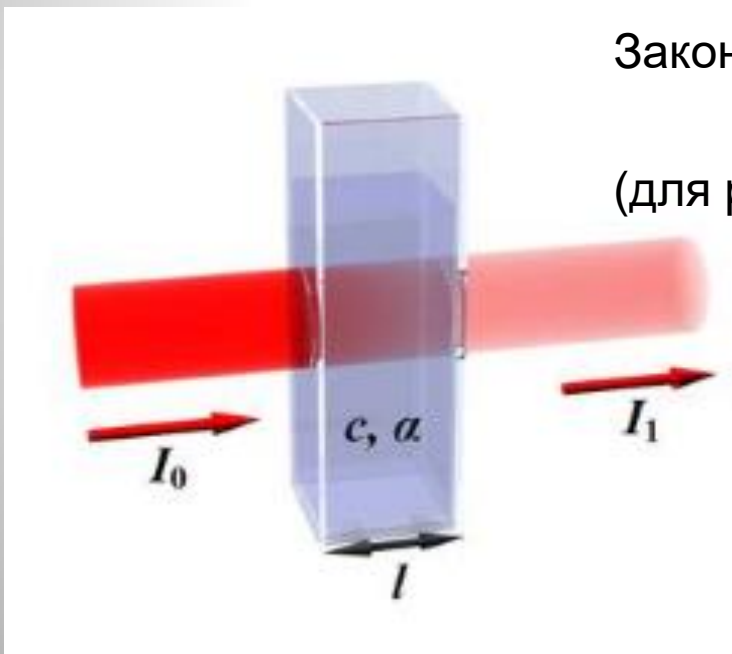
α - удельный показатель поглощения,
зависящий от длины волны электромагнитного излучения

$$k(\lambda)$$

Закон **Бугера- Ламберта-Бера**

(для растворов с концентрацией **C**)

$$I = I_0 e^{-\alpha C x}$$



Бугер Пьер (1698-1758) – франц. ученый, один из основателей **фотометрии**.



Установил (1729) закон ослабления света (**закон Бугера – Ламберта - Бера**).

Закон определяет **ослабление света с начальной интенсивностью J_0 при его прохождении через поглощающую среду с показателем поглощения k и толщиной l**

Экспериментально открыт П. Бугером (1729), теоретически выведен И.Г. Ламбертом (1760), для растворов исследован А. Бером (1852).

коэффициент пропускания ***T*** — отношение интенсивности света, прошедшего образец, к интенсивности падающего на него света:

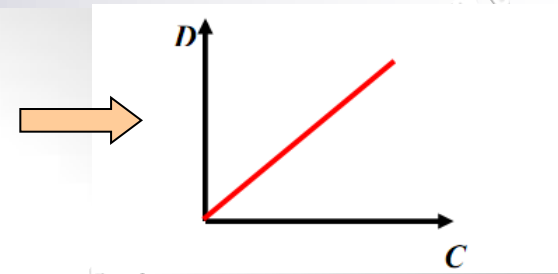
$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{I_0 \cdot e^{-\alpha Cx}}{I_0} = e^{-\alpha Cx}$$

оптическую плотность ***D*** образца, равную десятичному логарифму коэффициента пропускания, взятому со знаком «—»:

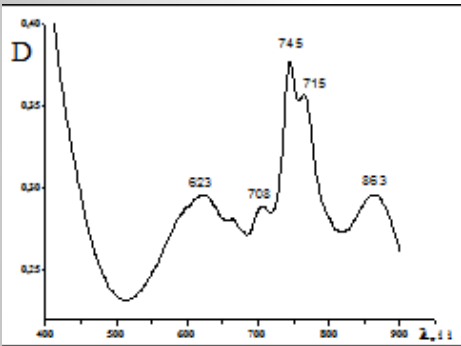
$$D = \lg \frac{I}{I_0} = \lg \frac{1}{T} = -\lg T = k_1 x = \alpha_1 Cx$$

$$k_1 = k \lg e = 0.43k, \quad \alpha_1 = \alpha \lg e = 0.43\alpha.$$

В основе концентрационной колориметрии лежит **линейная зависимость оптической плотности раствора от его концентрации $D(C)$**

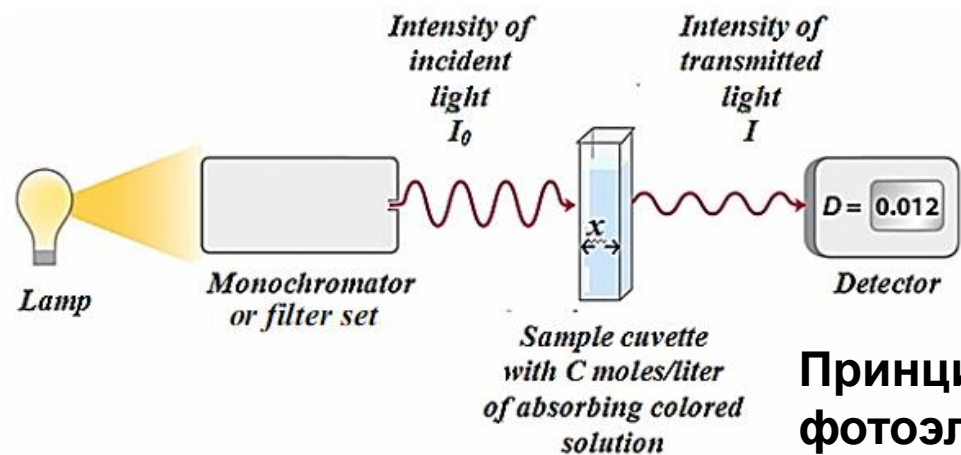


Фотоэлектроколориметр (прибор для измерения оптической плотности) позволяет измерить D в пределах 0,001-2,0 (отн.ед.)



Спектр поглощения
 $D(\lambda) \sim k(\lambda) \sim \alpha(\lambda)$
уникален для каждого вещества
(абсорбционный анализ)

Закон Бугера — Ламберта — Бера —
лежит в основе **концентрационной колориметрии** —
фотометрического метода определения концентрации поглощающего вещества в окрашенных растворах.



Принципиальная схема фотоэлектроколориметра

ДИСПЕРСИЯ И ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА

- *Дисперсия света* – это явления, обусловленные *зависимостью показателя преломления вещества от длины волны (или частоты)*

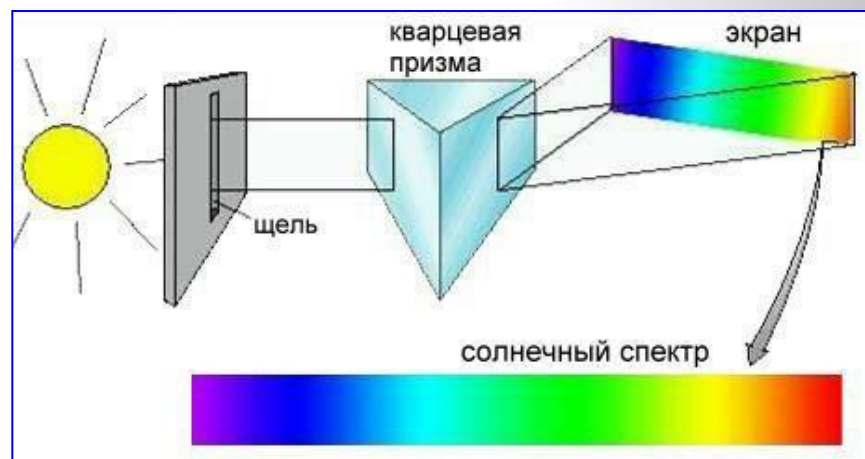
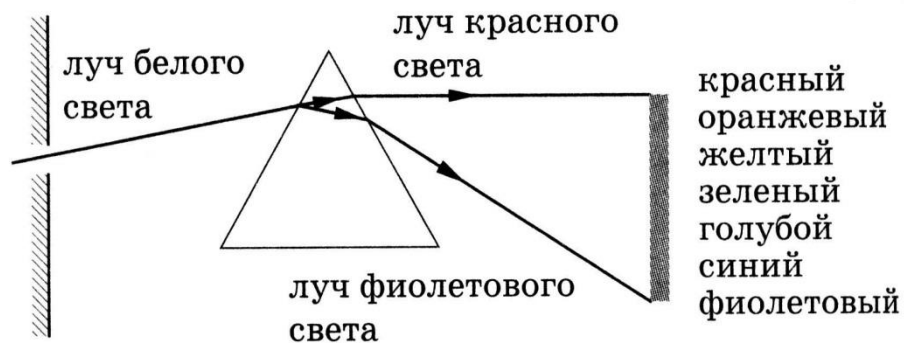
$$n = f(\lambda)$$

Производную $dn/d\lambda$

называют *дисперсией вещества.*

Призма как спектральный прибор

- Пучок белого света за призмой разлагается в спектр (призматический спектр).

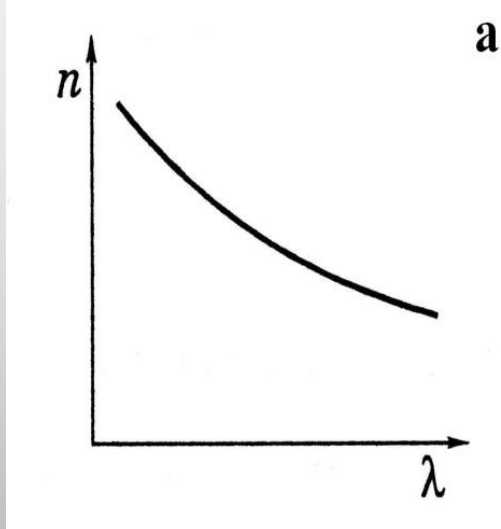


Нормальная и аномальная дисперсия

- Интервал длин волн, в котором

$$dn / d\lambda < 0$$

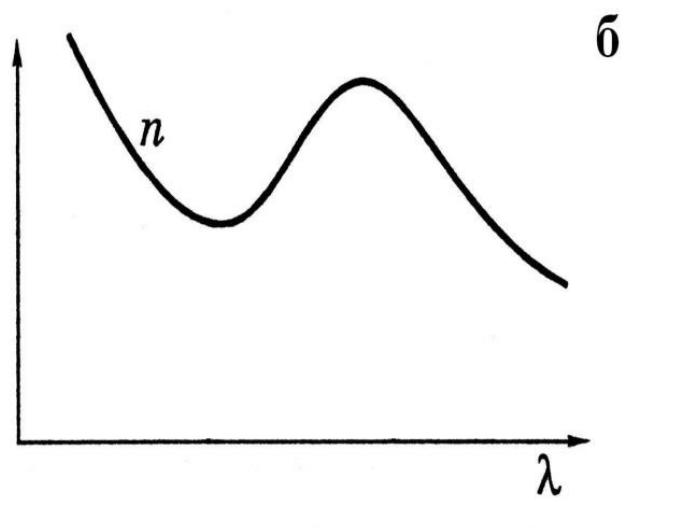
соответствует *нормальной дисперсии*.



- Интервалы длин волн, где дисперсия вещества

$$dn / d\lambda > 0$$

Соответствуют *аномальной дисперсии*



❖ **Оптические атомные спектры**

❖ **Постулаты Бора**

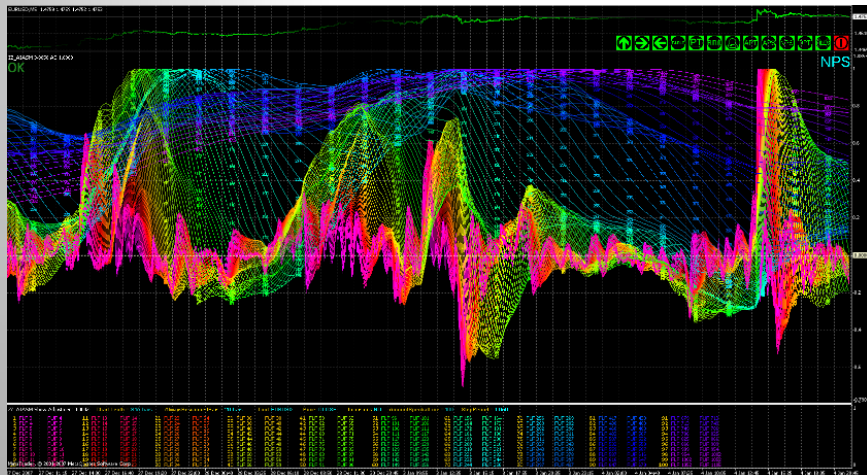
❖ **Обобщенная формула Бальмера**

❖ *Эмиссионный и абсорбционный спектральный анализ, его медицинское применение.*

❖ *Рассеяние света. Нефелометрия.*

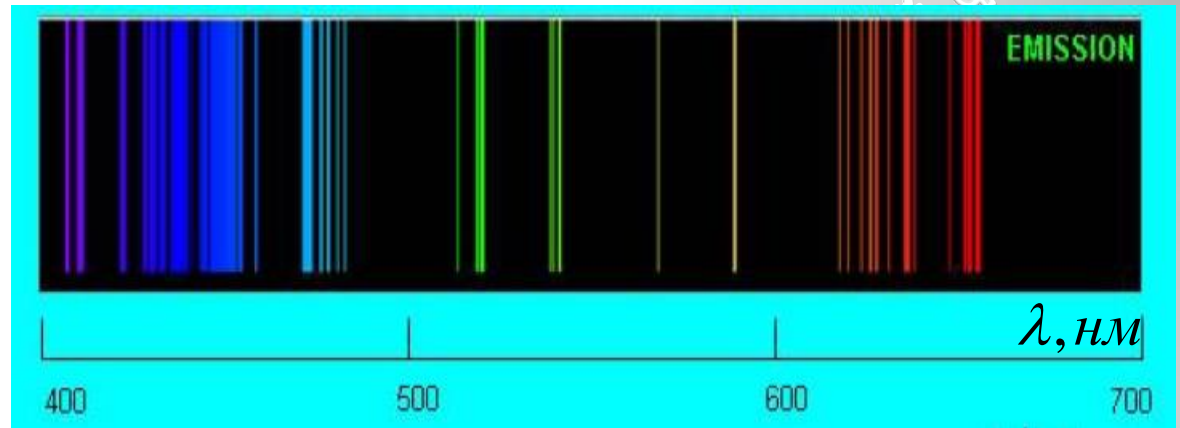
Атомные спектры

- **Атомными спектрами** называют как спектры испускания так и спектры поглощения, которые *возникают при квантовых переходах между энергетическими уровнями свободных или слабовзаимодействующих атомов.*



Спектры каждого вещества строго индивидуальны, что позволяет по спектрам излучения или поглощения **определить вид вещества, его состав и процентное содержание компонентов смеси**, т.е. провести **качественный и количественный спектральный анализ.**

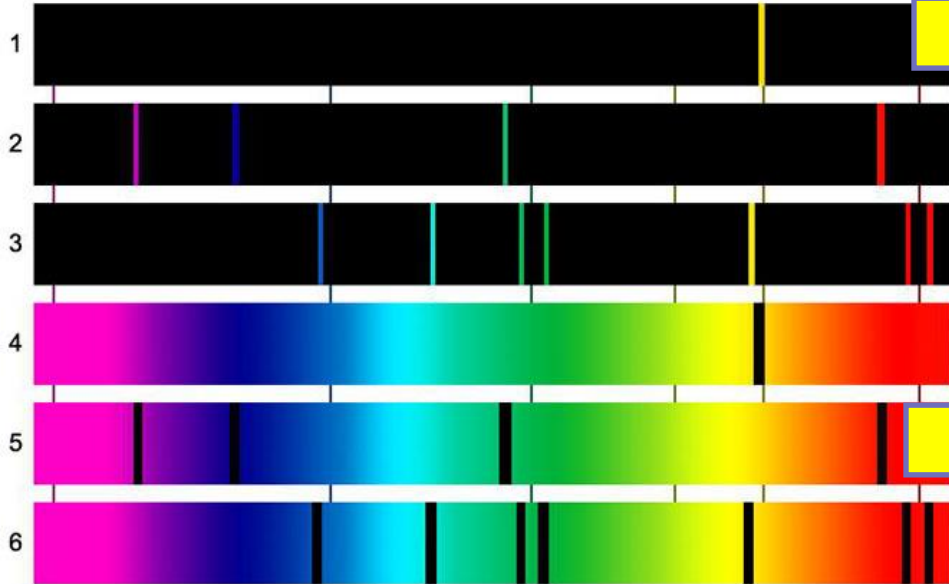
Спектры излучения
– важнейшие
характеристики
оптических свойств
атомов – **состоят из**
отдельных
спектральных
линий или групп
близко
расположенных
линий; их называют
линейчатыми
спектрами.



Зависимость интенсивности
электромагнитного излучения вещества
от частоты или длины волны называют
спектром испускания (излучения)

$$I(\lambda)$$

$$I(\nu)$$

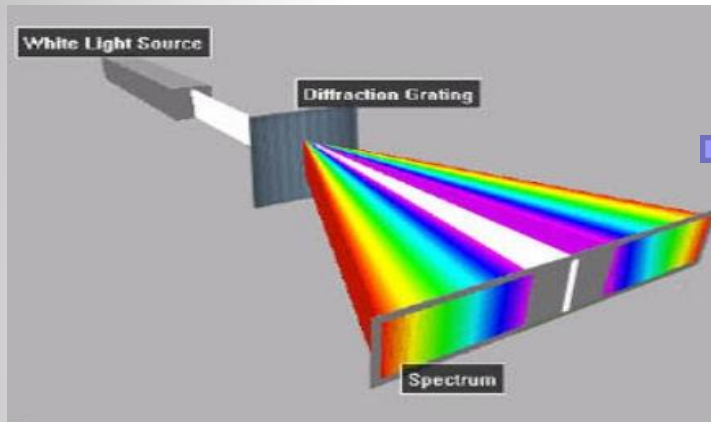


Спектры испускания: 1 - натрия; 2 - водорода; 3 - гелия.
Спектры поглощения: 4 - натрия; 5 - водорода; 6 - гелия.

Спектры излучения

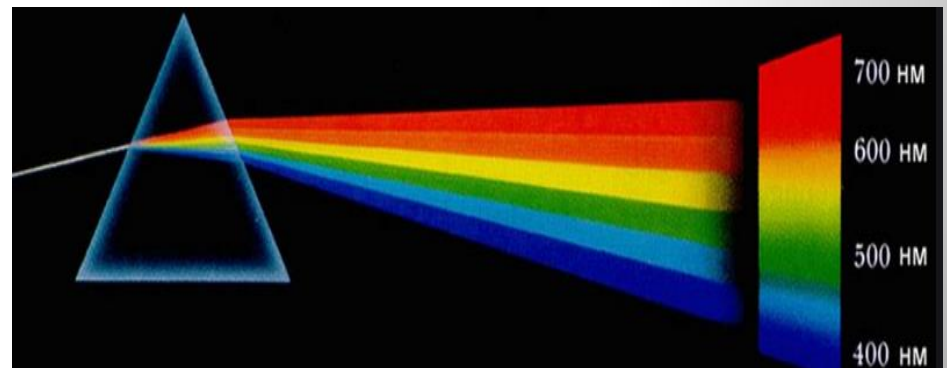
Спектр поглощения вещества представляет собой зависимость коэффициента поглощения вещества $k(\lambda)$ или оптической плотности вещества $D(\lambda)$ от длины волны или частоты падающего излучения .

Призменные и дифракционные спектральные приборы

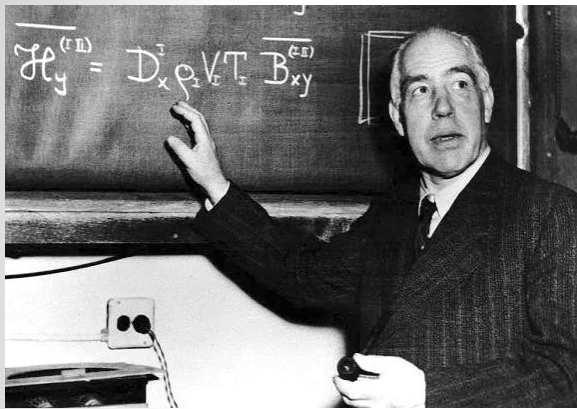


Дифракционная решетка разлагает электромагнитное излучение в **спектр** благодаря дифракции света (зависимости угла дифракции света от длины волны)

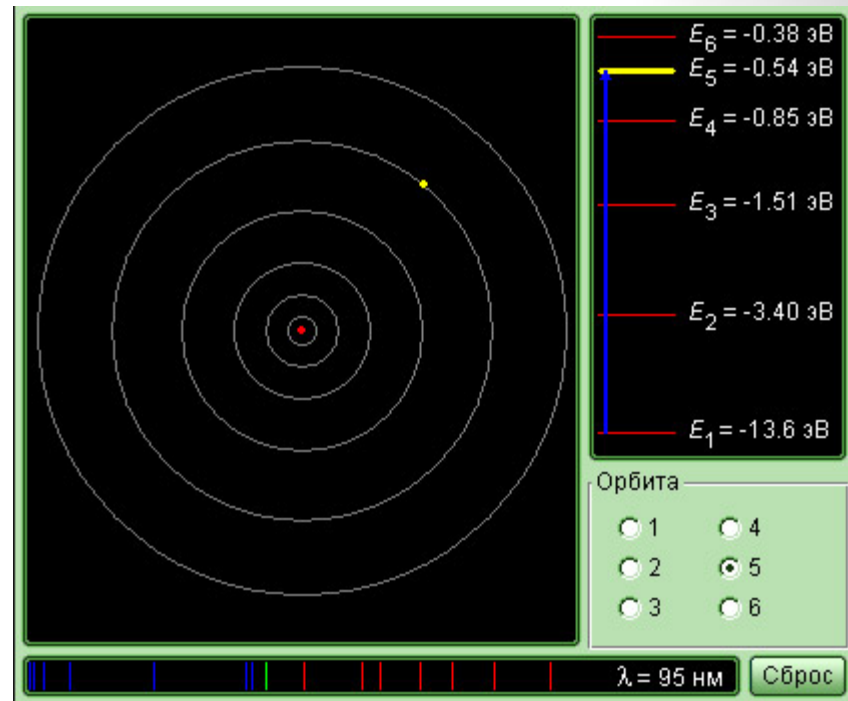
Благодаря **явлению дисперсии $n(\lambda)$ призма** разлагает падающее на нее излучение в **спектр**



Для объяснения закономерностей в линейчатых спектрах **Бор** объединил *планетарную модель атома Резерфорда* с *гипотезой Планка о квантовой природе света*.



Нильс Бор (1885-1962) объяснил механизм спектров испускания и поглощения, основываясь на **планетарной модели атома Резерфорда** и **установленных Планком квантовых свойств света**



Постулаты Бора

❖ 1 Постулат Бора (постулат стационарных состояний)

Внутренняя энергия атома дискретна, то есть может принимать только определённые **дозволенные значения или уровни**, кратные характерным для данного атома количествам, или квантам энергии.

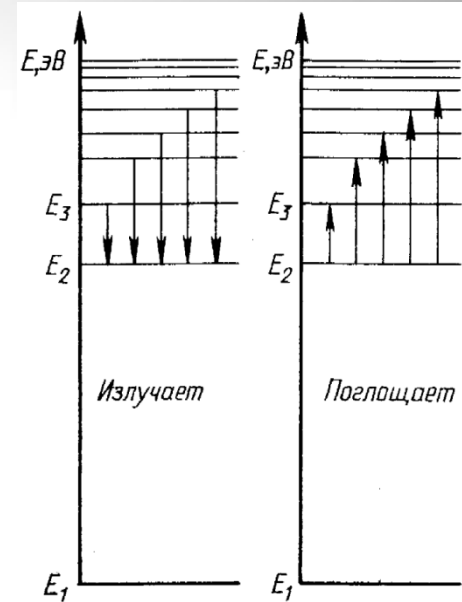
Состояния атома, соответствующие этим уровням энергии, являются **стационарными**: **в таком состоянии атом не излучает электромагнитных волн**, несмотря на происходящее в нём движение электронов.

Момент импульса электрона принимает квантованные значения:

2 Постулат Бора (правило частот)

Испускание (или поглощение) электромагнитного излучения происходит при **переходе атома из одного стационарного состояния в другое**.

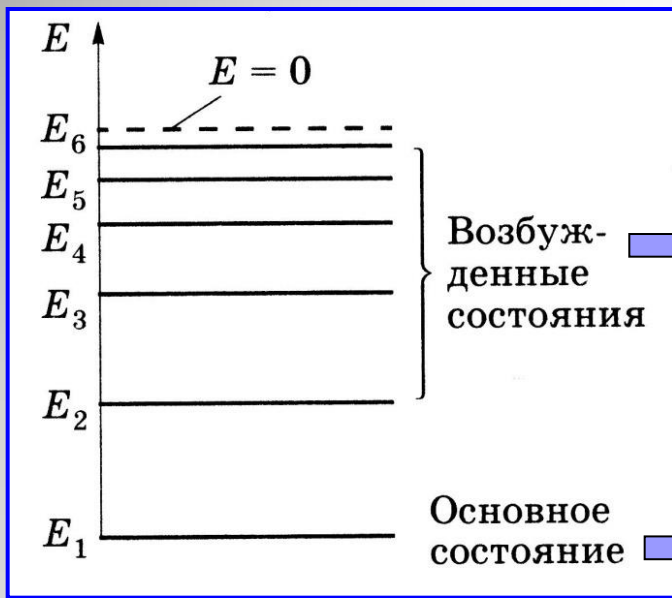
При этом **испускается (или поглощается)** фотон монохроматического излучения с энергией, равной **разности энергетических уровней E_m и E_n** , соответствующих этим состояниям:



$$m_e v_e r_n = n \hbar$$

$$h\nu = E_m - E_n,$$

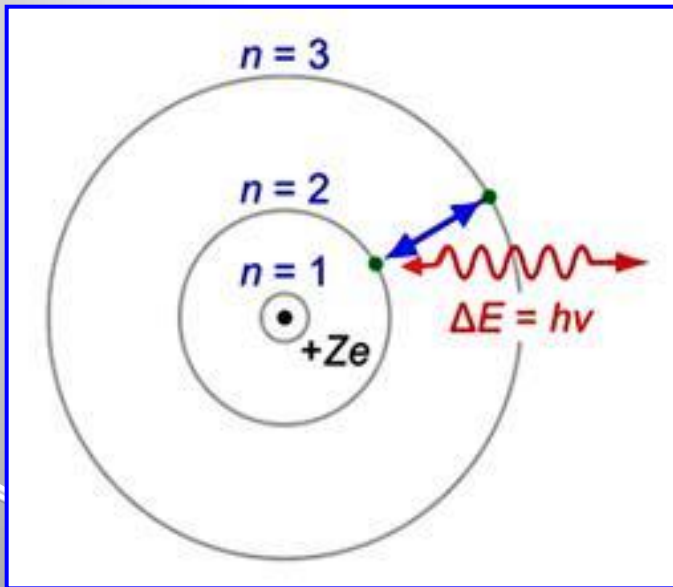
где E_m и E_n - энергия системы в первом и втором состояниях.



Возбужденные энергетические уровни

$$E_n > E_1$$

Основной энергетический уровень – самый нижний уровень отвечающий минимальной возможной энергии.



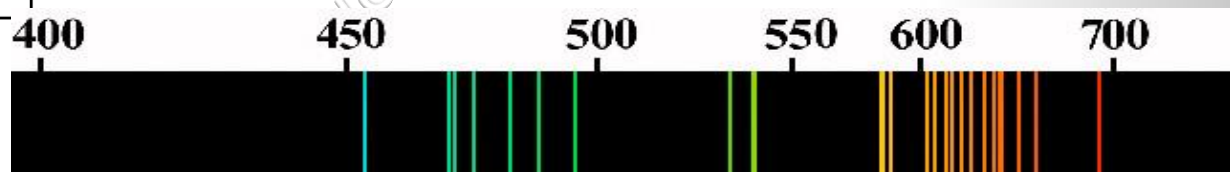
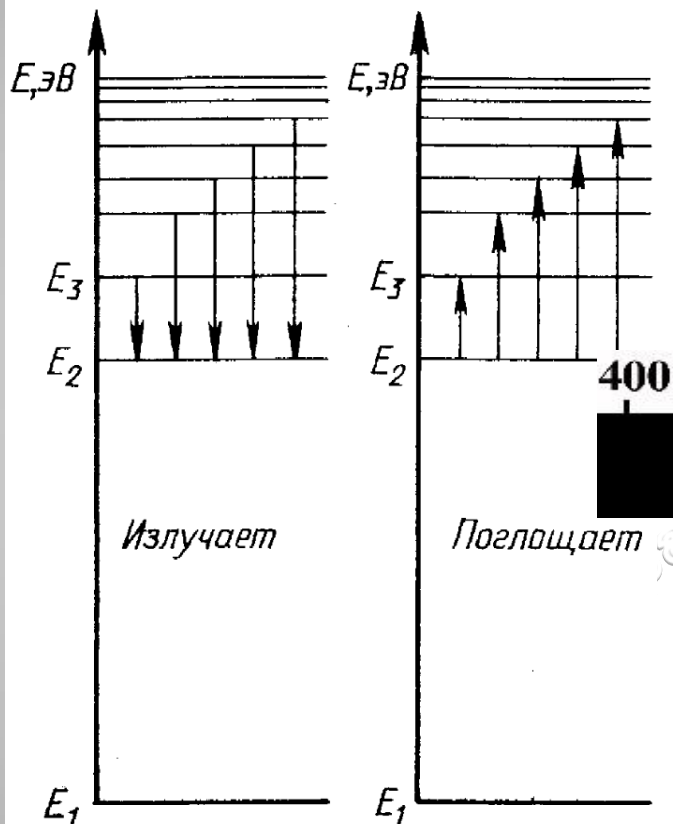
Энергия электрона в атоме водорода, выраженная в электронвольтах

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ эВ}$$

$$E = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2}$$

Согласно Бору *при переходе атома из одного стационарного состояния в другое излучается (поглощается) фотон с энергией*

$$\hbar \omega = E_m - E_n$$



$$\nu = (E_m - E_n) / h$$

Набор возможных дискретных частот квантовых переходов и определяет линейчатый спектр атома.

Спектр атома водорода

- Закономерности линейчатых спектров **атома водорода** определяются

обобщенной формулой Бальмера:

$$R = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{me^4}{2\hbar^3} = 2.067 \cdot 10^{16} \text{ c}^{-1}$$

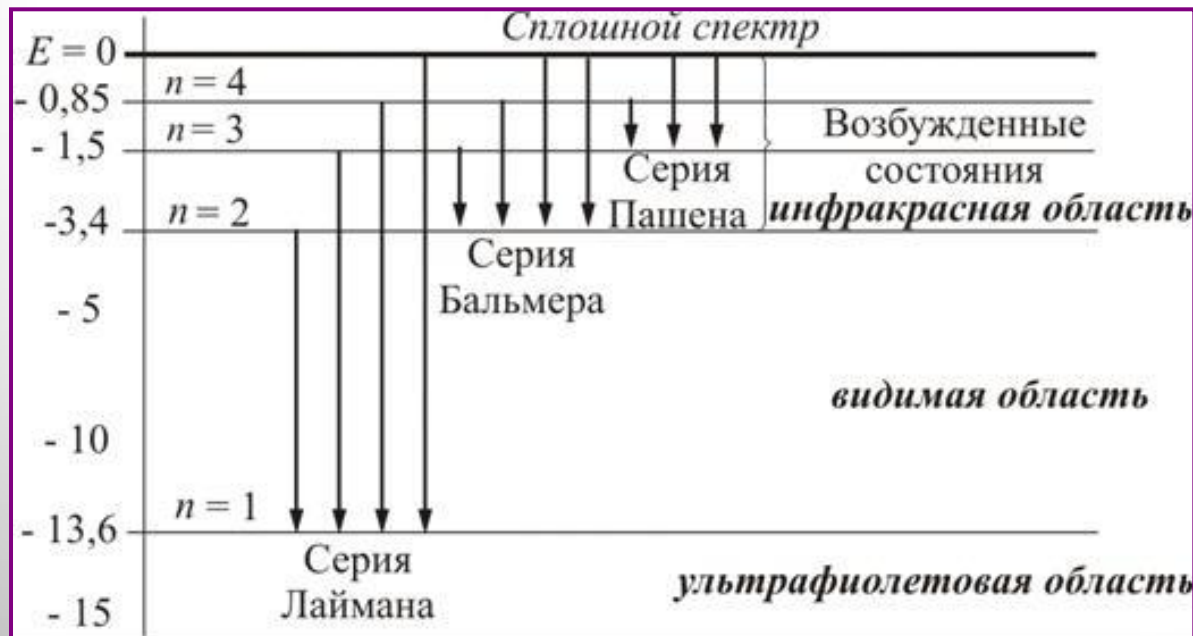
– постоянная Ридберга.

$$\nu = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

В каждой данной серии n имеет постоянные значения, $n = 1, 2, 3, 4., 5.,$ (**определяет серию**),

$$m \geq n + 1$$

(**определяет отдельные линии данной серии**).

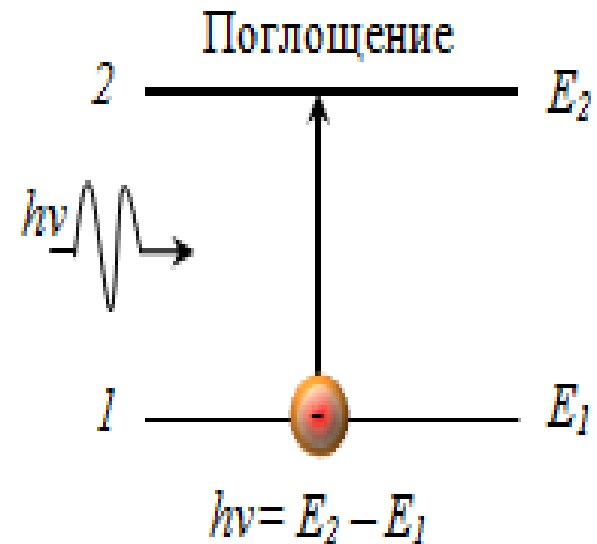
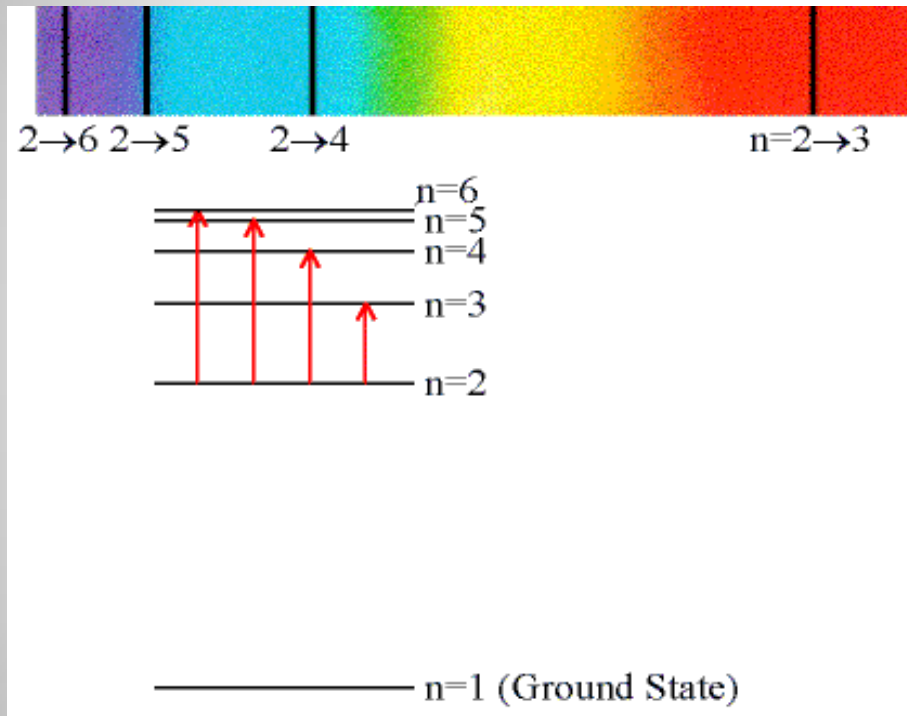


Линейчатый спектр атома водорода

Экспериментальное исследование спектров излучения разреженных газов показали, что *характерный линейчатый спектр каждого элемента представляет собой серии линий*, положение которых может быть описано простыми эмпирическими формулами

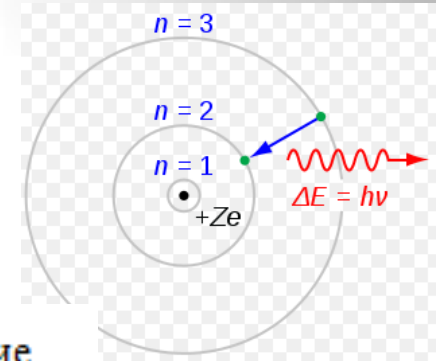
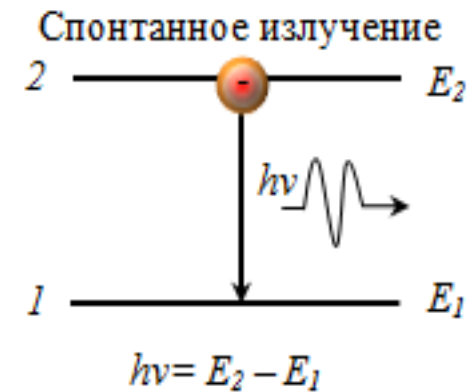
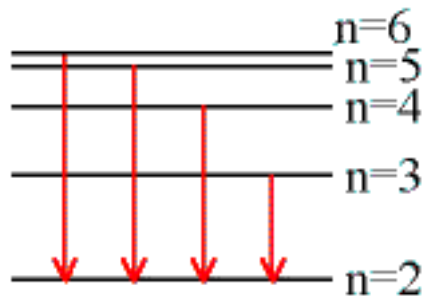
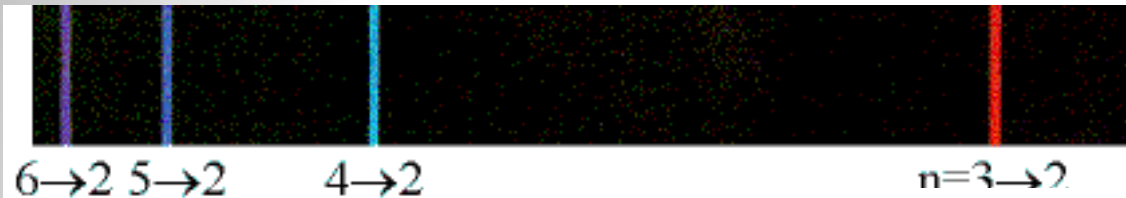
<i>Область спектра</i>	<i>Название серии</i>	<i>Серийная формула</i>
Ультрафиолетовая	Серия Лаймана	$\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right),$ $n = 2, 3, 4, \dots$
Видимая	Серия Бальмера	$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right),$ $n = 3, 4, 5, \dots$
Инфракрасная	Серия Пашена	$\nu = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right),$ $n = 4, 5, 6, \dots$

Образование спектров поглощения



Поглощая квант энергии атом переходит на более высокий энергетический уровень

Образование спектров испускания



Атом формирует спектр испускания, переходя на более **низкий энергетический уровень** с испусканием кванта энергии

————— n=1 (Ground State)

Эмиссионный и абсорбционный спектральный анализ, его медицинское применение.

Спектры поглощения и испускания вещества являются **источником информации о качественном составе** (из каких молекул или атомов состоит вещество), **количественном соотношении различных компонентов вещества**, их **состоянии и структурной организации**.

В спектральном анализе используют как **спектры испускания (эмиссионный спектральный анализ)**, так и **спектры поглощения (абсорбционный спектральный анализ)**.

В зависимости от энергии (частоты) фотона, испускаемого или поглощаемого атомом (или молекулой), **классифицируют следующие виды спектроскопии: радио-, ИК, УФ, видимого излучения, рентгеновская.**

Виды спектров: сплошные, линейчатые, молекулярные (полосатые)

❖ **Полосатые спектры** излучаются **молекулами**. Выглядят полосатые спектры подобно линейчатым, только *вместо отдельных линий наблюдаются отдельные серии линий, воспринимаемые как отдельные полосы* (рис. 1б, 2б).

❖ **Сплошные спектры** излучают **вещества, находящиеся в твёрдом состоянии**. Сплошной спектр выглядит как цветная полоса с плавным переходом от одного цвета к другому в следующем порядке: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый

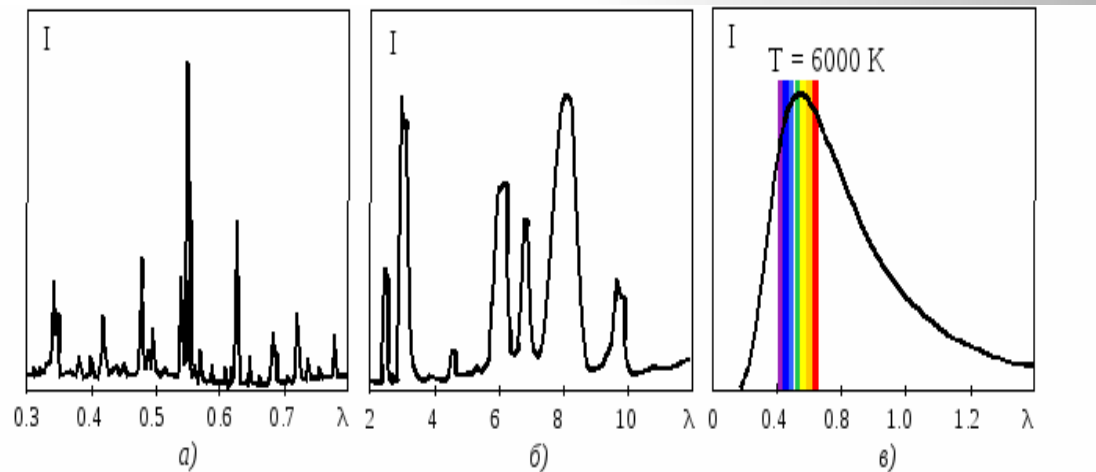


Рис. 1. Спектры излучения веществ: а) линейчатый; б) полосатый; в) сплошной. По оси X указаны длины волн λ в мкм; по оси Y - интенсивность излучения I.

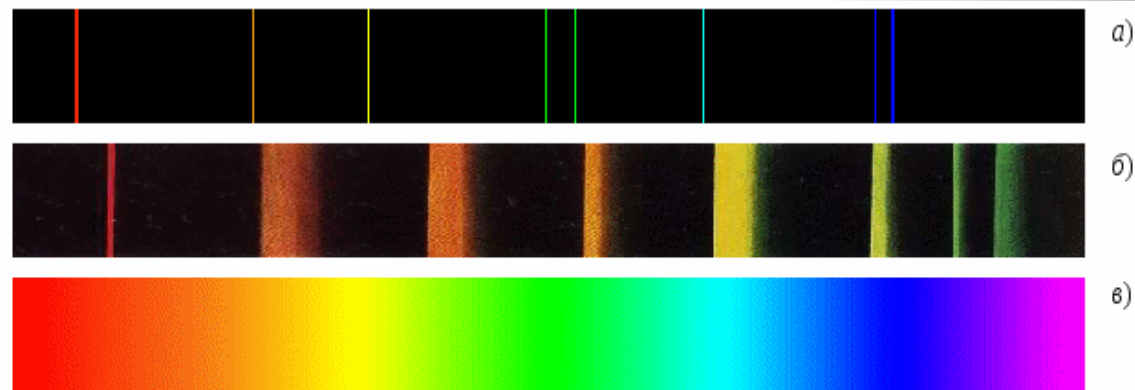


Рис. 2. Визуальное наблюдение линейчатых (а), полосатых (б) и сплошных (в) спектров в спектральном приборе [6].

В медицинских целях **эмиссионный анализ** служит в основном для **определения микроэлементов в тканях организма**, небольшого количества атомов металлов в консервированных продуктах с гигиенической целью, некоторых элементов в трупных тканях для целей судебной медицины и так далее.

Приборы для визуального наблюдения спектров называются **спектро스코пами**.

Они используются в видимой (380-760 нм) области в соответствии со спектральной чувствительностью глаза.

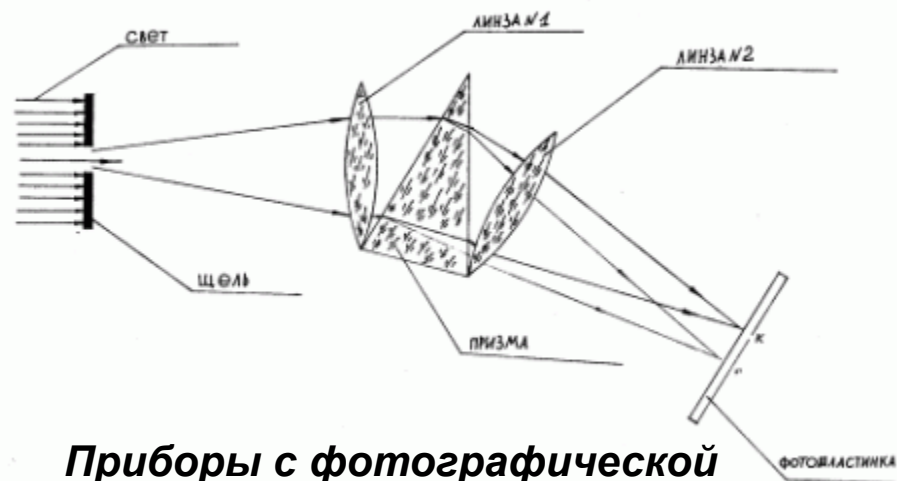
Приборы с фотографической регистрацией спектров – спектрографы – применяются в видимой и ультрафиолетовой областях в соответствии с чувствительностью фотоматериалов.

Приборы с фотоэлектрическими и тепловыми приемниками излучения, называемые **спектрометрами или спектрофотометрами**, позволяют **анализировать излучение от ультрафиолетовой до далекой инфракрасной области**.



Приборы для визуального наблюдения спектров называются **спектрскопами**.

СХЕМА СПЕКТРОГРАФА (ПРИЗМЕННОГО)



Приборы с фотографической регистрацией спектров – **спектрографы**

МЕДИЦИ



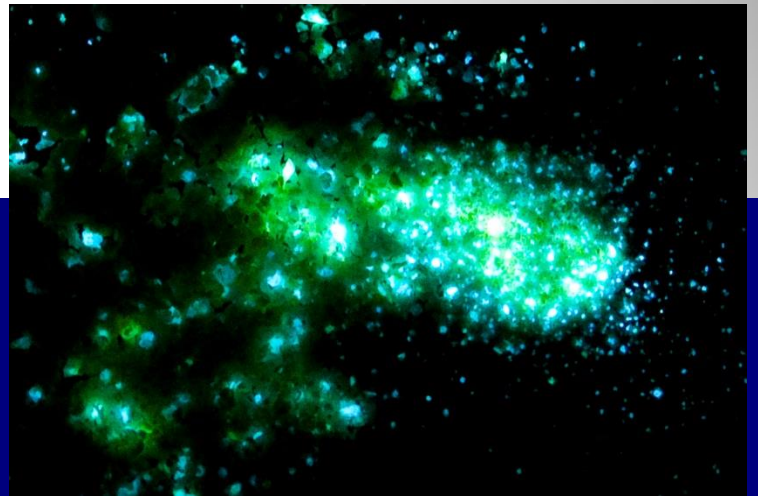
спектрофотометры,
ПОЗВОЛЯЮТ
анализировать
излучение от
ультрафиолетовой
до инфракрасной
области. (СФ-46)

❖ **Рассеяние света.**

❖ **Молекулярное
рассеяние,**

❖ **закон Релея,**

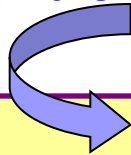
❖ **нефелометрия.**



Рассеяние света

- При прохождении через **мутную среду** часть световых лучей отклоняется от первоначального направления на значительные углы, вплоть до 180° , т.е. дифрагирует на мельчайших неоднородностях среды. Это явление называют **рассеянием света**.

Различают два основных вида таких неоднородностей:



Неоднородность состава (гетерогенность) среды, т.е. наличие в однородном веществе инородных частиц.

Такие среды называются **мутными**, к ним относятся **взвеси, эмульсии, дым (твердые частицы в газе), туман (капельки жидкости в газе)** и т.п. Рассеяние света в мутных средах называют **рассеянием Тиндаля**, по имени английского физика, впервые (1868) изучившего это явление.



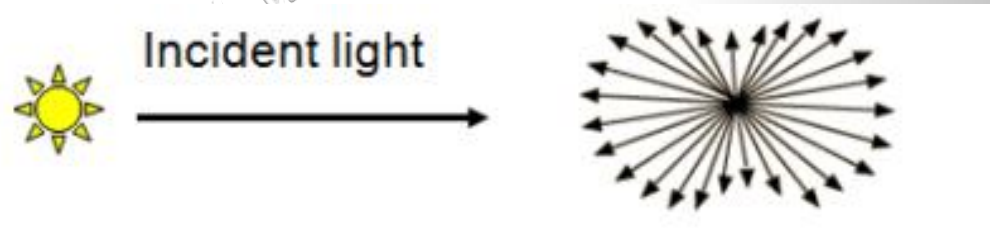
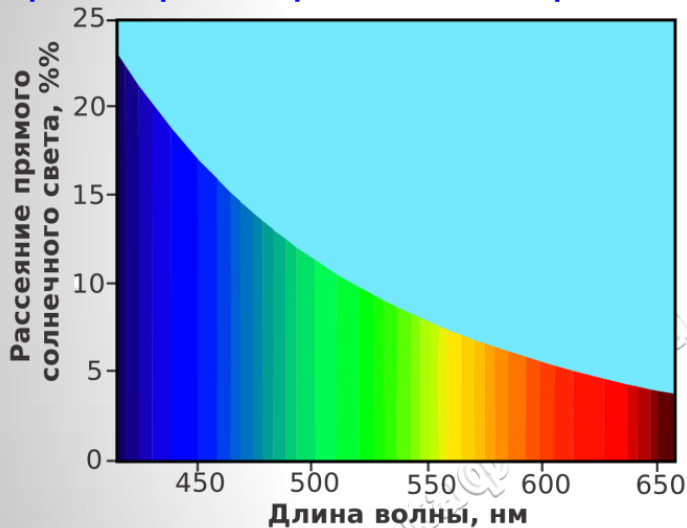
Оптические неоднородности, возникающие в однородной (гомогенной) среде вследствие флуктуации плотности.

Рассеяние света на таких неоднородностях называют **молекулярным рассеянием (рассеянием в чистых средах)** или **рассеянием Рэлея. (1871)**,

Молекулярное рассеяние (рассеяние **Рэля**)
возникает в практически **однородных средах**
из-за **флуктуации плотности вещества**.

$$I \approx \frac{1}{\lambda^4}$$

Рассеяние характерно также для **неоднородных сред** с размером неоднородности меньшим **$0,2\lambda$**



Максимальная интенсивность рассеянного света относится к области **сине-голубого** цвета.

Рассеяние Рэля объясняет голубой цвет неба, красный – цвет неба на закате Солнца



закон Рэлея

■ ИНТЕНСИВНОСТЬ

рассеянного света *обратно пропорциональна* четвертой степени длины волны — *закон Рэлея:*

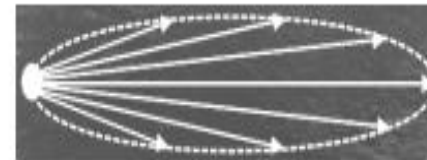
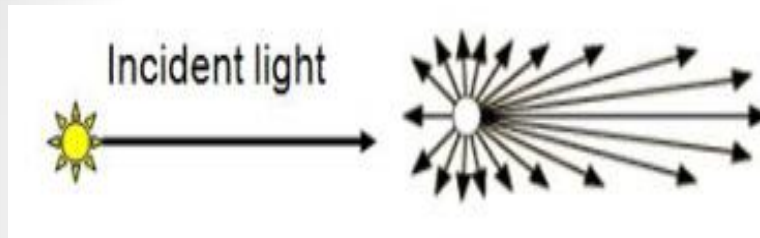
$$I_{\text{рас}} \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

В однородной чистой среде будут *рассеиваться преимущественно голубые и фиолетовые лучи*, а красные лучи будут лучше проходить сквозь нее. Поэтому спектр рассеянного излучения сильно смещается в синеголубую область, а прошедшего — в красную.

Рассеяние Тиндалля

(**рассеяние в мутных средах**)
характерно для сред с **неоднородностями**
больше $0,2\lambda$ (**дым, суспензии, туман**)

$$I \approx \frac{1}{\lambda^2}$$



для **крупных частиц $d \gg \lambda$** ,
зависимость интенсивности рассеянного
излучения от длины волны практически
исчезает (**белый цвет облаков**)



При одновременном поглощении и рассеянии света в среде **интенсивность света** в зависимости от расстояния распространения в среде l

$$I_l = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot l} = I_0 \cdot e^{-(m+k)l}$$

μ - показатель ослабления интенсивности света в веществе, $\mu = m + k$

k - показателя поглощения вещества, m –показатель ослабления интенсивности света в связи с его рассеянием в веществе

➤ **Изучая параметры рассеянного излучения** (спектр, степень поляризации, индикатрису рассеяния и ряд других), **можно определить свойства рассеивающей среды**, получить информацию о **межмолекулярных взаимодействиях, размерах макромолекул среды, частиц в коллоидных растворах и эмульсиях, определить состав аэрозолей** и другие параметры.

➤ Методы исследования рассеянного излучения с целью получения подобной информации называют **нефелометрией**, а соответствующие приборы — **нефелометрами**.

➤ В настоящее время широко **используется зондирование атмосферы специальными лазерными установками (лидарами)**, которое позволяет по **измеренным характеристикам рассеянного атмосферой лазерного излучения определить качественный и количественный состав аэрозолей** на расстояниях в несколько километров от источника излучения.

Спасибо за внимание!

УО «ГомГМУ», кафедра Медицинской и биологической физики