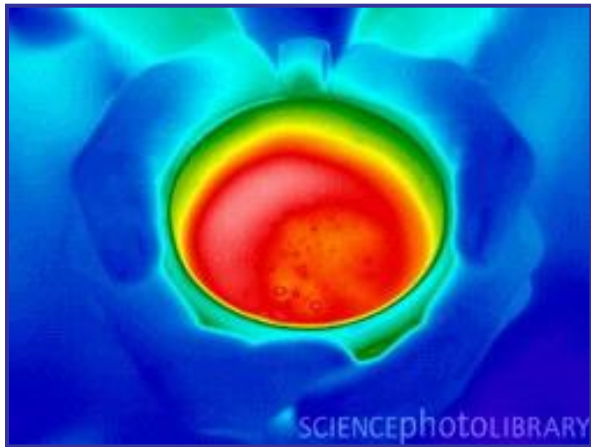


Лекция 3 (3сем).

Строение и свойства вещества

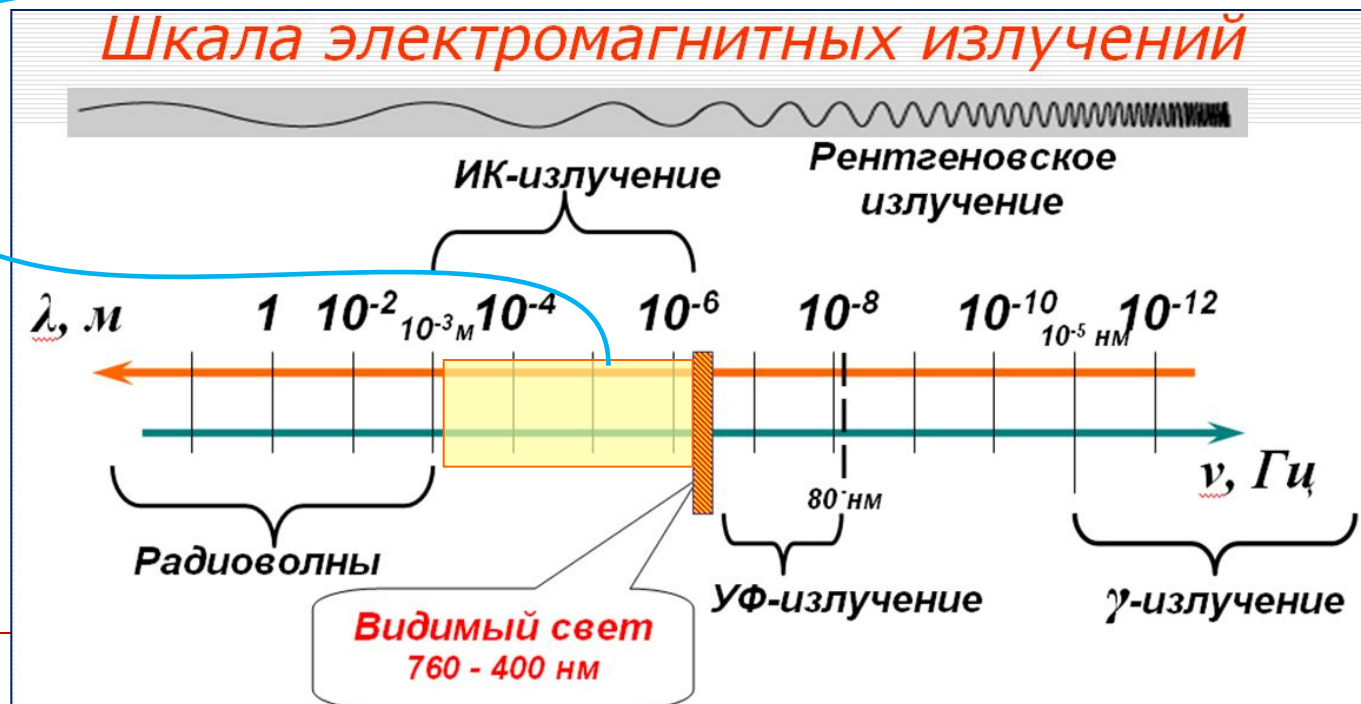


Термограмма кружки кофе

1. Тепловое излучение. Равновесное излучение. Величины, описывающие тепловое излучение.
2. Законы теплового излучения (Стефана-Больцмана, Кирхгофа, законы Вина).
3. Внешний фотоэффект и его законы. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
4. Многофотонный эффект. Внутренний и вентильный фотоэффект. Применения фотоэффекта.
5. Фотоны. Масса и импульс фотона.
6. Эффект Комптона.

1. Определение теплового излучения тел

- **Тепловое излучение** – это **электромагнитное излучение**, возникающее за счет внутренней энергии излучающего тела и зависящее только от температуры и оптических свойств этого тела.
- **Тепловое излучение** – это передача энергии от одних тел к другим в виде электромагнитных волн за счет их тепловой энергии.
- **Любое тело при температуре выше абсолютного нуля** (выше 0 K или -273°C) является источником **теплового излучения**.
- Диапазон длин электромагнитных волн (спектральный диапазон), излучаемых нагретым телом, очень широк (**теоретически от нуля до бесконечности**)
- Но только в **инфракрасном диапазоне** ($10^{-3}\text{ м} > \lambda > 760\text{ нм}$) тепловое излучение **заметно выше нуля**.



Характеристики теплового излучения

1. **Поток излучения Φ** («фи большое») – энергия dW , излучаемая за время dt со всей поверхности нагретого тела по всем направлениям в пространстве и во всем спектральном диапазоне:

- измеряется в Джоулях в секунду (Дж/с) или в Ваттах (Вт).
- по физическому смыслу это **мощность излучения P** .

$$\Phi = \frac{dW}{dt}$$

2. **Энергетическая светимость R** – энергия dW , излучаемая за время dt с площади поверхности тела dS по всем направлениям и во всем спектральном диапазоне:

- выражается в Ваттах на метр квадратный (Вт/м²)
- по физическому смыслу это **суммарная интенсивность излучения** тела на всех длинах волн λ или на всех частотах ν .

$$R = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{dW}{dt dS}$$

- энергетическая светимость зависит от температуры T , поэтому часто пишется **$R(T)$** .

3. **Спектральная плотность энергетической светимости** (или **испускаемая способность**)

r_λ на длине волны λ – энергия dW , излучаемая за время dt с площади поверхности тела dS по всем направлениям на длине волны λ в узком спектральном диапазоне $d\lambda$, который стремится к нулю ($d\lambda \rightarrow 0$):

$$r_\lambda = \frac{dR}{d\lambda}$$

□- основная энергетическая характеристика на данной длине волны λ , иногда обозначают как φ_λ .

- спектральная плотность энергетической светимости r_λ выражается в Ваттах на метр кубический (Вт/м³)
- по физическому смыслу это **интенсивность излучения** тела **I_λ на определённой длине волны λ** :

$$I_\lambda = \frac{d\Phi}{dS d\lambda} = \frac{dW_\lambda}{dt dS d\lambda}$$

Характеристики теплового излучения -2

За. **Спектральная плотность энергетической светимости** (или **испускательная способность**) Γ_ν на частоте ν – энергия dW , излучаемая за время dt с площади поверхности тела dS по **всем** направлениям на **частоте ν** в **узком спектральном диапазоне $d\nu$** , который стремится к нулю ($d\nu \rightarrow 0$):

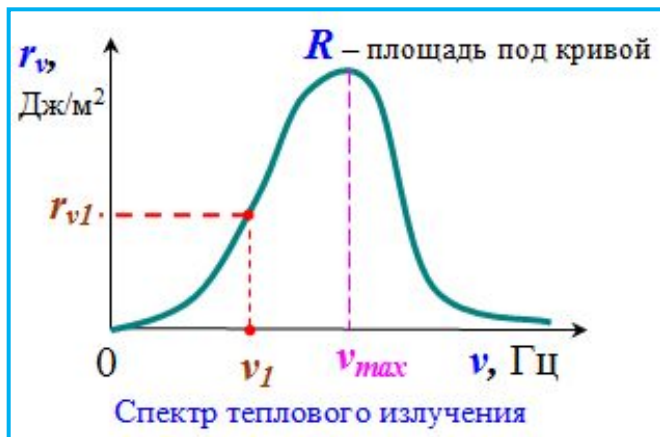
$$r_\nu = \frac{dR}{d\nu}$$

- спектральная плотность энергетической светимости Γ_ν выражается в **Джоулях на метр квадратный** ($\text{Дж}/\text{м}^2$),
- по физическому смыслу это **интенсивность излучения** тела I_ν на **определённой частоте ν** .

4. **Спектр теплового излучения тела** при данной температуре (при $T = \text{const}$) – это зависимость Γ_λ от λ .

Спектр даёт распределение излучаемой энергии по длинам волн.

Энергетическая светимость R и спектральная плотность энергетической светимости Γ_λ связаны формулой:



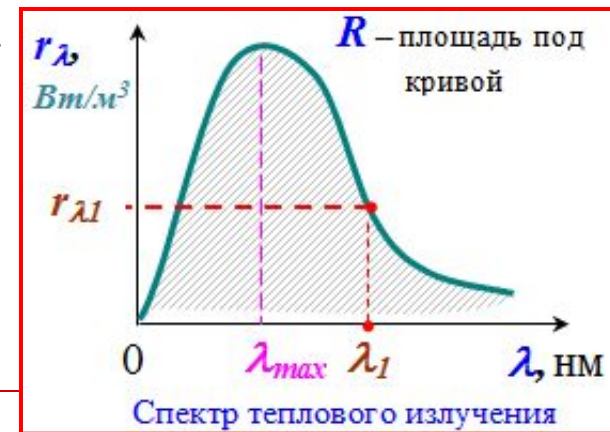
$$R = \int_0^{\infty} r_\lambda d\lambda$$

т.е. R –
площадь под
кривой
 $r_\lambda = f_1(\lambda)$



т.е. R – площадь под
кривой $r_\nu = f_2(\nu)$

$$R = \int_0^{\infty} r_\nu d\nu = \int_0^{\infty} r_\lambda \frac{c}{\nu^2} d\nu$$



2. Монохроматические коэффициенты

Монохроматический коэффициент поглощения (или **поглощательная способность**) a_λ - это отношение **потока излучения** $d\Phi_{\text{погл}}(\lambda)$ с длиной волны λ , **поглощённого** телом к **потоку излучения** $d\Phi_{\text{над}}(\lambda)$ **той же** длины волны, упавшему на тело:

$$a_\lambda = \frac{\Phi_{\text{погл}}(\lambda)}{\Phi_{\text{над}}(\lambda)}$$

Аналогично для **частоты**

$$a_\nu = \frac{\Phi_{\text{погл}}(\nu)}{\Phi_{\text{над}}(\nu)}$$

Монохроматический коэффициент отражения (или **отражательная способность**) b_λ или ρ_λ - это отношение **потока излучения** $d\Phi_{\text{отпр}}(\lambda)$ с длиной волны λ , **отраженного** телом к **потоку излучения** $d\Phi_{\text{над}}(\lambda)$ **той же** длины волны, упавшему на тело:

$$b_\lambda = \rho_\lambda = \frac{\Phi_{\text{отпр}}(\lambda)}{\Phi_{\text{над}}(\lambda)}$$

Аналогично для **частоты**

$$b_\nu = \rho_\nu = \frac{\Phi_{\text{отпр}}(\nu)}{\Phi_{\text{над}}(\nu)}$$

Вывод из определения: монохроматические коэффициенты **поглощения** и **отражения** - **величины безразмерные**, причем: $0 < a_\lambda (a_\nu) \leq 1$ или $0 < b_\lambda (b_\nu) \leq 1$.

Если **нет прохождения** электромагнитного излучения через вещество, то:

$$a_\lambda + b_\lambda = 1$$

Аналогично для **частоты**

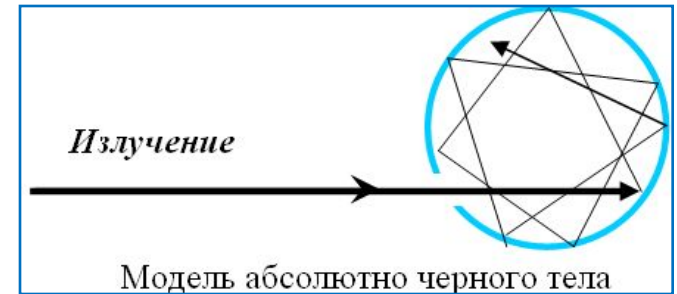
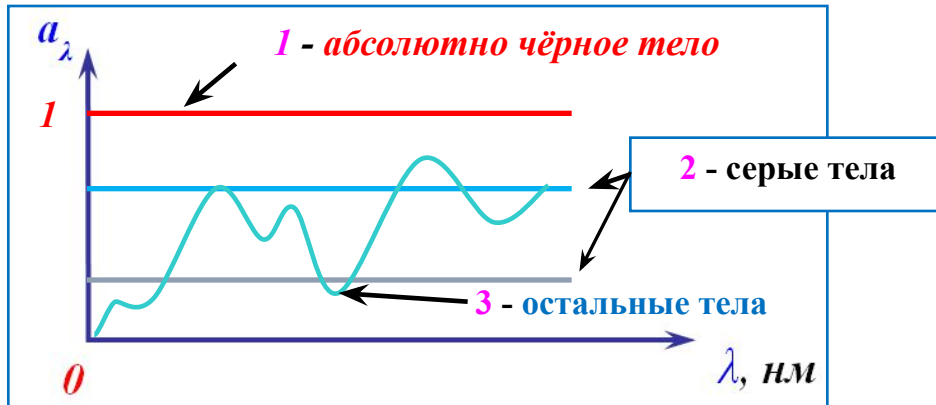
$$a_\nu + b_\nu = 1$$

Сумма поглощенного и отраженного излучения **на каждой** длине волны λ /частоте ν **равна 100%**.

Классификация тел по монохроматическому коэффициенту поглощения a_λ

По типу зависимости a_λ от λ все тела делятся на 3 группы:

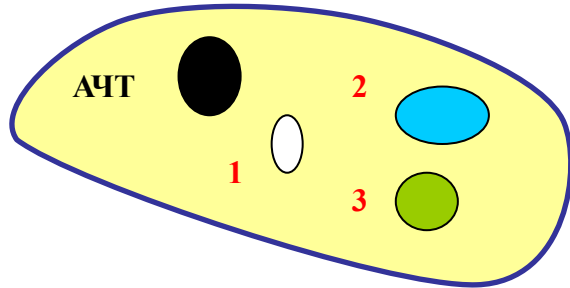
- 1) **Абсолютно чёрные тела (АЧТ):** для них коэффициент поглощения $a = 1$ на всех длинах волн λ , т.е. абсолютно чёрное тело **полностью поглощает** всё падающее на него излучение (1).
 - **Модель абсолютно чёрного тела** – замкнутая полость с малым отверстием. Остальные тела - АЧТ только в ограниченном интервале λ или ν .
 - **Солнце** – абсолютно чёрное тело с температурой $T=6000$ К.
 - **Человека можно считать** абсолютно чёрным телом в диапазоне: $5 \text{ мкм} < \lambda < 25 \text{ мкм}$.



- 2) **Серые тела:** коэффициент поглощения $a < 1$ и **одинаковый** на всех длинах волн.
 - Эти тела **одинаково поглощают** излучение на всех длинах волн, но **не полностью** (2).
 - **Человека можно считать** серым телом $a = 0,9$ в ИК-диапазоне ($760 \text{ нм} < \lambda < 1 \text{ мм}$).
- 3) **Все остальные (несерые) тела:** для них коэффициент поглощения $a < 1$ и **разный** на разных длинах волн, т.е. $a = f(\lambda)$ и эта зависимость представляет собой **спектр поглощения** тела (3).

3. Законы теплового излучения: Закон Кирхгофа и его следствия

Закон Кирхгофа верен для **любых** тепловых излучателей



Условия (предпосылки):

- Пусть есть несколько тел, имеющих **одинаковую температуру**, равную температуре окружающей среды (т. е. тела находятся в условиях **термодинамического равновесия**).
- Одно из тел – **абсолютно чёрное тело**, для которого **спектральная плотность энергетической светимости** обозначается ϵ_λ («эпсилон лямбда»).

При данных предпосылках **закон Кирхгофа** звучит так:

- На любой произвольно взятой длине волны λ , **отношение** спектральной плотности энергетической светимости r_λ к коэффициенту поглощения a_λ для **любого из тел** будет **равно** спектральной плотности энергетической светимости **абсолютно чёрного тела** ϵ_λ :

$$\frac{r_\lambda}{a_\lambda} = \epsilon_\lambda \rightarrow r_\lambda = a_\lambda \cdot \epsilon_\lambda$$



$$\left(\frac{r_\lambda}{a_\lambda} \right)_1 = \left(\frac{r_\lambda}{a_\lambda} \right)_2 = \dots = \frac{\epsilon_\lambda}{1} = \epsilon_\lambda$$

Это коротко

- Это в полном виде,
- причем индексы (1, 2, ...) означают **номера тел**

4. Закон Стефана-Больцмана и следствия из него

- Закон Стефана-Больцмана звучит так: **энергетическая светимость абсолютно чёрного тела** $R_{\text{АЧТ}}$ **прямо пропорциональна абсолютной температуре** T в четвёртой степени:

$$R_{\text{АЧТ}} = \sigma \cdot T^4$$

- где σ («сигма») – это константа, называемая **постоянной Стефана-Больцмана**, причём $\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$.

□ Следствия из закона Стефана-Больцмана

1. Для серого тела:

$$R_{\text{сер}} = a \cdot R_{\text{АЧТ}} = a \cdot \sigma \cdot T^4 = \delta \cdot T^4$$

- где δ («дельта») – **приведённый** коэффициент излучения.
- Таким образом, **для серого тела закон Стефана-Больцмана также верен**, только коэффициент δ **различен** для разных серых тел.

2. **Относительное изменение энергетической светимости:**


$$\frac{\Delta R}{R} \approx 4 \frac{\Delta T}{T}$$

- Это несложно показать:

Тогда:

$$\Delta R \approx dR = R'_T dT = (\delta T^4)'_T dT = \delta 4T^3 dT \approx \delta 4T^3 \Delta T$$

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\delta 4T^3 \Delta T}{\delta T^4} = 4 \frac{\Delta T}{T}$$

 формула, на которой основана **термография/ тепловидение**

5. Закон смещения Вина



Вильгельм Вин в **1893 г.** изучал изменение цвета металлических тел при нагревании и заметил:

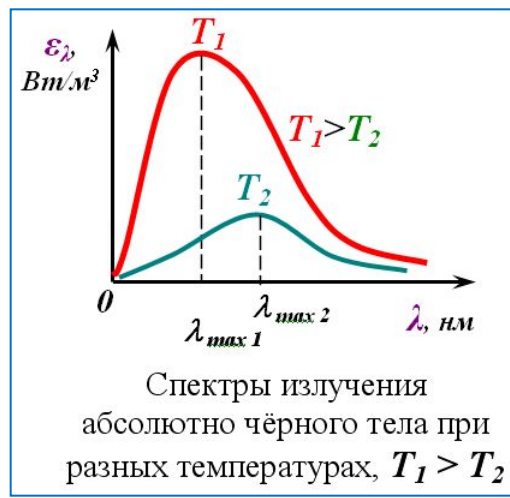
Изменение цвета с увеличением температуры T

□ **Закон смещения Вина** звучит так: длина волны λ_{max} максимума в спектре излучения тела **обратно пропорциональна** его абсолютной температуре T:

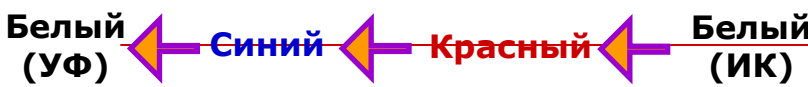
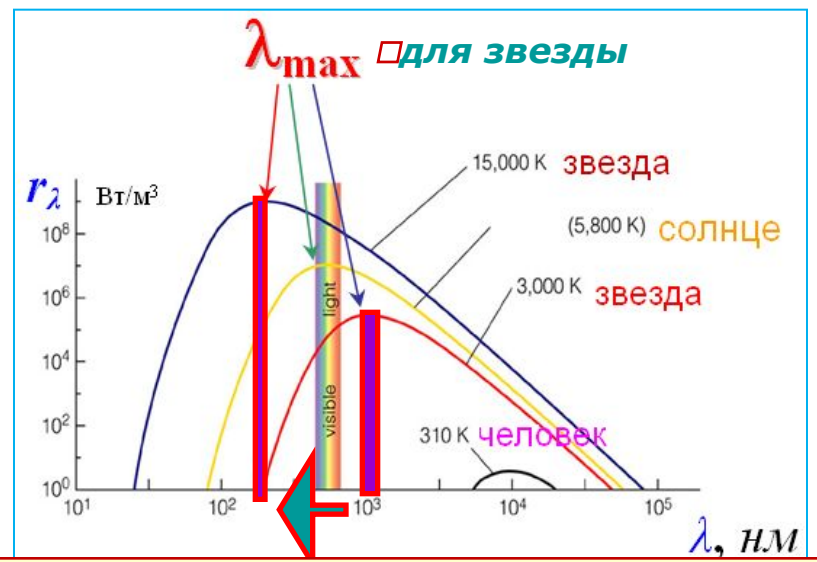
$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

■ причём $b \approx 2,9 \text{ мм} \cdot \text{К} \approx 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – **1-я постоянная Вина**

Уменьшение температуры абсолютно чёрного тела, например, от T_1 до T_2 ($T_1 > T_2$) приводит к **смещению максимума** спектра излучения абсолютно чёрного тела λ_{max} **в сторону больших длин волн** ($\lambda_{max2} > \lambda_{max1}$).



Примеры:



Происходит **смещение цвета максимума в меньшие λ** в спектре с **увеличением температуры T**

Закон испускания Вина

- **Закон испускания Вина:** максимальное значение **спектральной плотности энергетической светимости** (**испускательной способности**) $r(\lambda_{max})$ или $\varphi(\lambda_{max})$ в спектре излучения тела **прямо пропорциональна** его абсолютной температуре T :

$$r(\lambda_{max}) = \varphi(\lambda_{max}) = c_1 T^5$$

причём $c_1 = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ –
2-я постоянная Вина.

Квантовая гипотеза Планка



Планк Макс
1858-1947

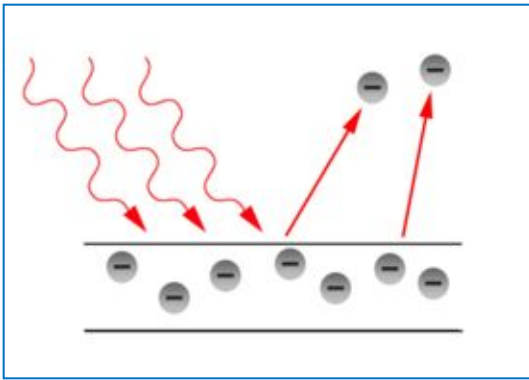
- **В 1900 г.** немецкий физик Макс Планк высказал гипотезу о том, что запас энергии E (или W) колебательной системы, находящейся в равновесии с электромагнитным излучением, **не может принимать любые значения**.
- Энергия элементарных излучателей (**осцилляторов**), поглощающих и излучающих электромагнитные волны, **обязательно** должна быть равна **целому кратному** некоторого определенного количества энергии $E_0 = W_0$.
- Согласно квантовой гипотезе, энергия осциллятора может принимать только определенные дискретные значения, равные **целому числу** элементарных порций – **квантов энергии**:

$$E = nE_0$$

где

$$E_0 = h\nu$$

Фотоэлектрический эффект и его виды



- **Фотоэлектрический эффект (фотоэффект)** - это испускание электронов веществом под действием света. Различают внешний и внутренний фотоэффект.
- **При внешнем фотоэффекте** электроны освобождаются светом из поверхностного слоя вещества и переходят в другую среду.
- **При внутреннем фотоэффекте** оптически возбужденные электроны остаются внутри освещаемого тела, не нарушая электрическую нейтральность последнего.

Фотоэффект

В жидких и твердых телах

В газах

Внешний фотоэффект – фотоэлектронная эмиссия

Внутренний фотоэффект

Фотоионизация

Явление **вырывания электронов** из вещества **под действием света**. Поглощение фотонов $E=h\nu$ сопровождается **вылетом электронов** за пределы тела

Электрон, оставаясь в теле, изменяет своё энергетическое состояние

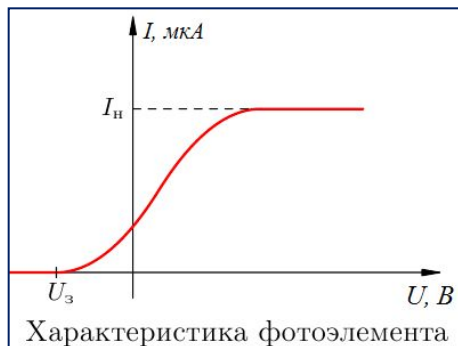
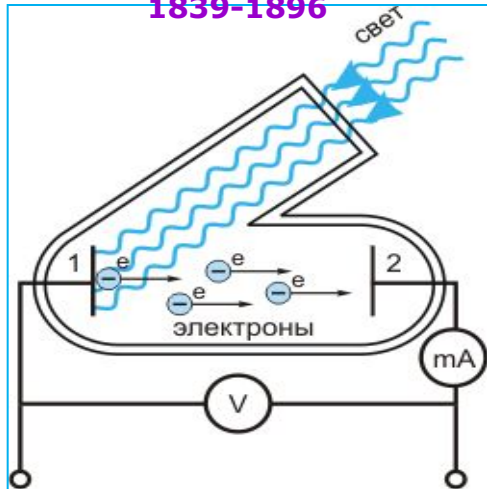
Фотоэффект, наблюдаемый в газах и состоящий в ионизации атомов (молекул) под действием излучения (фотонов с энергией

$$E=h\nu$$

Внешний фотоэффект



Столетов
Александр
Григорьевич
1839-1896



- **Фотоэлектрический эффект** был открыт в **1887 году** немецким физиком Г. Герцем и в **1888–1890 годах** экспериментально исследован **А. Г. Столетовым**.
- К этому времени уже был открыт **электрон** (1897 г., Джордж Томсон), и стало ясно, что **внешний фотоэффект** состоит в **вырывании электронов из вещества** под действием падающего на него света.
- В **экспериментах использовался** стеклянный вакуумный баллон с двумя металлическими электродами (катодом **1** и анодом **2**), поверхность которых была тщательно очищена.
- Один из электродов (катод **1**) через кварцевое окошко освещался монохроматическим светом некоторой длины волны λ . Стекло берется кварцевое, чтобы могло пропускать **ультрафиолетовый диапазон** спектра (**80-400 нм**).
- При этом из катода **1** вырываются электроны, которые называют **фотоэлектронами**.
- Подача на электроды некоторого напряжения **U** ведет к тому, что **фотоэлектроны начинают двигаться** к аноду **2**, в цепи **возникает фототок I**, регистрируемый микроамперметром.
- График зависимости фототока **I** от приложенного внешнего напряжения **U** между катодом и анодом называют **характеристикой фотоэлемента**, т. е. того прибора, в котором наблюдают фотоэффект.
- Для этой зависимости характерно наличие участка **тока насыщения** $I_{нас} = I_n$, когда все электроны, вырванные светом с поверхности катода, попадают на анод и участка, на котором **фототок уменьшается до нуля** ($I=0$) при некотором **задерживающем напряжении** $U_{зад} = U_з$.

Законы внешнего фотоэффекта

- Многочисленными экспериментами были установлены **три основных закона** внешнего фотоэффекта:
1. **Фототок насыщения $I_{нас} = I_n$ прямо пропорционален** падающему световому потоку Φ при одном и том же спектральном составе ($I_{нас} = k\Phi$).
 - Это значит, что **число электронов N** , вырываемых светом ежесекундно с единицы площади катода, **прямо пропорционально интенсивности I_0** падающего света ($I_0 = k_1 N$).
 2. Для каждого металла существует **минимальная частота $\nu_0 = \nu_{кр}$** волны света (или максимальная длина $\lambda_0 = \lambda_{кр}$) при которой ещё происходит вырывание электронов и которая называется **красной границей фотоэффекта**.
 - Если частота ν **меньше частоты красной границы $\nu_{кр}$** ($\nu < \nu_{кр}$), то **испускание фотоэлектронов отсутствует** даже при достаточно большой интенсивности падающего света.
 3. **Максимальная начальная скорость v и максимальная кинетическая энергия ($E_{кин} = mv^2/2$) фотоэлектронов прямо пропорциональны** частоте ν облучающего света и **не зависит от** интенсивности света.
 4. С точки зрения **классических волновых представлений**: вырывание электронов из металла неудивительно, так как падающая ЭМ волна вызывает вынужденные колебания электронов в металле. Электрон, поглощая энергию, может накопить ее в количестве, достаточном для преодоления сил, удерживающих электрон в металле, т. е. для совершения работы выхода.
 5. Но если это так, то **энергия E фотоэлектронов должна зависеть от интенсивности I_0 света**. А в эксперименте увеличение интенсивности света приводит лишь к возрастанию числа n фотоэлектронов.
 6. Более того, **резкое расхождение теории с опытом** возникает уже **при очень малой интенсивности I_0 света**.

Законы внешнего фотоэффекта

- Многочисленными экспериментами были установлены **три основных закона** внешнего фотоэффекта:
- 1. Фототок насыщения $I_{нас} = I_n$ прямо пропорционален** падающему световому потоку Φ при одном и том же спектральном составе ($I_{нас} = k\Phi$).
 - Это значит, что **число электронов N** , вырываемых светом ежесекундно с единицы площади катода, **прямо пропорционально интенсивности I_0** падающего света ($I_0 = k_1 N$).
 - 2. Для каждого металла существует минимальная частота $\nu_0 = \nu_{кр}$ волны света (или максимальная длина $\lambda_0 = \lambda_{кр}$) при которой ещё происходит вырывание электронов и которая называется красной границей фотоэффекта.**
 - Если частота ν **меньше частоты красной границы $\nu_{кр}$ ($\nu < \nu_{кр}$)**, то **испускание фотоэлектронов отсутствует** даже при достаточно большой интенсивности падающего света.
 - 3. Максимальная начальная скорость v и максимальная кинетическая энергия ($E_{кин} = mv^2/2$) фотоэлектронов прямо пропорциональны частоте ν облучающего света и не зависит от интенсивности света.**
 - 4. С точки зрения классических волновых представлений:** вырывание электронов из металла неудивительно, так как падающая ЭМ волна вызывает вынужденные колебания электронов в металле. Электрон, поглощая энергию, может накопить ее в количестве, достаточном для преодоления сил, удерживающих электрон в металле, т. е. для совершения работы выхода.
 - 5. Но если это так, то энергия E фотоэлектронов должна зависеть от интенсивности I_0 света.** А в эксперименте увеличение интенсивности света приводит лишь к возрастанию числа n фотоэлектронов.
 - 6. Более того, резкое расхождение теории с опытом возникает уже при очень малой интенсивности I_0 света.**

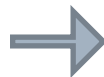
Объяснение фотоэффекта с позиции гипотезы о квантовании энергии

- По классической волновой теории фотоэффект в этих условиях должен протекать **с заметным запаздыванием**, поскольку требуется конечное время для **накопления** необходимой энергии.
- Однако опыт показывает, что **фотоэффект появляется практически мгновенно**, т. е. одновременно с началом освещения (промежуток времени между началом освещения и появлением фототока не превышает 10^{-9} с).
- Все трудности отпадают, если фотоэффект рассматривать на основе гипотезы Эйнштейна о световых квантах, в соответствии с которой падающее монохроматическое излучение рассматривается как **поток световых квантов – фотонов**, энергия которых E связана с частотой ν соотношением $E=h\nu$, где h – постоянная Планка ($h=6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с).
- При поглощении фотона его энергия **целиком передается одному электрону**. Таким образом, **электрон приобретает кинетическую энергию** не постепенно, а **мгновенно**. Этим и объясняется **безынерционность фотоэффекта**.
- Полученная электроном энергия $h\nu$ затрачивается частично на освобождение из металла, а частично переходит в кинетическую энергию вылетевшего из металла электрона $E_{кин}$.
- Минимальную энергию, необходимую для освобождения электрона из металла, т. е. для преодоления задерживающих сил, действующих в поверхностном слое металла, называют **работой выхода $A_{вых}$** .
- **Оторванный электрон** может взаимодействовать с атомами внутри металла, растрачивая энергию E' в тепло.
- **Максимальной энергией $E_{кин}$** вылетевший электрон будет обладать тогда, когда внутри он был свободен, т. е. не связан с атомом, а при вылете наружу не расходовал энергию на тепло ($E'=0$).

Формула Эйнштейна для фотоэффекта и следствия из неё

- Тогда **для фотоэлектронов с максимальной кинетической энергией** закон сохранения энергии в элементарном акте поглощения фотона, будет иметь вид:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + E_{\text{max}}$$



$$N h\nu = A_{\text{вых}} + E_{\text{max}}$$

формула Эйнштейна для одного фотона
(однофотонный фотоэффект)

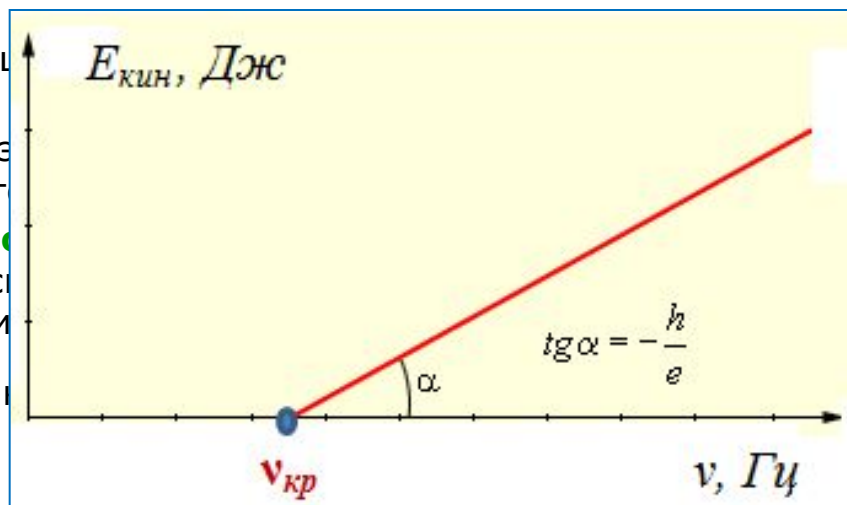
формула Эйнштейна для **N** фотонов
(многофотонный фотоэффект)

- Из формулы Эйнштейна следует закономерности:

1. Так как каждый электрон вылетает под действием общего числа фотонов N ,

- Поскольку **фототок** $I_{\text{нас}}$ пропорционален числу фотонов N ($I_{\text{нас}} = k_1 N$), а следовательно, **фототок насыщения** $I_{\text{нас}}$ пропорционален числу фотонов N .

2. Из уравнения Эйнштейна следует, что **красная граница** $\nu_{\text{кр}}$ зависит от работы выхода $A_{\text{вых}}$. Поэтому красная



граница $\nu_{\text{кр}}$ зависит от работы выхода $A_{\text{вых}}$.

3. Если $h\nu < A_{\text{вых}}$, то фотоэффекта **нет**. Если $h\nu \geq A_{\text{вых}}$, то фотоэффект наблюдается. При этом **число фотоэлектронов N** пропорционально числу падающих фотонов N . Поэтому фототок насыщения будет $I_{\text{нас}} = k\Phi_{\text{э}}$.

Если $h\nu \geq A_{\text{вых}}$, то фотоэффект наблюдается.

$$\nu_{\text{кр}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$$

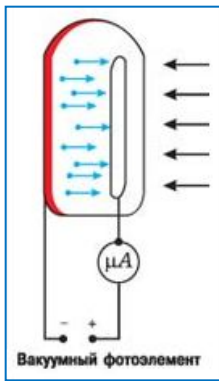
или
и

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{c}{\nu_{\text{кр}}} = \frac{ch}{A_{\text{вых}}}$$

3. Из уравнения Эйнштейна максимальная кинетическая энергия $E_{\text{кин}} = h\nu - A_{\text{вых}}$.

- Так как работа выхода от частоты ν не зависит, то максимальная кинетическая энергия **линейно возрастает с увеличением частоты ν света.**

Применение фотоэффекта



Внешний вид ФЭУ

- **Внешний фотоэффект** нашел широкое применение в фотоэлементах, фотосопротивлениях, фотоумножителях, широко применяемых в **фотоэлектронной аппаратуре** и **аппаратуре для космических исследований**.
- При изучении фотоэффекта Столетов создал первый **вакуумный фотоэлемент**.
- Сейчас в основном используют **полупроводниковые фотоэлементы**.
- **Фотоэлемент** – это прибор, в котором падающая на поверхность катода энергия света (видимого и УФ диапазона) при внешнем приложенном напряжении U между электродами превращается в энергию электрического тока.
- Применяется **в устройствах сигнализации и автоматики, в солнечных батареях**.
- **Фотосопротивление (фоторезистор)** – это полупроводниковый прибор, у которого при освещении изменяется электрическое сопротивление R .
- Применяется для регистрации видимого света.

- **Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)** – электровакуумный прибор, в котором **поток электронов**, излучаемый фотокатодом под действием оптического излучения (фототок), усиливается в умножительной системе в результате **вторичной электронной эмиссии**.
- Фотоэлектронные умножители, усиливающие первоначальный фототок во много раз, позволяют регистрировать очень слабое излучение, вплоть до отдельных квантов.
- Они широко применяются в фотоэлектронной аппаратуре: в электронно-оптических преобразователях, в качестве детекторов ядерных излучений и т.д.

Свойства фотона: масса, импульс и другие

- **Фотон** – это частица электромагнитного излучения, имеющая энергию $E=h\nu$ и $E=mc^2$. Тогда масса $m=h\nu/c^2$.

- Но с другой стороны масса:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{c^2}}} = \frac{m_0}{0} = \infty$$



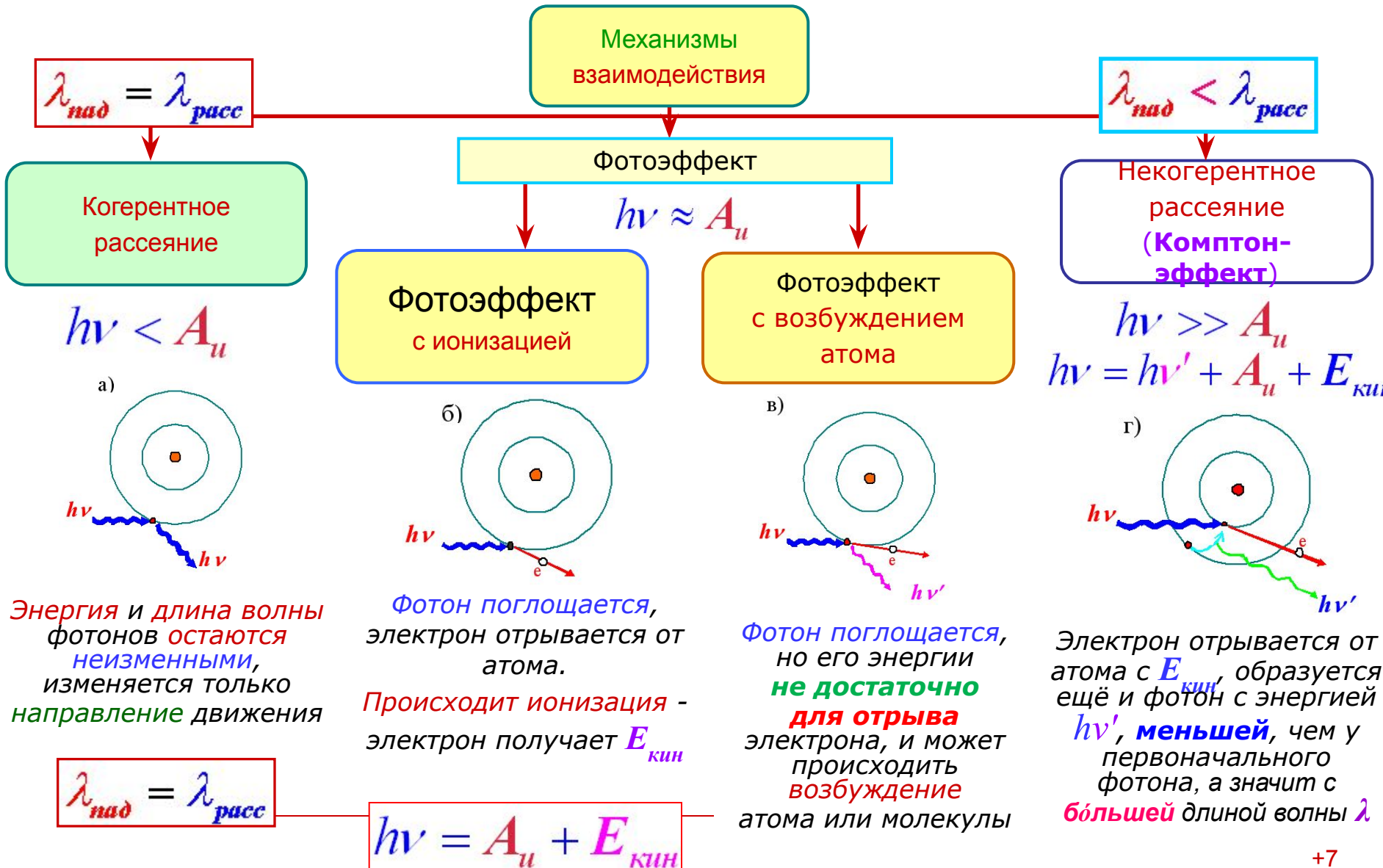
масса покоя:
 $m_0=0$

Частица вещества

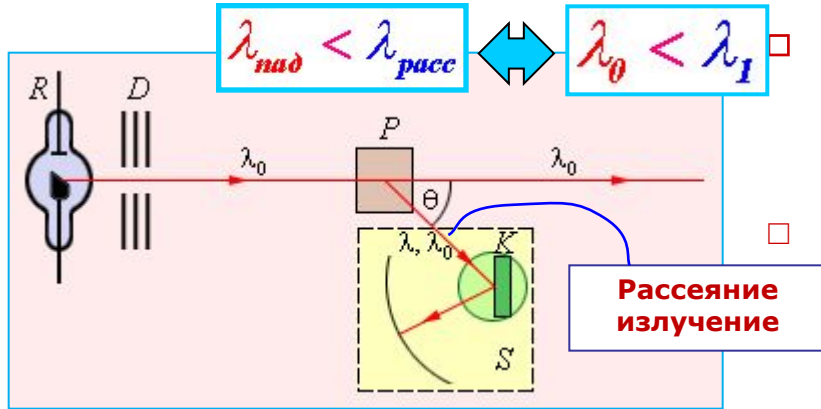
Частица электромагнитного поля (фотон)

4. Механизмы взаимодействия ЭМ излучения с веществом

Энергия ионизации $A_{и}$ – минимальная энергия, необходимая для удаления электрона за пределы атома или молекулы.



Теория некогерентного рассеяния (эффекта Комптона)



Опыт Комптона: узкий пучок монохроматических рентгеновских лучей от источника **R** (рентгеновской трубки) с λ_0 падает на «легкое» рассеивающее вещество **P** (графит, парафин)

После рассеяния на угол θ попадает в рентгеновский спектрограф **S**, в котором роль дифракционной решетки играет кристалл **K**, закрепленный на поворотном столике, где измеряется длина волны λ_1 **рассеянного излучения.**

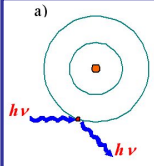
- Опыты Комптона показали, что **длина волны рассеянного излучения λ_1 больше** длины волны падающего излучения λ_0 , причем **разность $\Delta\lambda$ равна:**

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_0 = 2\lambda_k \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

где λ_k – **комptonовская длина волны = const.**

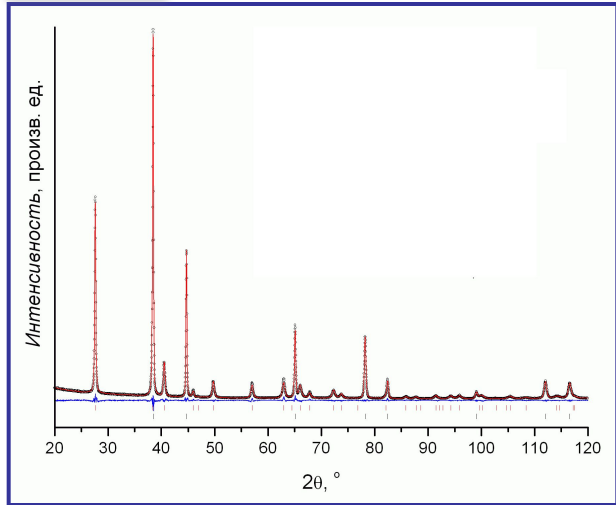
- Это явление получило название **эффекта Комптона**: рентгеновский фотон рассеивается на электроны, электрон приобретает некоторую энергию и импульс, в результате чего **длина волны рассеянного фотона увеличивается.**
- Классическая волновая теория рассеяния света** оказалась бессильной в объяснении эффекта Комптона.
 - Согласно этой теории, рассеяние света связано с возникновением в веществе под действием падающего света вторичных электромагнитных волн той же частоты (длины волны).
- Из квантовой теории рассеяния света разность $\Delta\lambda$ равна:**

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_0 = 2 \frac{h}{mc} \sin^2 \frac{\theta}{2} \rightarrow \lambda_k = \frac{h}{mc} = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

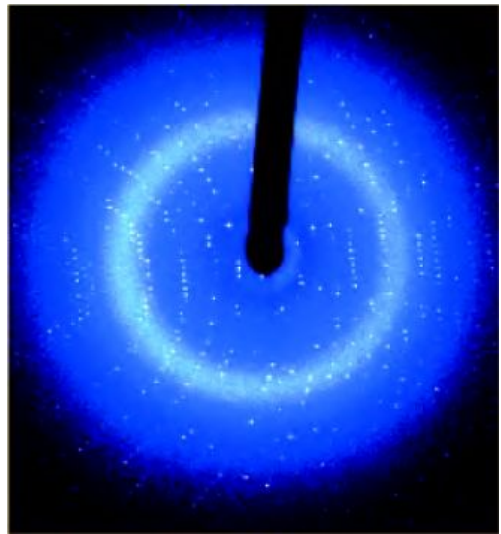


$$\lambda_{\text{пад}} = \lambda_{\text{расс}}$$

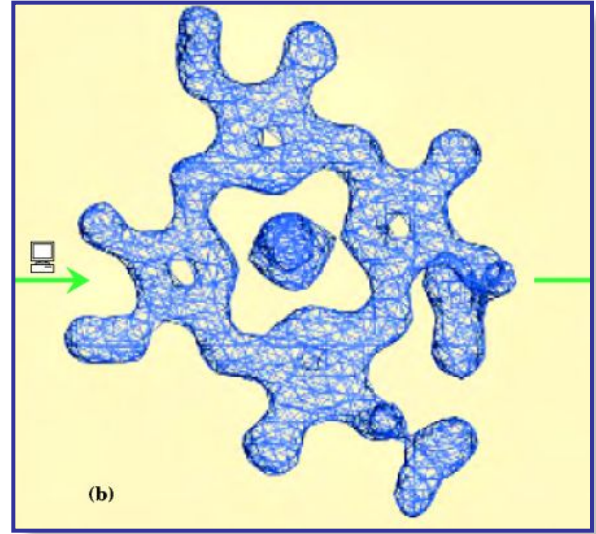
Применение когерентного рассеяния (рентгено-структурный анализ)



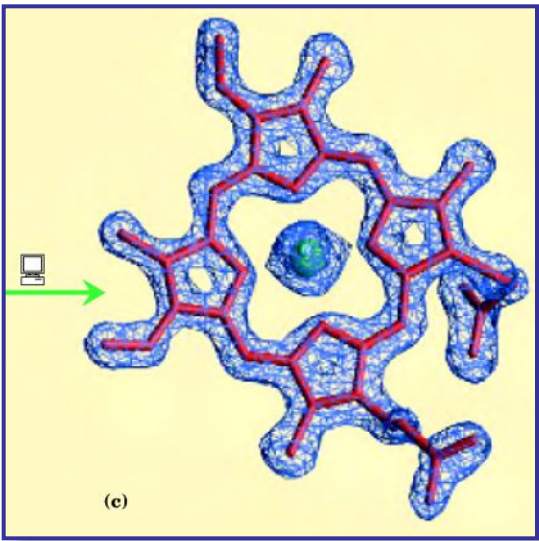
Спектр рассеяния рентгеновских лучей на молекуле: I - функция от угла θ



2D- изображение спектра рассеяния рентгеновских лучей на молекуле



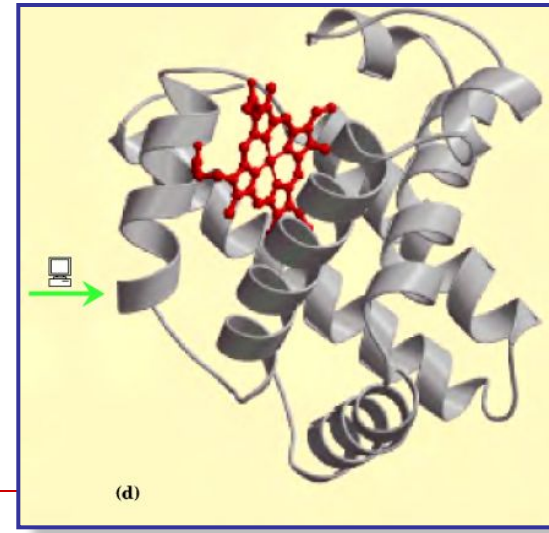
3D- карта электронной плотности гема (части молекулы)



По 3D-карте электронной плотности молекулы **моделируется** структура гема



Вычисляется **полная структура молекулы, включая гем**



Курс физики для студентов БГТУ
Заочный факультет
для специальностей ЛИД, ТДП, ТДП_с, МОЛК, МОЛК_с
Кафедра физики БГТУ
доцент Крылов Андрей Борисович

Часть V.
Оптика

Спасибо за внимание!