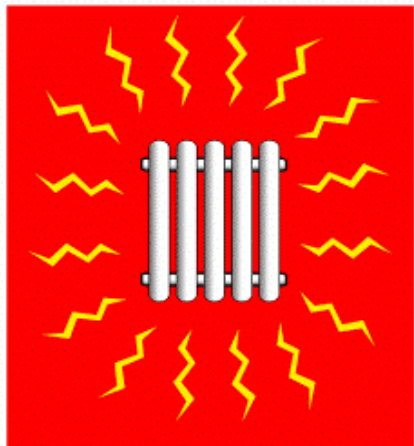


**Сегодня: понедельник, 1  
апреля 2024 г.**

# Введение в квантовую физику:



1. Классическая картина мира и необходимость введения квантовых представлений
2. Проблема равновесного электромагнитного излучения
3. Формула Рэля-Джинса. «Ультрафиолетовая катастрофа»
4. Необходимость квантовых представлений. Формула Планка
5. Законы теплового излучения

# Квантовая механика

- теория, описывающая динамику вещества в микроскопическом масштабе
- является жизненно важной для понимания физики твёрдых тел, лазеров, полупроводниковых и сверхпроводниковых приборов и т.д.
- Является основой всей современной физики (физики твёрдого тела, молекулярной, атомной, ядерной, физики элементарных частиц, оптики, термодинамики, статистической механики), химии, биологии

# Историческая справка

Физика (конец 19 века)

**Классическая механика**

(Ньютон, Лагранж, Гамильтон)

**Динамика частиц и материальных тел**

**Термодинамика**

(Лоренц, Джоуль, Клаузиус, Больцман, Кельвин)

**Взаимодействие между веществом и излучением**

**Электродинамика**

(Максвелл)

**Излучение**

# Необходимость квантовых представлений

1900	М. Планк	Излучение черного тела/ Понятие кванта $h\nu$
1905	А. Эйнштейн	СТО, Фотоэффект/Понятие фотона
1913	Н. Бор	Линейчатые спектры атомов/Модель $H_2$
1923	А. Комптон	Рассеяние фотонов на электронах
1924	В. Паули	Принцип запрета
1925	Л. Де Бройль	Волны материи
1926	Э. Шредингер	Волновое уравнение
1927	В. Гейзенберг	Принцип неопределенностей
1927	Дж. Дэвиссон и Дж. Джермер	Экспериментальное доказательство волновых свойств электронов
1927	М. Борн	Интерпретация волновой функции
1928	П. Дирак	Уравнение движения электрона

# Положения классической механики

Объект	Характеристики
Частица	энергия $E$ импульс $p$
<b>Волна</b>	амплитуда $A$ волновой вектор $k = 2\pi/\lambda$

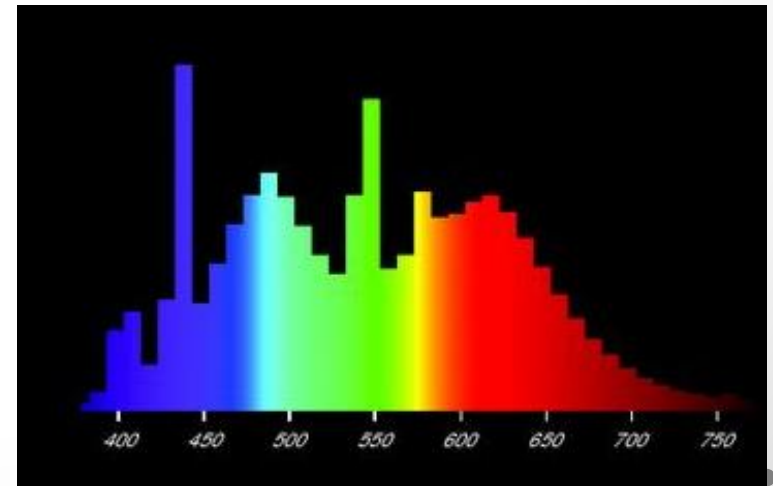
- ✓ частицы и волны обладают взаимноисключающими свойствами,
- ✓ волны могут обмениваться с частицами непрерывным количеством энергии

# Основные опытные факты

Тела, нагретые выше  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , начинают светиться, т.е. излучать видимый свет

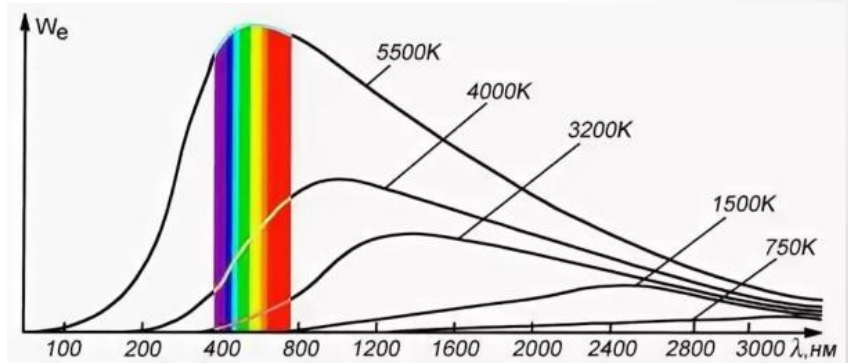
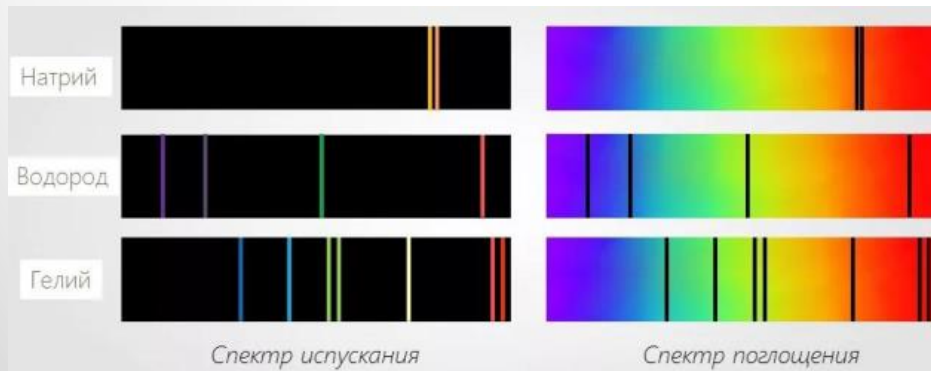


Характерной чертой теплового излучения является широкий сплошной спектр



# Свойства равновесного излучения

- происходит при любой температуре,
- имеет сплошной спектр,
- положение максимума спектра зависит от температуры тела
- при невысоких температурах излучаются лишь ЭМВ с большой длиной волны (ИК область спектра).
- с повышением температуры возрастает общая энергия испускаемого теплового излучения, а положение максимума перемещается (непрерывно) в область МАЛЫХ длин волн.



# Излучательная и поглощательная способность

**Поглощательная способность** - отношение энергии света, поглощенной телом, к энергии, падающего.

$$\alpha(\nu, T) = \frac{W_{\text{погл}}}{W_{\text{пад}}}$$

Для непрозрачных тел

$$W_{\text{пад}} = W_{\text{отр}} + W_{\text{погл}}$$

$\alpha$  - безразмерная величина, не превышающая единицы.  
Ее можно измерить по нагреванию тела

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

Предельные случаи:  $\alpha = 0$  – «абсолютно белое» - мел,  
 $\alpha = 1$  – «абсолютно черное тело» - сажа



# Количественные характеристики

$$U(T) = \frac{\varepsilon_0 E^2 + \mu_0 H^2}{2} = \int_0^\infty u_{\omega T} d\omega$$

Объемная плотность энергии

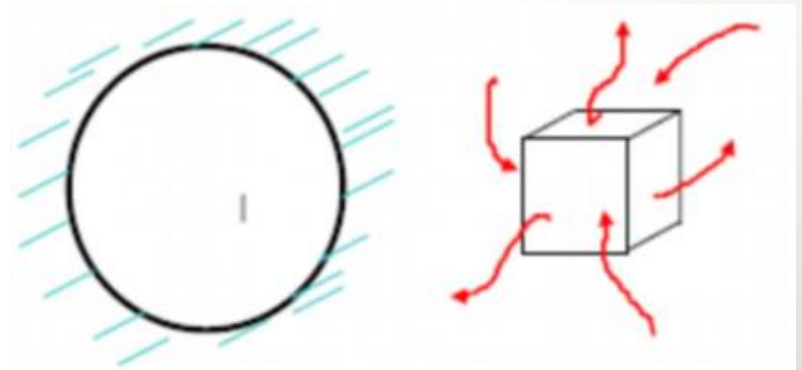
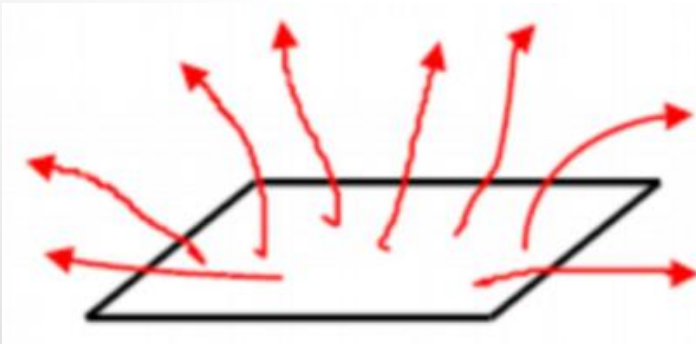
Характеристики равновесного теплового излучения:

## I. Через равновесие с телом

количество энергии, исходящее с единицы поверхности тела в единицу времени

## II. Излучение без тела

количество энергии, содержащееся в единице объема



# Спектральные характеристики

**Испускательная способность тела**  
 $r_{\omega T}$  - поток энергии ( $\Phi$ ),  
испускаемой в единицу времени ( $t$ )  
единицей поверхности тела ( $S$ ) в  
малом интервале частот ( $\omega \div \omega + d\omega$ ).

$$r_{\omega T} = r(\omega, T) = \frac{d\Phi}{dS \cdot d\omega}$$

$$[r_{\omega T}] = \frac{[d\Phi]}{[dS][d\omega]} = \frac{\text{Эрг}}{\text{см}^2} = \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$$

или длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$

$$r_{\lambda T} = r(\lambda, T) = \frac{d\Phi}{dS \cdot d\lambda}$$

$$[r_{\lambda T}] = \frac{[d\Phi]}{[dS][d\lambda]} = \frac{\text{Эрг}}{\text{см} \times \text{см}^3} = \frac{\text{Дж}}{\text{см} \times \text{м}^3}$$

**Спектральная плотность энергии излучения** - энергия излучения ( $W$ ) в единице объёма, приходящаяся на интервал частот от  $\omega$  до  $\omega + d\omega$ .

$$u_{\omega T} = u(\omega) = \frac{dW}{dV \cdot d\omega}$$

$$[u_{\omega T}] = \frac{[dW]}{[dV][d\omega]} = \frac{\text{Эрг} \times \text{с}}{\text{см}^3} = \frac{\text{Дж} \times \text{с}}{\text{м}^3}$$

$$u_{\lambda T} = u(\lambda) = \frac{dW}{dV \cdot d\lambda}$$

$$[u_{\lambda T}] = \frac{[dW]}{[dV][d\lambda]} = \frac{\text{Эрг}}{\text{см}^4} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^4}$$

# Связь между $r_{\omega T}$ и $r_{\lambda T}$

$$r_{\omega T} d\omega = r_{\lambda T} d\lambda \quad u_{\omega T} d\omega = u_{\lambda T} d\lambda$$

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}, \quad d\omega = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} d\lambda$$

минус = с возрастанием частоты длина волны убывает

$$r_{\omega T} = \frac{\lambda^2}{2\pi c} r_{\lambda T}$$

$$u_{\omega T} = \frac{\lambda^2}{2\pi c} u_{\lambda T}$$

**Поглощательная способность тела**  
отношение потока энергии  
поглощённого телом в некотором  
малом интервале частот  $d\omega$ , к  
потoku падающего на тело  
излучения в том же интервале  
частот

$$\alpha_{\omega T} = \frac{d\Phi_{\omega}^a}{d\Phi_{\omega}}$$

- безразмерная величина -

**Спектральный коэффициент  
поглощения  $a_{\omega T}$**  - отношение  
энергии излучения поглощённой  
телом в некотором малом  
интервале частот  $d\omega$ , к энергии  
излучения, падающего на тело в  
том же интервале частот

$$a_{\omega T} = \frac{dW_{\omega}^a}{dW_{\omega}}$$

# Интегральные характеристики

## Энергетическая светимость

$R = R(T)$  - поток энергии, испускаемый единицей поверхности тела во всем диапазоне длин волн за единицу времени по всем направлениям, т.е. в пределах телесного угла  $2\pi$ .

$$R(T) = \int_0^{\infty} r_{\omega T} d\omega \equiv \int_0^{\infty} r_{\lambda T} d\lambda$$

$$[R] = \text{Вт/м}^2, \text{ Эрг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2), \\ \text{Дж}/\text{с}\cdot\text{м}^2$$

## Плотность энергии $U = U(T)$ -

энергия излучения, в единице объёма.

$$U(T) = \int_0^{\infty} u_{\omega T} d\omega \equiv \int_0^{\infty} u_{\lambda T} d\lambda$$

$$[U] = \text{Дж}\cdot\text{с}/\text{м}^3$$

# Эмпирические законы излучения

- 1. Правило Прево:** если два тела поглощают различные количества энергии, то они и излучают разные количества энергии.
- 2. Закон Кирхгофа :** отношение испускательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела, оно является для всех тел универсальной функцией частоты и температуры

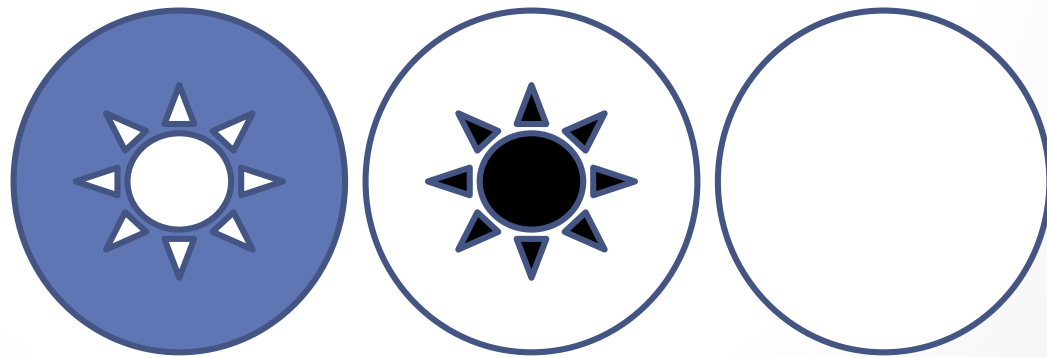
$$\left( \frac{r_{\omega T}}{\alpha_{\omega T}} \right)_1 = \left( \frac{r_{\omega T}}{\alpha_{\omega T}} \right)_2 = \dots = \frac{r_{\omega T}}{\alpha_{\omega T}} = f(\omega, T)$$

индексы 1,2,... соответствуют разным телам. Функция одинакова для всех тел, а сильнее поглощающее тело, будет и сильнее испускать - это испускательная способность абсолютно чёрного тела.

$$f(\omega, T) = \frac{c}{4} u(\nu, T)$$

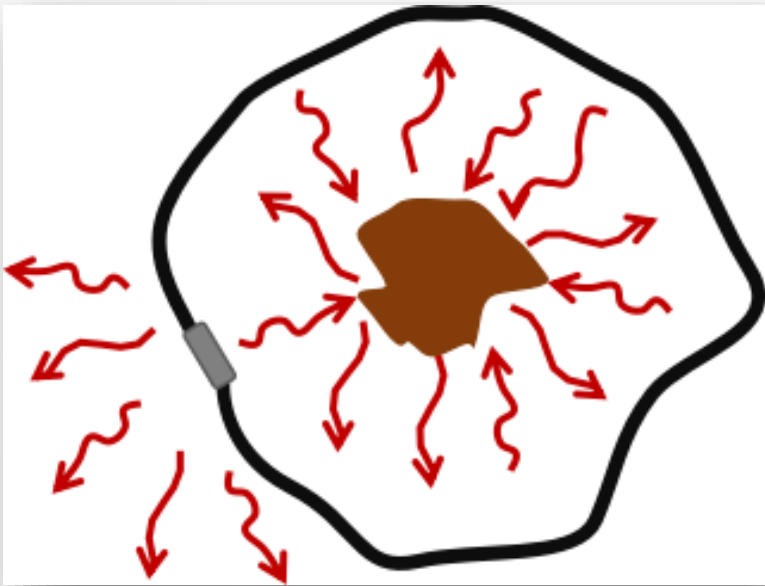
универсальная функция частоты и температуры тела  
– **излучательная способность абсолютно черного тела**

$u(\nu, T)$  **Спектральная плотность  
излучения**



# Абсолютно черное тело

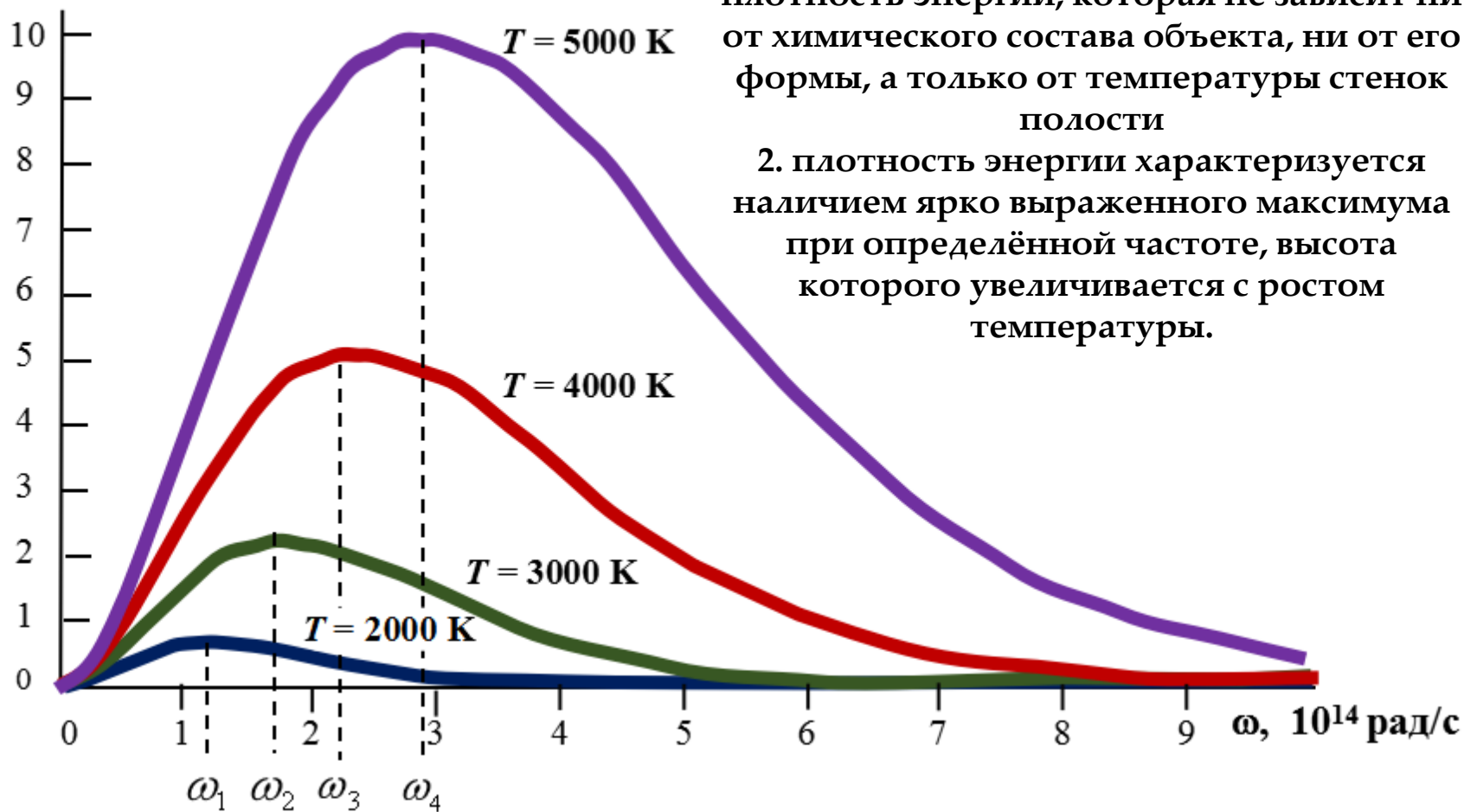
Тело, поглощающее все падающее на него излучение



$$\alpha_{\omega T} = 1$$

Тело внутри  
адиабатической полости

$u, 10^{-16} \text{ Дж/м}^3 \cdot \text{Гц}$



1. каждой частоте соответствует плотность энергии, которая не зависит ни от химического состава объекта, ни от его формы, а только от температуры стенок полости

2. плотность энергии характеризуется наличием ярко выраженного максимума при определённой частоте, высота которого увеличивается с ростом температуры.

**Вывод:** поскольку пик спектра излучения приходится на частоту, пропорциональную температуре, то это является основной причиной изменения цвета нагретого объекта по мере повышения его  $T$ .



## Связь между $u$ и АЧТ

Допустим, что внутри полости с АЧ стенками через любую точку во всех направлениях проходит поток энергии одинаковой плотности  $u(\omega, T)$ .  $T = const$ . Считаем энергию излучения выходящего из отверстия площадью  $\Delta S$  в телесном угле  $d\Omega$  в направлении угла  $\theta$ .

Объем цилиндра  $V = c\Delta t\Delta S \cos \theta$

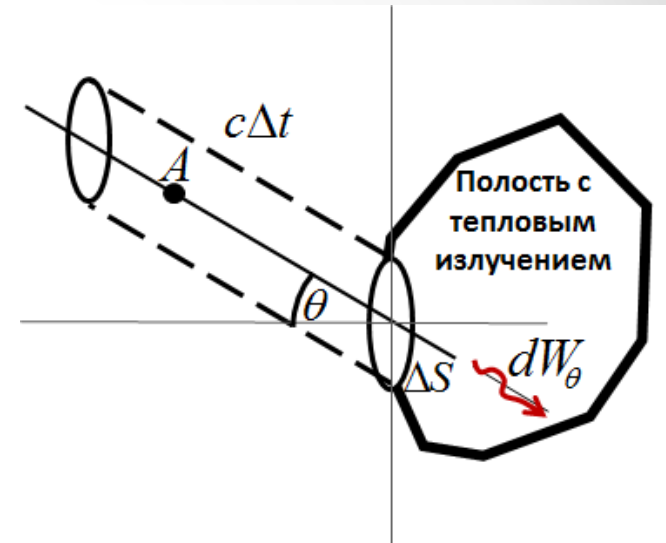
Энергия теплового излучения в нем

$$W = U(T)V = cU\Delta t\Delta S \cos \theta$$

В телесный угол попадает только часть энергии

$$dW_\theta = W \frac{d\Omega}{8\pi} = \frac{cU(T)\Delta t\Delta S \sin \theta \cos \theta d\theta 2\pi}{8\pi}$$

$$\Delta W = \frac{cU(T)}{4} \Delta t\Delta S \int_0^\pi \sin \theta \cos \theta d\theta = \frac{cU(T)}{4} \Delta t\Delta S \frac{\sin^2 \theta}{2} \Big|_{-\pi/2}^{\pi/2} = \frac{cU(T)}{4} \Delta t\Delta S$$



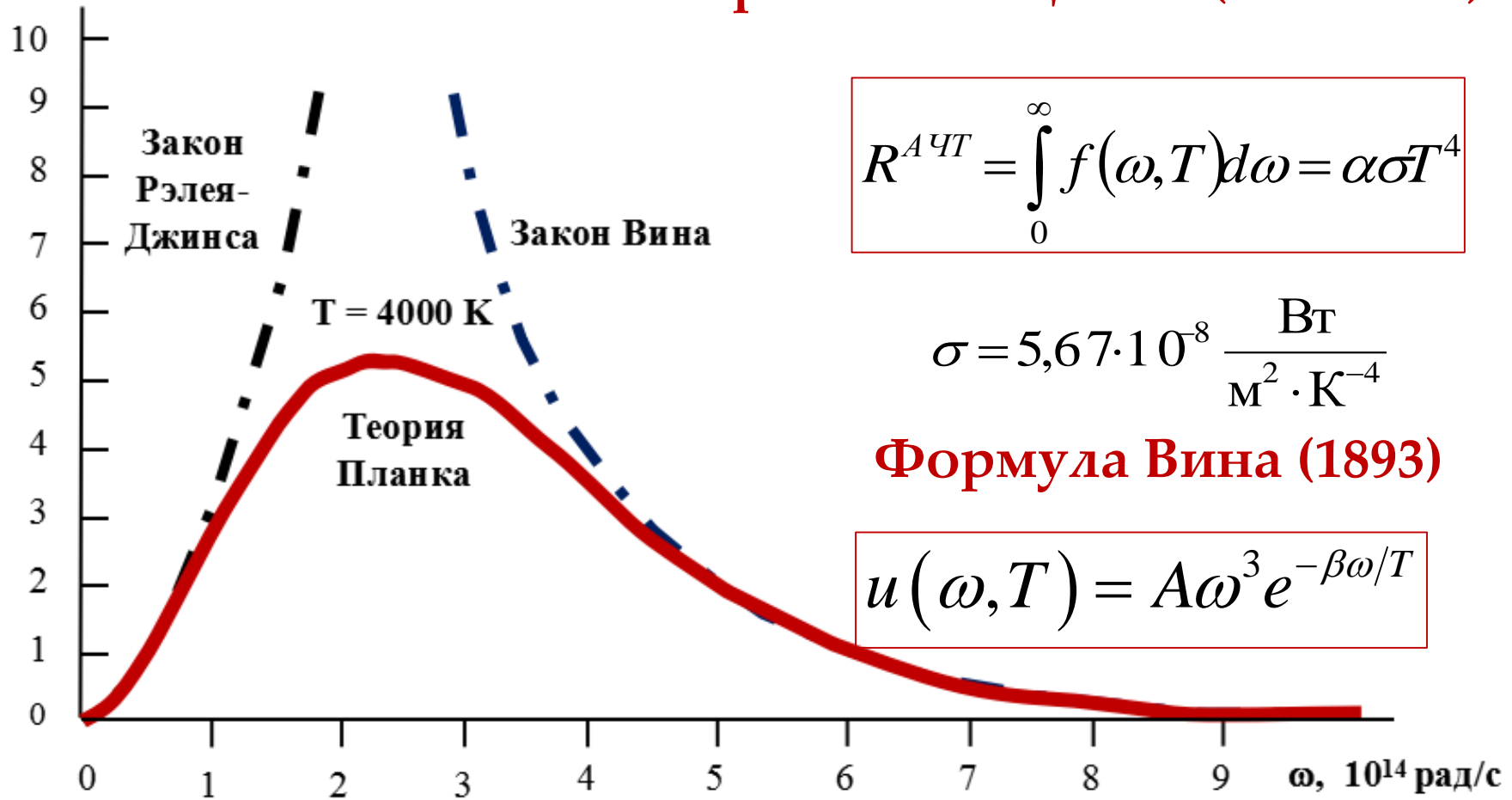
$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$$

$$R^{AЧТ}(T) = \frac{\Delta W}{\Delta t \cdot \Delta S} = \frac{c}{4} U(T)$$

$$r_{\omega T}^{AЧТ} = f(\omega, T) = \frac{c}{4} u(\omega, T)$$

$u, 10^{-16}$  Дж/м<sup>3</sup>·Гц

## Закон Стефана–Больцмана (1879-1884)



$$R^{AЧТ} = \int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega = \alpha \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

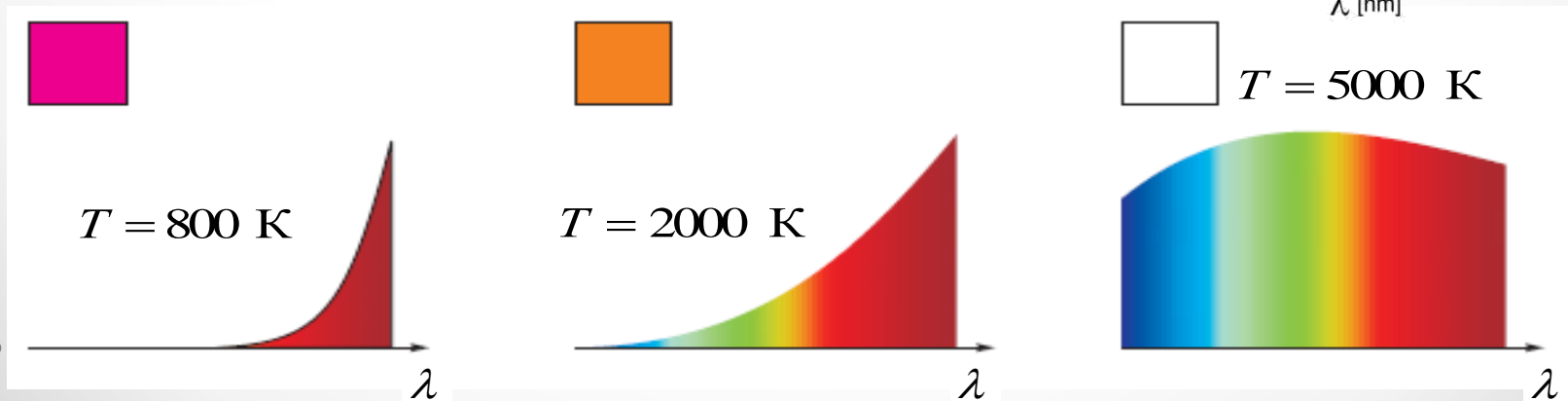
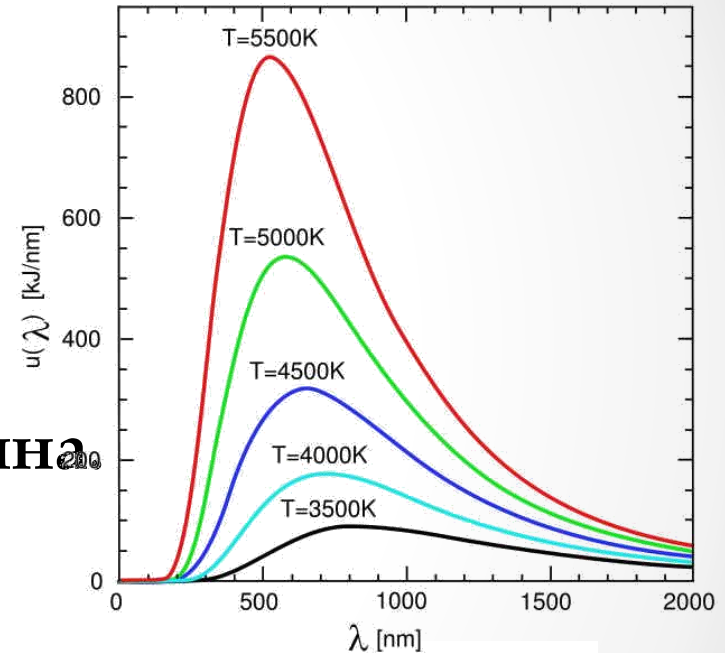
## Формула Вина (1893)

$$u(\omega, T) = A \omega^3 e^{-\beta \omega / T}$$

**Закон смещения Вина:** Длина волны в спектре излучения АЧТ, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости обратно пропорциональна температуре черного тела.

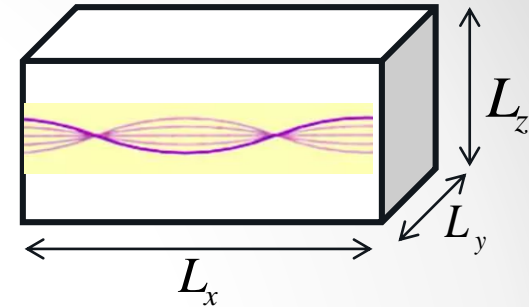
$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

$b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  - Постоянная Вина



# Теория Рэля-Джинса

1. Плотность - прямоугольный ящик.
2. При  $T$  заполнена равновесным тепловым излучением.
3. Стенки полости абсолютно непроницаемы.
4. Непрерывный обмен энергией между излучением и атомами стенок
5. Излучение в полости - система стоячих электромагнитных волн вдоль оси  $x$  – *классических осцилляторов электромагнитного поля.*
6. возможные значения  $k$



$$L_x = \frac{n\lambda}{2}, n = 1, 2, 3, \dots$$

$$k_x = \frac{\pi}{\lambda} = n \frac{\pi}{L_x}, n = 1, 2, 3, \dots$$

$n$  нумерует разные типы волн, существующих на струне для длины  $L_x$

Поэтому число типов стоячих электромагнитных волн с проекциями волнового вектора в интервале  $dk_x$  равно

$$dn_x = dk_x \frac{L_x}{2\pi}, \quad dn_y = dk_y \frac{L_y}{2\pi}, \quad dn_z = dk_z \frac{L_z}{2\pi}$$

•  $1/2$  - потому что стоячие волны с  $k_x$  и  $-k_x$  – это одно и тоже колебание: для стоячих волн направления распространения не существует

Полное число колебаний, волновые векторы которых лежат в интервале  $dk$

$$dN = 2dn_x dn_y dn_z = 2dk_x dk_y dk_z \frac{L_x L_y L_z}{(2\pi)^3}$$

Введём пространство волнового вектора

2 учитывает поперечность электромагнитных волн: при данной  $\lambda$  колебания могут происходить в двух взаимно перпендикулярных направлениях

$$L_x L_y L_z = V \text{ - объем прямоугольной полости}$$

Используя сферические координаты, бесконечно малый объём в  $k$  - пространстве

$$dk_x dk_y dk_z = 4\pi k^2 dk$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$$

Опуская знак «минус», получим

$$dk_x dk_y dk_z = \frac{4\pi}{c^3} \omega^2 d\omega = \frac{32\pi^4}{\lambda^4} d\lambda$$

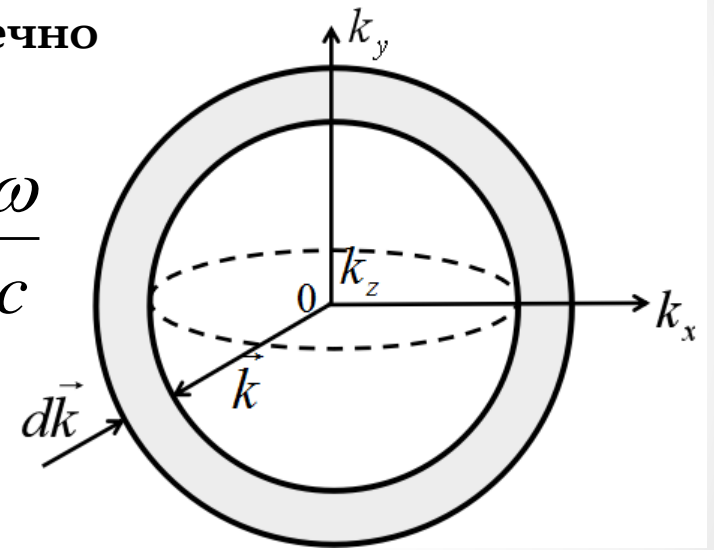
Таким образом, число колебаний на единичный объём

$$\frac{dN}{V} = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} d\omega = \frac{8\pi}{\lambda^4} d\lambda$$

**формула Рэля–Джинса:**

$$u_{\omega T} = kT \frac{dN}{V \cdot d\omega} = kT \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3}$$

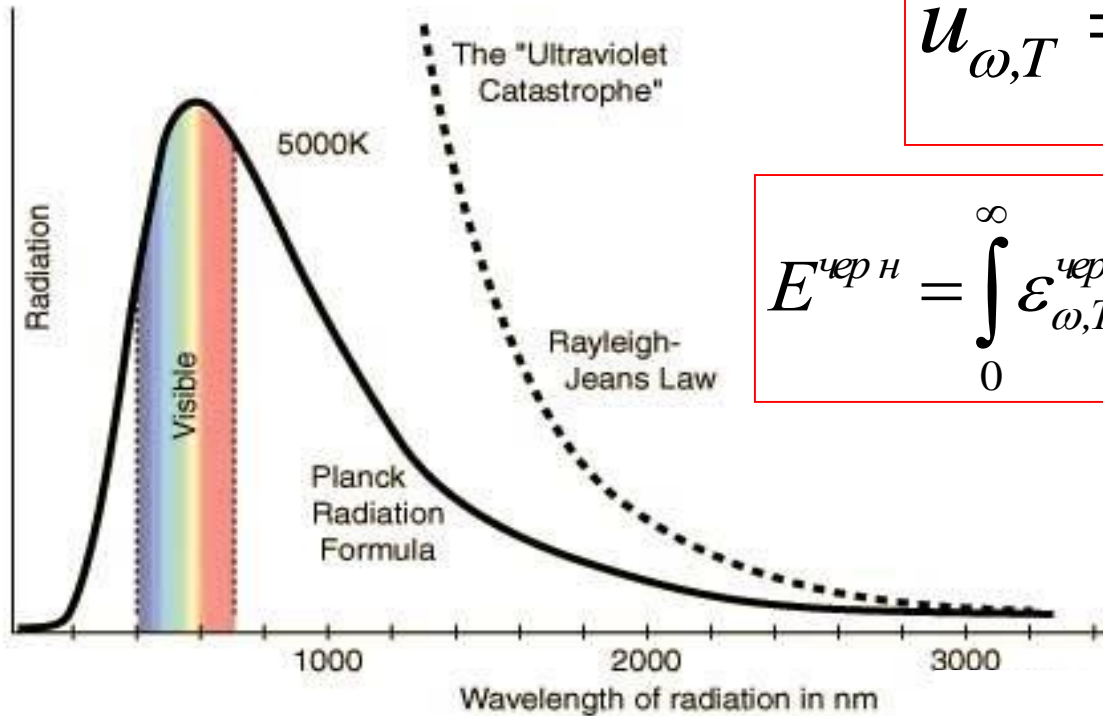
$$r_{\omega T}^{AЧТ} \equiv \frac{c}{4} u_{\omega T} = kT \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2}$$



# Формула Рэля-Джинса (1905)

$$u_{\omega, T} = kT \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3}$$

$$E^{\text{чep H}} = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\omega, T}^{\text{чep H}} d\omega = \frac{kT}{4\pi^2 c^2} \int_0^{\infty} \omega^2 d\omega \rightarrow \infty$$



Вся внутренняя энергия вещества должна мгновенно перейти в излучение, а вещество, охладится до нуля К – «ультрафиолетовая катастрофа».

# Формула Планка

$$u(\omega, T) \approx \begin{cases} \omega^2 T, & \omega \rightarrow 0 \\ \omega^3 e^{-\gamma\omega/T}, & \omega \rightarrow \infty \end{cases}$$

Формула Рэля  
Формула Вина

**М. Планк:** электромагнитная энергия испускается и поглощается не непрерывно, а отдельными порциями (квантами).

$$\varepsilon = \hbar\omega$$

$$\hbar \approx 1,05510^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$$

Постоянная Планка.

$$u(\omega, T) = \frac{1}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar\omega^3}{e^{\hbar\omega/(kT)} - 1}$$

$$u(\lambda, T) = \frac{16\pi^2 \hbar c}{\lambda^5} \frac{1}{e^{2\pi\hbar c/(\lambda kT)} - 1}$$

При высоких  $T$  (малых частотах):

$$\hbar\omega = \frac{\hbar c}{\lambda} \ll kT$$

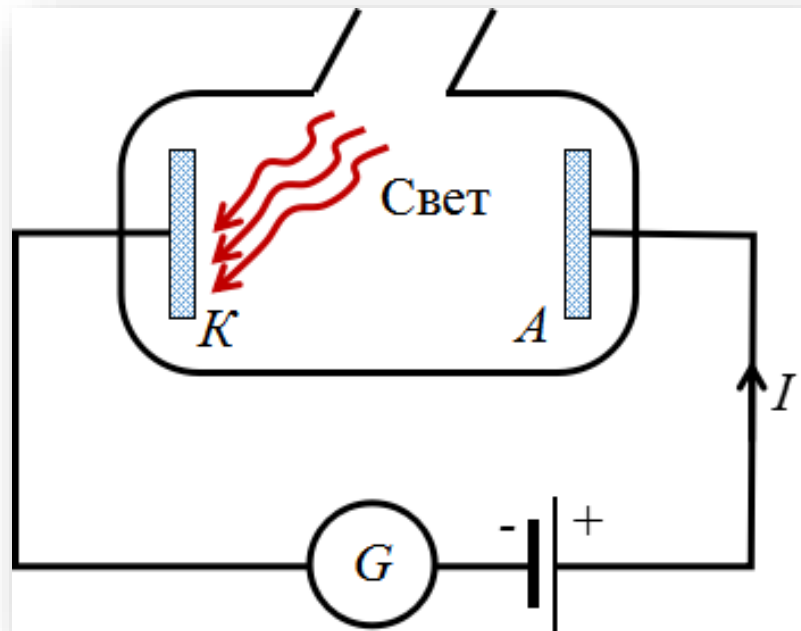
$$u(\omega, T) \approx \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar\omega}{1 + \frac{\hbar\omega}{kT} - 1} = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} kT$$

формула Рэля-Джинса

# Фотоэффект

(1887, Герц; 1888 Ленард и Столетов)

явление вырывания электронов с поверхности твёрдых и жидких тел под действием электромагнитного излучения

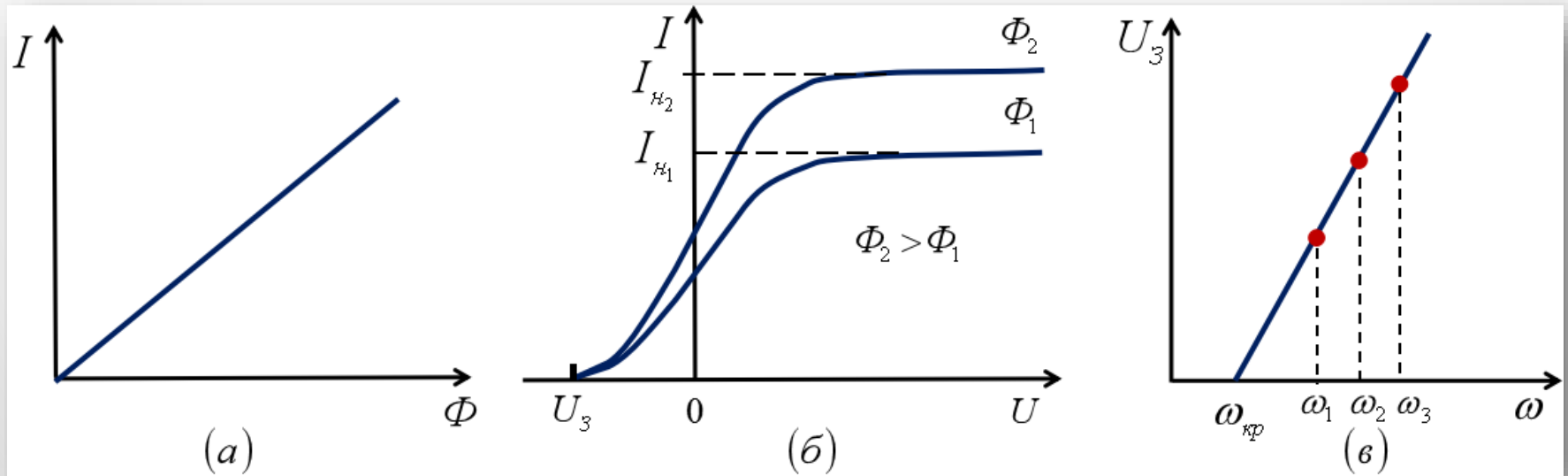


<https://simphy.com/weblets/photoelectric-effect/>



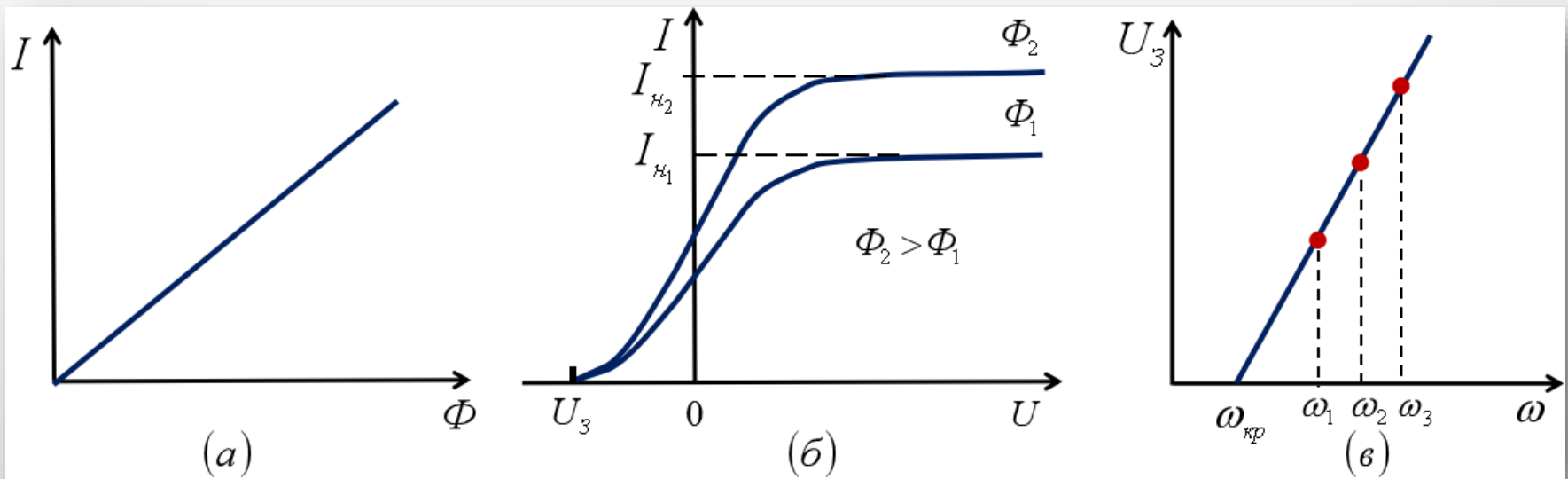
# Закономерности фотоэффекта

2. Существует некоторая критическая частота падающего света  $\omega_{кр}$  – **красная граница фотоэффекта**, – ниже которой для данного материала катода фотоэффект отсутствует независимо от величины интенсивности падающего излучения



# Закономерности фотоэффекта

3. Электроны покидают поверхность катода с кинетическими энергиями от 0 до  $K_{max}$ , которая возрастает линейно с частотой падающего излучения и не зависит от его интенсивности



# Объяснение фотоэффекта

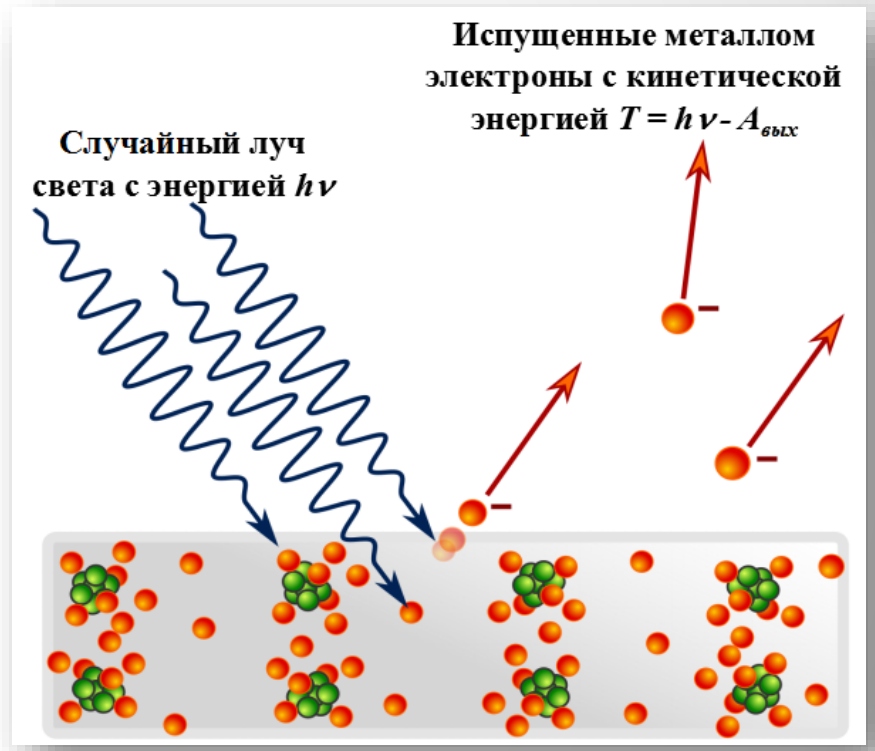
Гипотеза: свет испускается, поглощается квантами, и распространяется квантами:

$$E = \hbar\omega, \quad \vec{p} = \hbar\vec{k}$$

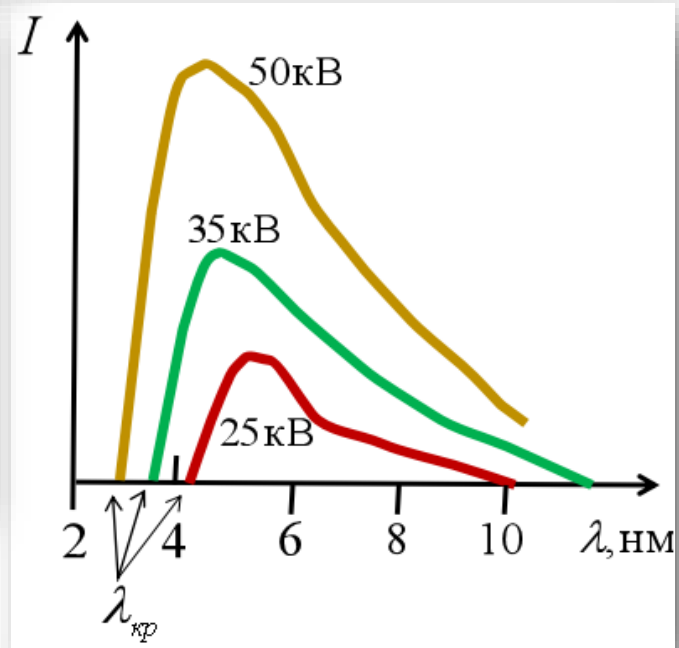
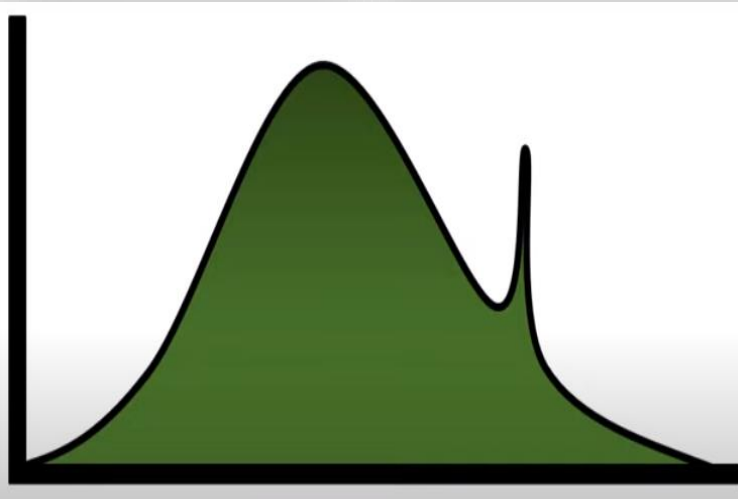
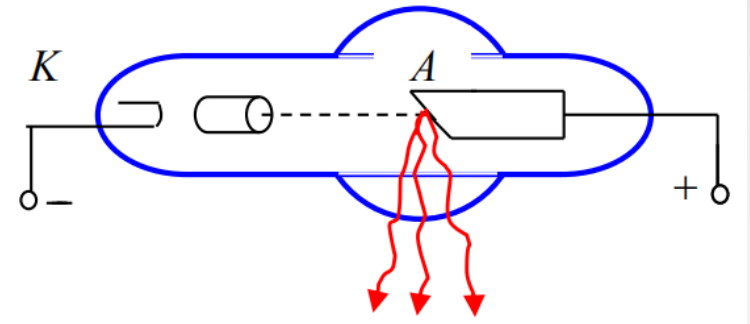
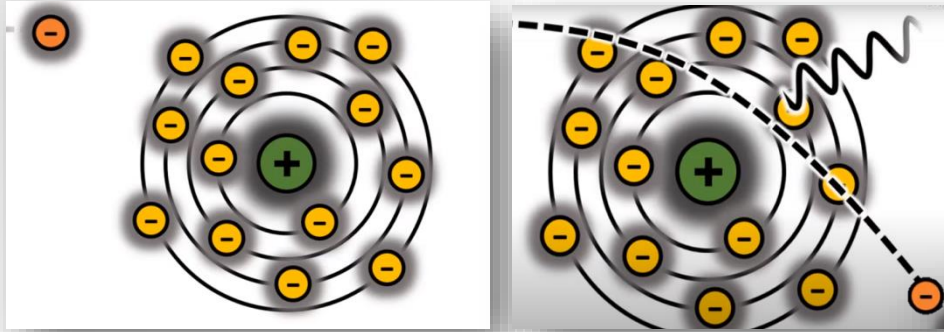
Уравнение Эйнштейна

$$\hbar\omega = T_{\max} + A_{\text{ВЫХ}}$$

$A_{\text{вых}}$  – наименьшая энергия, которую необходимо сообщить электрону, чтобы удалить его из вещества в вакуум



# Тормозное рентгеновское излучение



$$\lambda_{кр} = \frac{c}{\nu_{кр}} = \frac{ch}{eU}$$

# Давление света

Давление — это нормальная составляющая силы, действующей на единицу площади поверхности:

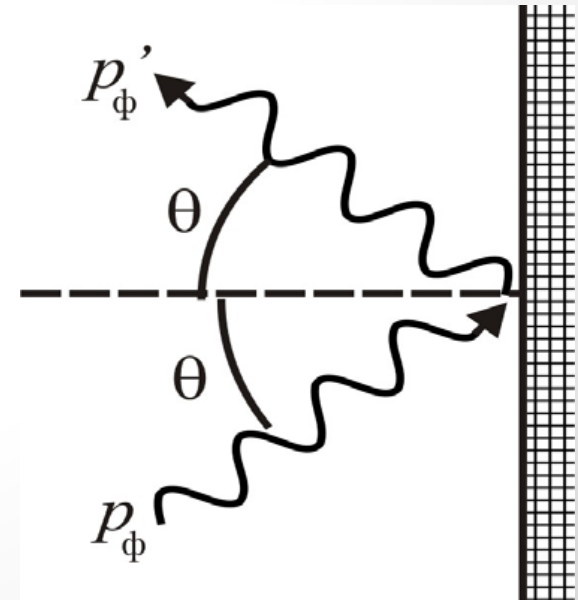
$$p = \frac{F_n}{S}$$

по II закону Ньютона

$dp$  — импульс, получаемый поверхностью вещества за время  $dt$ .

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Импульс равен импульсу поглощаемых фотонов, взятому со знаком «+» (на первом этапе), и импульсу испускаемых фотонов, взятому со знаком «-» (на втором этапе).



За время  $dt$  поверхностью  $S$  поглощаются все фотоны  $dN_\phi$ , находящиеся в объеме  $dV = c dt S \cos \Theta$

$$dN_\phi = n_\phi c dt S \cos \Theta$$

и несущие импульс

$$\begin{aligned} dp_\phi &= dN_\phi \cdot p_\phi = \left[ n_\phi c dt S \cos \Theta \right] \cdot \left[ \frac{\hbar \omega}{c} \right] = \\ &= n_\phi \hbar \omega S \cos \Theta dt \end{aligned}$$

Учтем, что импульс фотонов направлен под углом  $\theta$ . Тогда нормальная составляющая силы

$$\left( F_n \right)_{\text{ногл}} = \frac{dp_\phi \cos \Theta}{dt} = n_\phi \hbar \omega S \cos^2 \Theta$$

**Тангенциальная  
составляющая**

$$(F_{\tau})_{n o z l} = \frac{dp_{\phi} \sin \Theta}{dt} = n_{\phi} \hbar \omega S \cos \Theta \sin \Theta$$

**и давление**

$$P_{n o z l} = \frac{dF_n}{S} = n_{\phi} \hbar \omega \cos^2 \Theta = \frac{I}{c} \cos^2 \Theta$$

**Вычисление силы, действующей на площадку со стороны отраженного света, проводим аналогично. В формулах делаем замену  $I \rightarrow IR$  и учитываем изменение знака у тангенциальной:**

$$(F_n)_{o m p} = R \frac{dp_{\phi} \cos \Theta}{dt} = R n_{\phi} \hbar \omega S \cos^2 \Theta$$

$$(F_{\tau})_{o m p} = -R \frac{dp_{\phi} \sin \Theta}{dt} =$$

$$= -R n_{\phi} \hbar \omega S \cos \Theta \sin \Theta$$

$$P_{o m p} = \frac{IR}{c} \cos^2 \Theta$$

Объединяем оба соотношения и находим полное давление:

$$P = P_{\text{ногл}} + P_{\text{отр}} = \frac{I(1+R)}{c} \cos^2 \Theta$$

### Частные случаи

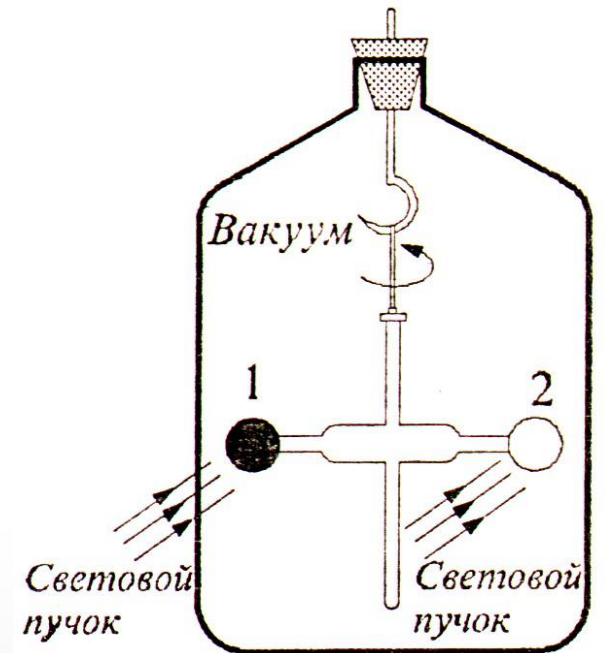
1) Давление при зеркальном отражении, когда  $R = 1$ :

$$P = \frac{2I}{c} \cos^2 \Theta$$

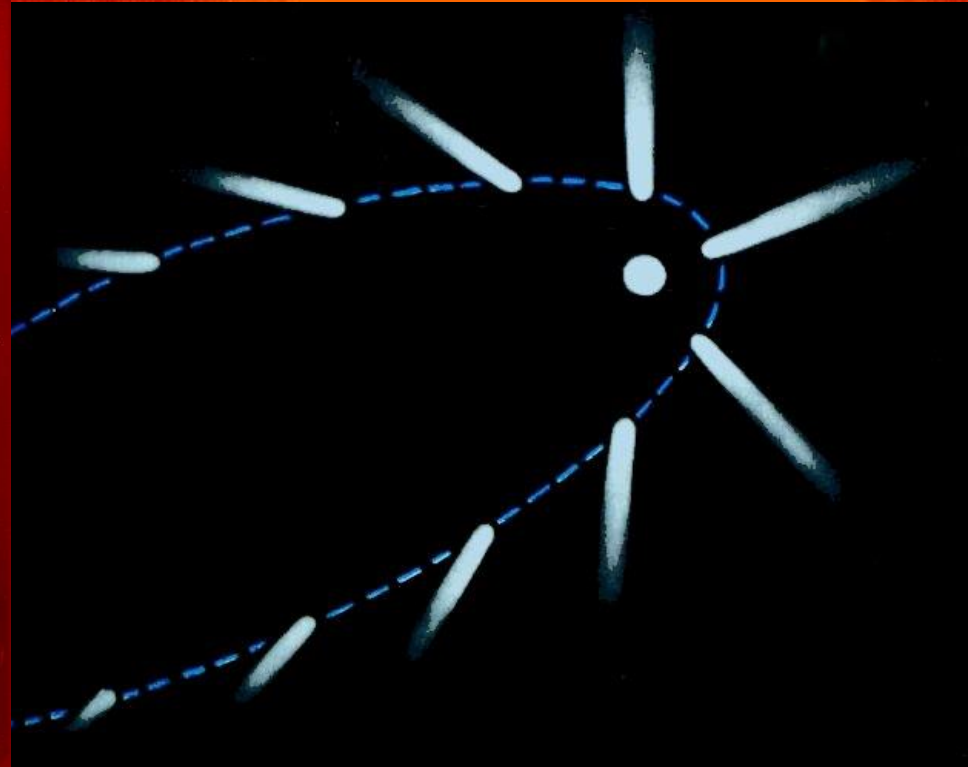
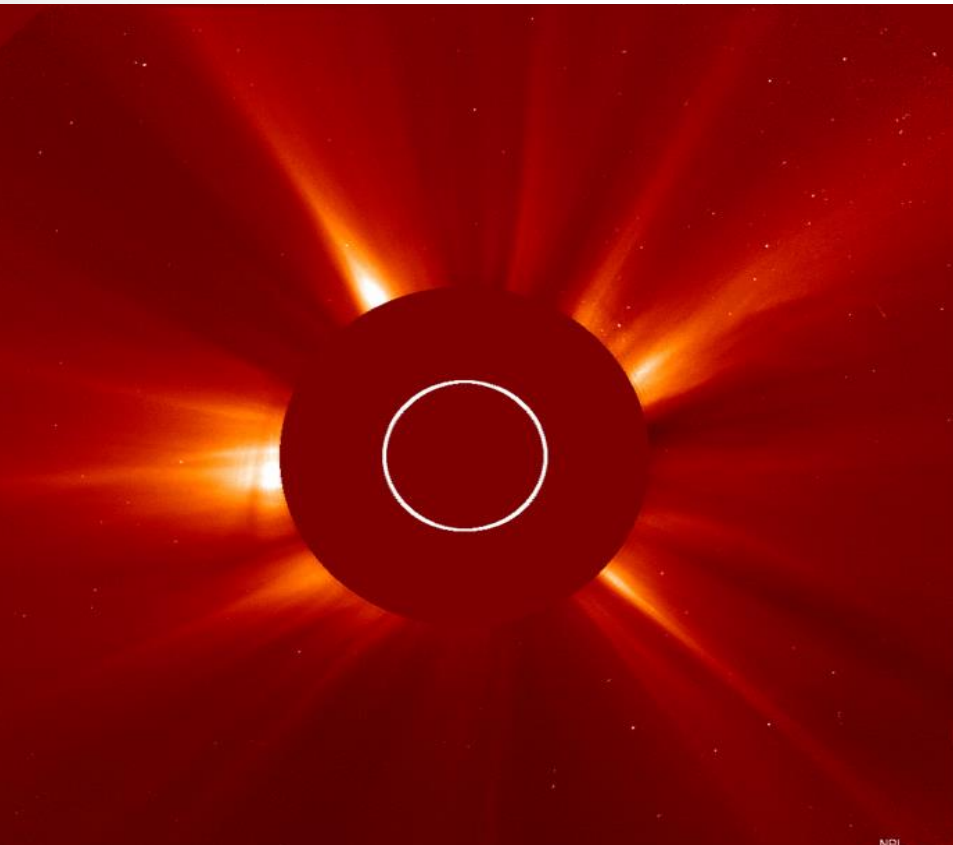
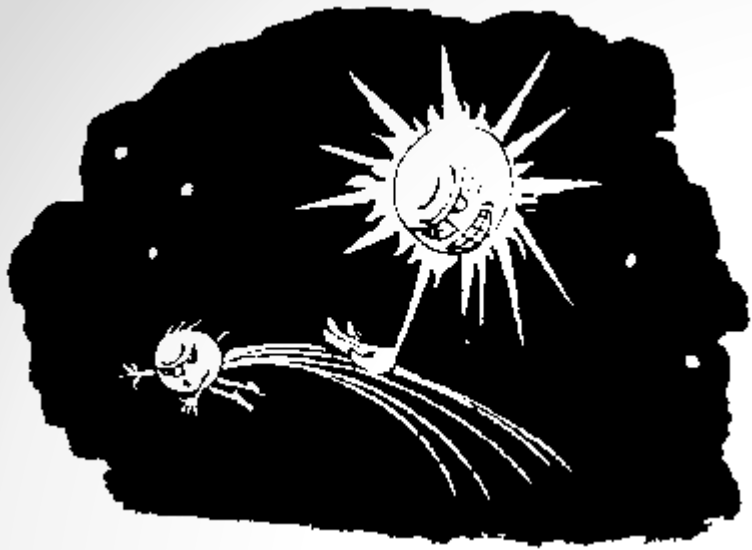
$$F_{\tau} = 0$$

2) Давление при нормальном падении и отражении

$$P = \frac{I(1+R)}{c}$$
$$F_{\tau} = 0$$





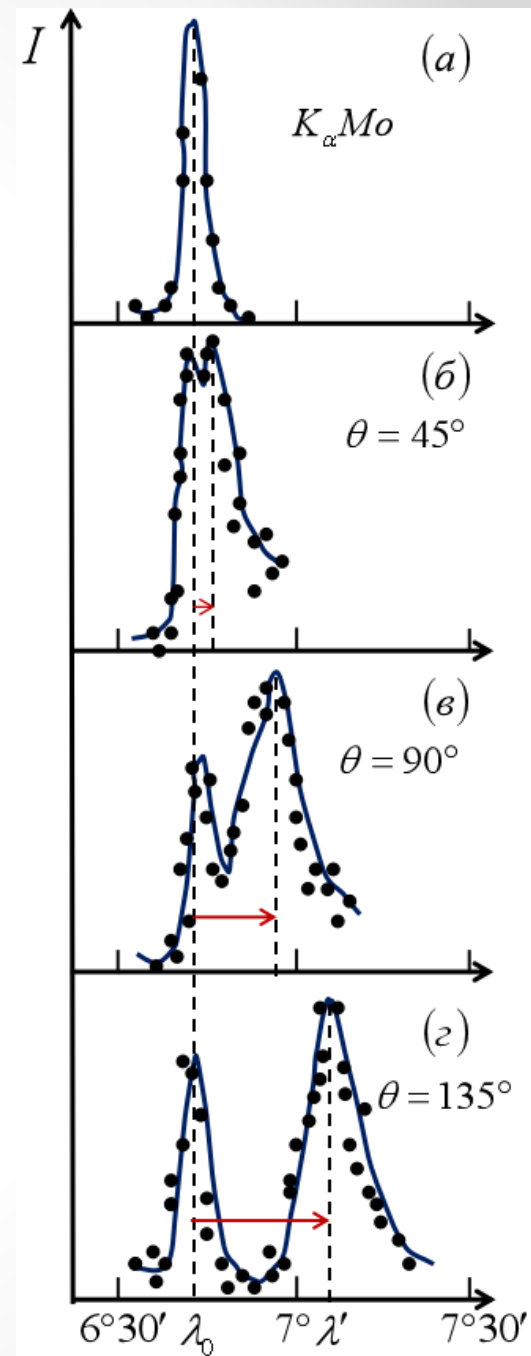


# Эффект Комптона

появление смещённой  
компоненты в рассеянном  
рентгеновском излучении



Волновая теория: но ведь электрон колеблется с частотой поля, т.е. излучает рассеянные волны той же частоты. Почему изменилась длина волны?



# Объяснение эффекта Комптона



Квантовая физика: излучение - упругое столкновение  $\gamma$ -фотонов с электронами вещества

В лёгких веществах энергия связи электрона с ядром меньше энергии кванта. Электроны свободные.

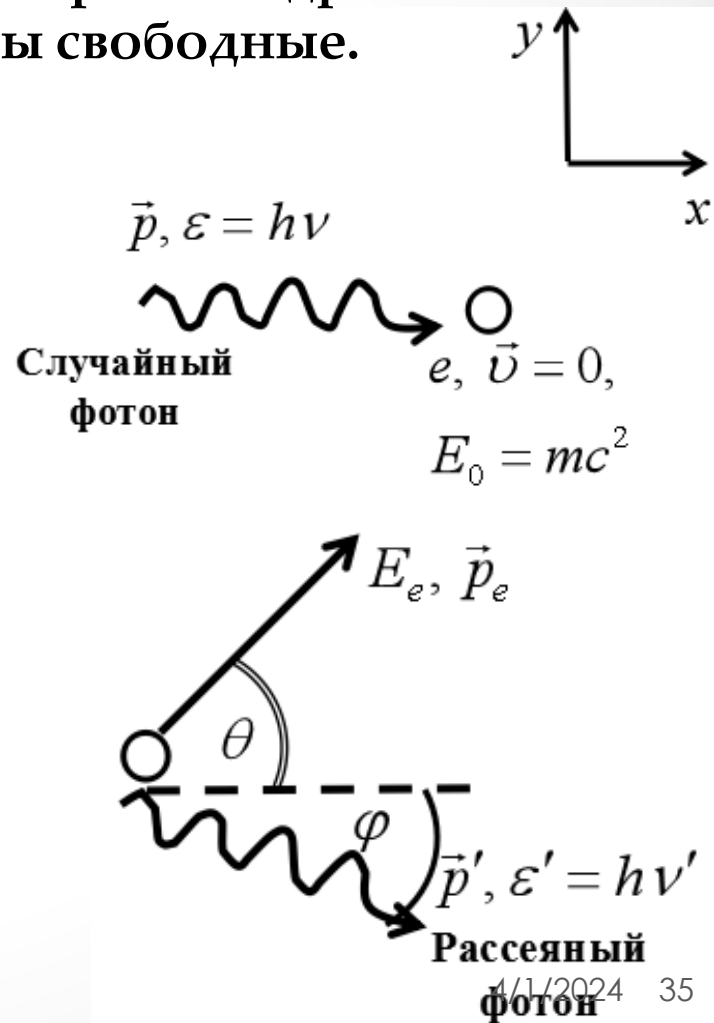
$$\vec{p} = \vec{p}_e + \vec{p}'$$

$$(\vec{p} - \vec{p}')^2 = \vec{p}_e^2$$

$$\vec{p}^2 - 2\vec{p}\vec{p}' + \vec{p}'^2 = \vec{p}_e^2$$

$$p^2 - 2pp' \cos \varphi + p'^2 =$$

$$\frac{h^2}{c^2} (\nu^2 - 2\nu\nu' \cos \varphi + \nu'^2) = p_e^2$$



# Энергии электрона до и после столкновения

$$E_0 = m_e c^2$$

$$E_e = \sqrt{\vec{p}_e^2 c^2 + m_e^2 c^4} = h \sqrt{\nu^2 - 2\nu\nu' \cos\varphi + \nu'^2} + \frac{m_e^2 c^4}{h^2}$$

# Энергии фотонов

$$\varepsilon = h\nu$$

$$\varepsilon' = h\nu'$$

закон сохранения :

$$\varepsilon + E_0 = \varepsilon' + E_e$$

$$h\nu + m_e c^2 = h\nu' + h \sqrt{\nu^2 - 2\nu\nu' \cos\varphi + \nu'^2} + \frac{m_e^2 c^4}{h^2}$$

$$\nu - \nu' + \frac{m_e c^2}{h} = \sqrt{\nu^2 - 2\nu\nu' \cos\varphi + \nu'^2} + \frac{m_e^2 c^4}{h^2}$$

$$\frac{1}{\nu'} - \frac{1}{\nu} = \frac{h}{m_e c^2} (1 - \cos \varphi) = \frac{2h}{m_e c^2} \sin^2 \left( \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \varphi) = 2\lambda_C \sin^2 \left( \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$\lambda_C = h / (m_e c) = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

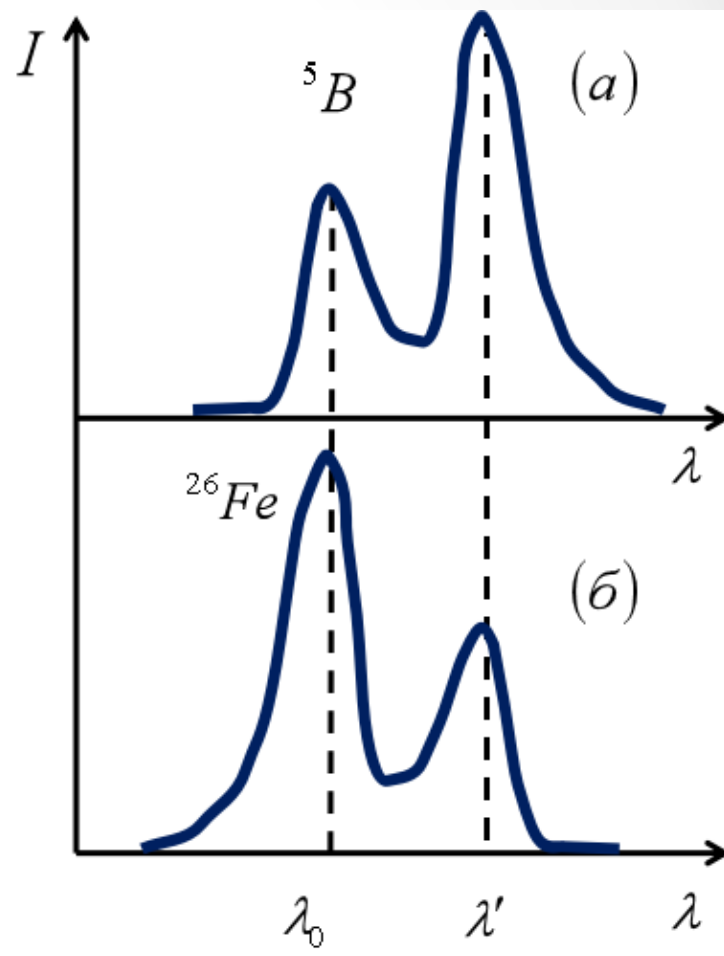
**смещение длины волны рентгеновских лучей не зависит от частоты падающих фотонов и определяется только величиной угла, под которым они рассеиваются.**

**Наличие  $h$ : явление подчиняется законам квантовой механики**

# Интенсивности смещённой и несмещённой компонент

Для лёгких элементов:  
рассеяние фотонов на  
свободных электронах, слабо  
связанных с ядром =  
**интенсивность смещённой  
линии спектра больше**

Для тяжёлых элементов: число  
связанных электронов растёт =  
при фиксированном угле  
рассеяния **интенсивность  
несмещённой линии больше**



# О КОМПТОНОВСКОЙ ДЛИНЕ ВОЛНЫ

$$\lambda_C = h / (m_e c) = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

- ✓ **Фундаментальный масштаб длины в физике.**
- ✓ **Определяет область применимости классической электродинамики: на расстояниях  $\leq \lambda_C$  классическая электродинамика не справедлива.  
(не действует закон Кулона)**

# Итого

тепловое излучение  
фотоэффекта  
рассеяние Комптона  
образование пар



двойственный  
характер  
электромагнитных  
волн