

Глава 6. Квантовая природа излучения.

§ 6.1. Тепловое излучение.

Квантовая оптика — раздел оптики, занимающийся изучением явлений, в которых проявляются квантовые свойства света.

Люминесценцией называется неравновесное излучение, избыточное при данной температуре над тепловым излучением тела и имеющее длительность, большую периода световых колебаний.

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ – излучение вызванное нагреванием тел. Совершается за счет энергии теплового движения атомов и молекул (внутренней энергии), характерно для всех тел при $T > 0$ К.

Тепловое излучение – равновесный процесс, т. е. тело в единицу времени поглощает столько же энергии, сколько и излучает.

Количественной характеристикой теплового излучения служит **спектральная плотность энергетической светимости** (испускательная способность) тела $R_{\nu,T}$ — мощность излучения с единицы площади поверхности тела в интервале частот единичной ширины.

$$R_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}^{\text{ИЗЛ}}}{d\nu}$$

Энергетическая светимость:

$$R_T = \int_0^{\infty} R_{\nu,T} d\nu$$

т.к. $\lambda = \frac{c}{\nu}$, то

$$R_{\nu,T} = R_{\lambda,T} \frac{d\lambda}{d\nu} = R_{\lambda,T} \frac{\lambda^2}{c}$$

Способность тел поглощать падающее на них излучение характеризуется **спектральной поглощательной способностью** $A_{\nu,T}$, показывающей, какая доля энергии

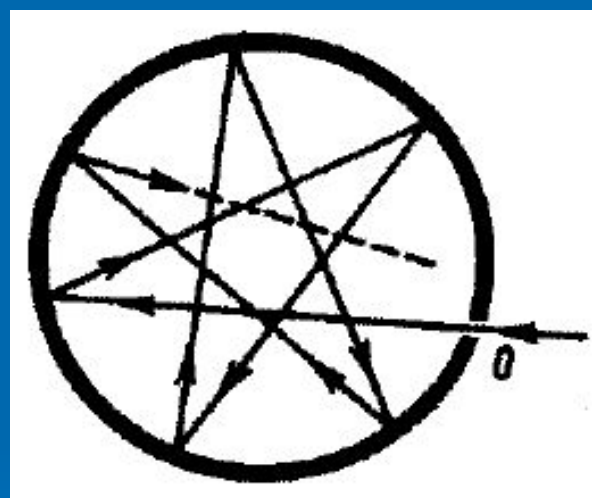
$$A_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}^{\text{ПОГЛ}}}{dW_{\nu,\nu+d\nu}}$$

$dW_{\nu,\nu+d\nu}$, приносимой за единицу времени на единицу площади тела падающими на нее электромагнитными волнами с частотами от ν до $\nu + d\nu$, поглощается телом.

Тело, способное поглощать при любой температуре все падающее на него излучение любой частоты называется **абсолютно черным телом (АЧТ)**.

$$A_{\nu, T}^{\text{Ч}} \equiv 1$$

Модель АЧТ



Наряду с понятием черного тела используют понятие серого тела — тела, поглощательная способность которого меньше единицы, но одинакова для всех частот и зависит только от температуры, материала и состояния поверхности тела:

$$A_{\nu, T} = A_T = \text{const} < 1$$

§ 6.2. Закон Кирхгофа.

Отношение испускательной и поглощательной способностей тела не зависит от природы тела и является универсальной для всех тел функцией частоты и температуры $r_{\nu, T}$

**Закон
Кирхгофа**

$$\frac{R_{\nu, T}}{A_{\nu, T}} = r_{\nu, T}$$

Для черного тела $A_{\nu, T}^{\text{ч}} \equiv 1$, поэтому **универсальная функция Кирхгофа** $r_{\nu, T}$ есть спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность) черного тела.

$$r_{\nu, T} = R_{\nu, T}$$

§ 6.3. Закон Стефана-Больцмана. Закон смещения Вина.

Энергетическая светимость серого тела (интегральная по ν):

$$R_T^c = \int_0^{\infty} A_{\nu,T} r_{\nu,T} d\nu = A_T \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = A_T R_e \quad \text{где } R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu \text{ —}$$

энергетическая светимость черного тела, которая зависит только от температуры. Эту зависимость описывает экспериментальный **закон Стефана-Больцмана**: энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени термодинамической температуры:

$$R_e = \sigma T^4$$

(следовательно $R_T^c = A_T \sigma T^4$)

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — **постоянная Стефана-Больцмана**.

Закон Стефана-Больцмана ничего не говорит о спектральном составе излучения черного тела. Положение максимума в спектре его излучения описывается экспериментальным **законом смещения Вина**:

Длина волны λ_{max} , при которой излучательная способность $r_{\lambda,T}$ черного тела максимальна, обратно пропорциональна его термодинамической температуре:

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

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К — **постоянная Вина**.

§ 6.4. ФОРМУЛА Рэлея-Джинса.

Применяя к тепловому излучению классический закон *равнораспределения* энергии по степеням свободы Рэлей и Джинс получили выражение для зависимости испускательной способности черного тела $r_{\nu,T}$ от частоты света:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \langle \varepsilon \rangle = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

где $\langle \varepsilon \rangle = kT$ — средняя энергия осциллятора с собственной частотой ν

Однако попытка получить закон Стефана-Больцмана из этой формулы приводит к **абсурдному** результату — R_e неограниченно растет, достигая чрезвычайно больших значений в ультрафиолете, — который получил название "**ультрафиолетовая катастрофа**":

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = \frac{2\pi kT}{c^2} \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty$$

§ 6.5. ФОРМУЛА ПЛАНКА.

Гипотеза М. Планка: Излучение энергии происходит не непрерывно, а определенными порциями – **квантами**.

Энергия кванта:

$$\varepsilon_0 = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \hbar\omega$$

где $h = 2\pi\hbar = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — **постоянная Планка**

Поскольку энергия излучается порциями, то **энергия осциллятора** может принимать лишь определенные дискретные значения, кратные целому числу квантов:

$$\varepsilon = n h \nu \quad (n = 1, 2, \dots)$$

Вероятность того, что энергия колебания осциллятора равна ε_i

$$P_i = \frac{N_i}{N} = \frac{\exp(-\varepsilon_i/kT)}{\sum_i \exp(-\varepsilon_i/kT)}$$

Средняя энергия осцилляторов равна

ФОРМУЛА ПЛАНКА:

$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

$$r_{\lambda, T} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1}$$

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\varepsilon_0}{\exp\left(\frac{\varepsilon_0}{kT}\right) - 1}$$

(учитывая $c = \lambda\nu$, $r_{\lambda, T} = r_{\nu, T} c / \lambda^2$)

Зависимость максимальной спектральной плотности энергетической светимости от температуры:

$$\left(r_{\lambda, T} \right)_{\max} = CT^5$$

C – постоянная,
 $C = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/ м}^3 \cdot \text{ К}^5$

Таким образом формула Планка обобщает все законы теплового излучения и является полным решением основной задачи теории теплового излучения.

§ 6.6. Оптическая пирометрия.

Оптическая пирометрия – методы измерения высоких температур, использующие зависимость спектральной плотности энергетической светимости тел от температуры.

Приборы, служащие для измерения температуры, нагретых тел по интенсивности их теплового излучения в оптическом диапазоне спектра называются **пирометрами**.

Различают три температуры :

радиационную, цветовую, яркостную

Радиационная $T_{\text{рад}}$ – температура АЧТ, при которой его энергетическая светимость R_e равна энергетической светимости R_T исследуемого тела.

$$T_{\text{рад}} = T \sqrt[4]{A_T} \quad \text{т.к.} \quad A_T < 1 \quad \text{то} \quad T_{\text{рад}} < T_{\text{ист}}$$

Цветовая $T_{\text{цв}}$ – температура черного тела, при которой отношение спектральных энергетических яркостей для двух заданных длин волн одинаково с исследуемым телом.

$$T_{\text{цв}} = \frac{b}{\lambda_{\text{max}}}$$

$$T_{\text{цв}} = T_{\text{ист}}$$

Яркостная $T_{\text{яр}}$ – температура черного тела, при которой его спектральная энергетическая яркость равна спектральной энергетической яркости исследуемого излучения при той же длине волны.

$$r_{\lambda, T_{\text{яр}}} = R_{\lambda, T}$$

$$\text{т.к.} \quad A_T < 1$$

$$\text{то} \quad T_{\text{яр}} < T_{\text{ист}}$$

Глава 7. ФОТОНЫ.

§ 7.1. Фотоэффект

Фотоэлектрическим эффектом (фотоэффектом) называется высвобождение электронов под действием электромагнитного излучения.

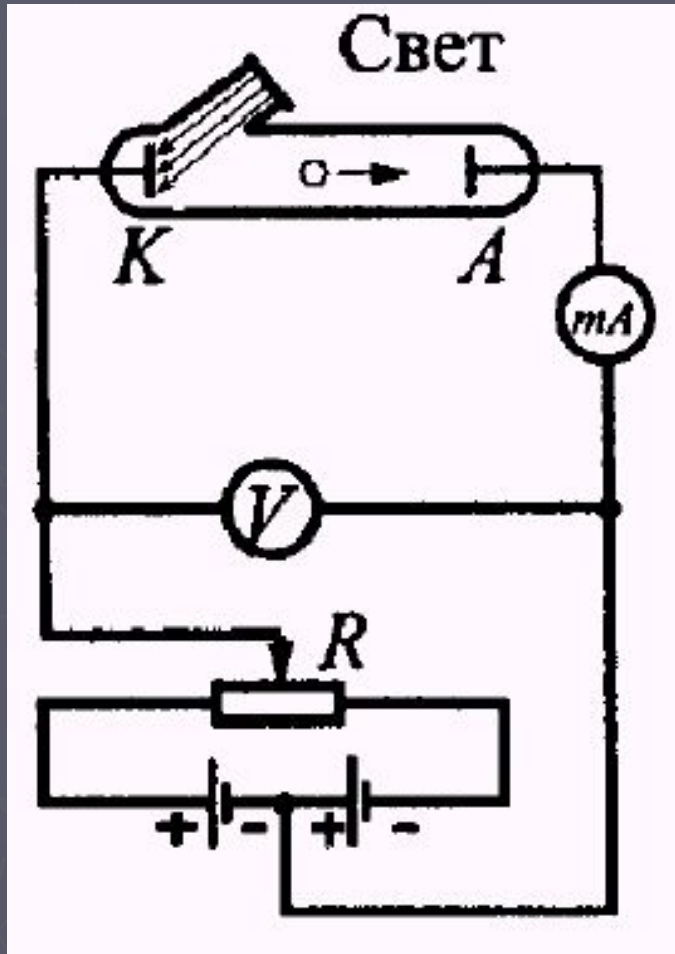
Различают фотоэффект *внутренний, вентильный и внешний*.

Внутренний фотоэффект — это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу. В результате концентрация носителей тока внутри тела увеличивается, что приводит к возникновению **фотопроводимости** — повышению электропроводности полупроводника или диэлектрика при его освещении.

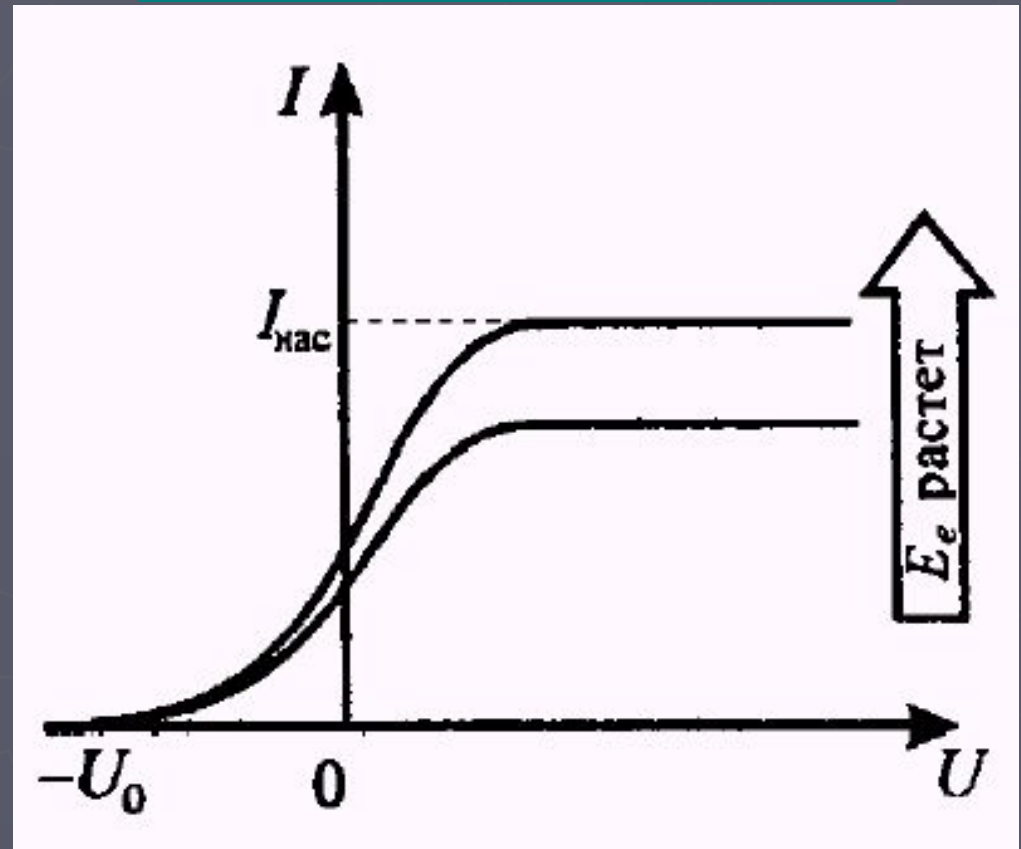
Вентильный фотоэффект (разновидность внутреннего фотоэффекта) — возникновение ЭДС (**фото-ЭДС**) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля). Вентильный фотоэффект используется в солнечных батареях для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую.

Внешним фотоэффектом (фотоэлектронной эмиссией) называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения.

Схема А.Г. Столетова



Вольтамперная характеристика



U_0 - задерживающее напряжение

Законы фотоэффекта



I) Закон Столетова: при фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, испускаемых фотокатодом в единицу времени, пропорционально интенсивности света (сила фототока насыщения пропорциональна энергетической освещенности E_e катода).

II) Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой ν .

III) Для каждого вещества существует **красная граница фотоэффекта** — минимальная частота ν_0 света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

§ 7.2. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

Энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном **работы выхода** A из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = A_{\text{ВЫХ}} + \frac{mv_{\text{мак}}^2}{2}$$

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = A_{\text{ВЫХ}} + eU_3$$

Красная граница фотоэффекта :

$$\nu_{\text{кр}} = \nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{h}$$

$$\lambda_{\text{кр}} = \lambda_{\text{max}} = \frac{hc}{A_{\text{ВЫХ}}}$$

§ 7.3. ФОТОНЫ. Давление света.

Энергия фотона

$$\varepsilon_0 = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \hbar\omega$$

Масса фотона (находится из закона $\varepsilon_0 = m_\gamma c^2$): $m_\gamma = \frac{h\nu}{c^2}$

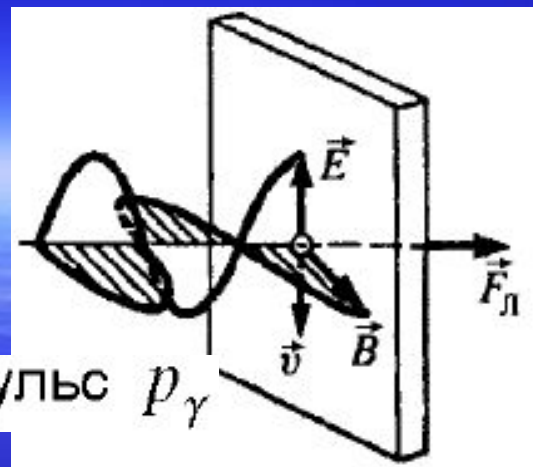
Импульс фотона (из теории относительности): $p_\gamma = \frac{\varepsilon_0}{c} = \frac{h\nu}{c}$

Эти соотношения связывают квантовые (**корпускулярные**) характеристики фотона — массу, импульс и энергию — с **волновой** характеристикой света — его частотой.

Свет обладает **одновременно** волновыми свойствами, которые проявляются в закономерностях его распространения, интерференции, дифракции, поляризации, и корпускулярными, которые проявляются в процессах взаимодействия света с веществом (испускания, поглощения, рассеяния).

Эффект Комптона, излучение черного тела и фотоэффект служат доказательством **квантовых (корпускулярных)** представлений о свете как о потоке фотонов.

Если за 1с на 1м^2 поверхности тела падает N
 то при коэффициенте отражения ρ
 отразится ρN фотонов,
 $(1 - \rho)N$ фотонов — поглотится.



поглощенный фотон передает поверхности импульс p_γ
 отраженный фотон — $2p_\gamma$

Давление света на поверхность равно импульсу, который
 передают поверхности за 1с N фотонов:

$$p = \frac{2h\nu}{c} \rho N + \frac{h\nu}{c} (1 - \rho) N = (1 + \rho) \frac{h\nu}{c} N$$

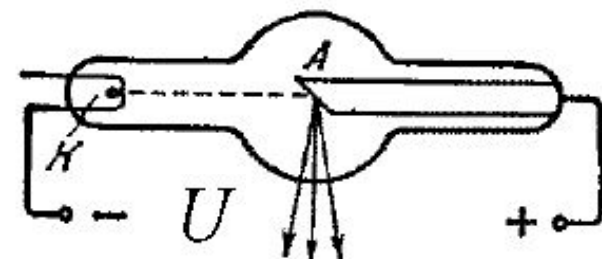
$Nh\nu = E_e$ — энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в
 единицу времени — **энергетическая освещенность поверхности.**

$w = \frac{E_e}{c}$ — **объемная плотность энергии излучения.**

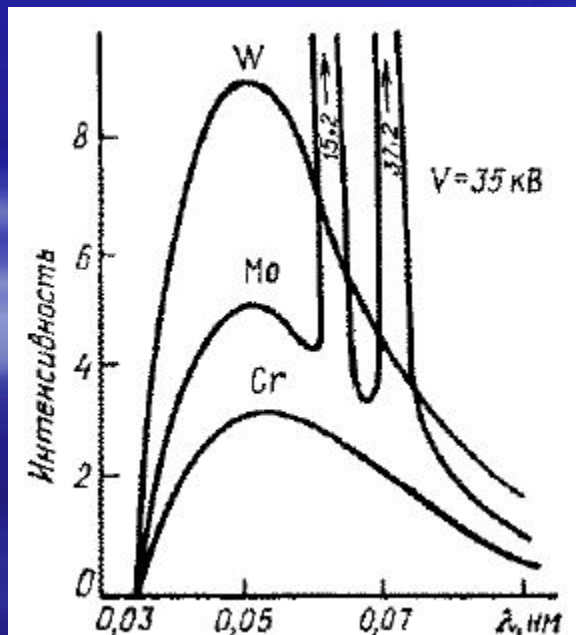
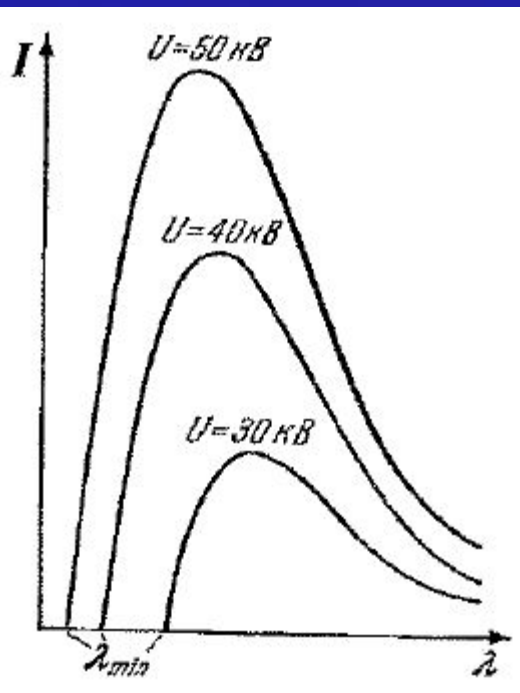
$$p = \frac{E_e}{c} (1 + \rho) = w(1 + \rho)$$

§ 7.4. Рентгеновские лучи.

рентгеновская трубка, в которой вылетающие с катода K электроны бомбардируют анод A (антикатод), изготовленный из тяжелых металлов (W, Cu, Pt и т.д.).



состоит из сплошного спектра **тормозного излучения**, возникающего при торможении электронов в аноде, и **линейчатого спектра характеристического излучения**, определяемого материалом анода.



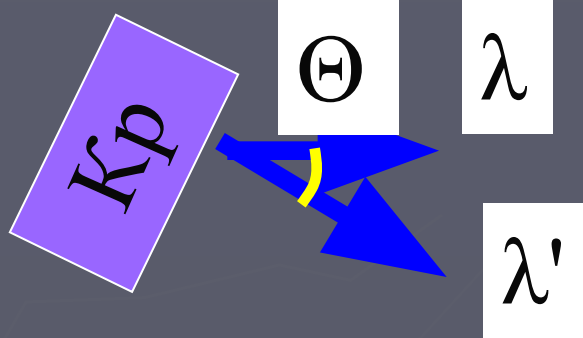
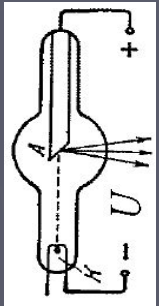
Граница сплошного спектра – λ_{\min} :

$$E_{\max} = h\nu_{\max} = eU$$

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{ch}{eU} = \frac{ch}{E_{\max}}$$

§ 7.5. Эффект КОМПТОНА.



Эффект Комптона – упругое рассеяние рентгеновского и γ -излучения на свободных электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны.

Это увеличение $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ не зависит от длины волны λ падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только углом рассеяния Θ :

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\Theta}{2}$$

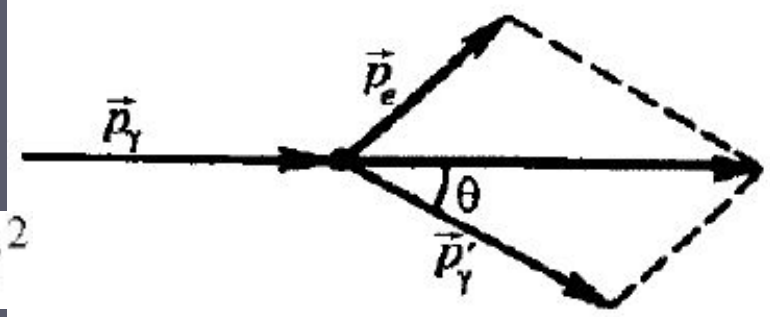
λ' — длина волны рассеянного излучения,
 λ_c — **комptonовская длина волны.**

Эффект Комптона не может наблюдаться в видимой области спектра, поскольку энергия фотона видимого света сравнима с энергией связи электрона с атомом, при этом даже внешний электрон атома нельзя считать свободным.

ФОТОН

(с энергией $\varepsilon_\gamma = h\nu$

и импульсом $p_\gamma = h\nu/c$),



Электрон

энергия покоя $W_0 = m_0c^2$

$$W = \sqrt{p_e c^2 + m_0^2 c^4}$$

$$W_0 + \varepsilon_\gamma = W + \varepsilon'_\gamma$$

релятивистская энергия электрона после столкновения,
 $\varepsilon'_\gamma = h\nu'$ — энергия рассеянного фотона.

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

$$m_0c^2 + h\nu = \sqrt{p_e c^2 + m_0^2 c^4} + h\nu'$$

$$p_e^2 = p_\gamma^2 + p_\gamma'^2 - p_\gamma p_\gamma' \cos\theta = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2}{c^2} \nu \nu' \cos\theta$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_C \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

Для электрона

$$\lambda_C = \frac{h}{m_0 c} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м} = 0,0243 \text{ \AA}.$$

$m_0 c$