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.

$$R_{\nu,T} = \frac{dW^{\text{изл}}_{\nu,\nu+d\nu}}{d\nu}$$

Энергетическая светимость:

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

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

$$A_{\nu,T} = \frac{dW^{\text{погл}}_{\nu,\nu+d\nu}}{dW_{\nu,\nu+d\nu}}$$

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

$$A^{ч}_{\nu,T} \equiv 1$$

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:

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

§ 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 $A^{ч}_{\nu,T} \equiv 1$, 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):

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

где $R_e = \int_0^\infty r_{\nu,T} d\nu$ — 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*:

$$\boxed{R_e = \sigma T^4}$$

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

где $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·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:

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

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: $\varepsilon = nh\nu \qquad (n = 1, 2, \ldots)$

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

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

ФОРМУЛА ПЛАНКА:

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

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

(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,
$C = 1{,}3 \cdot 10^{-5}$ Вт/ м^3 · 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 $T_{рад}$ – температура АЧТ, при которой его энергетическая светимость R_e равна энергетической светимости R_T исследуемого тела.

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

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

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

$$T_{цв} = T_{ист}$$

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

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

т.к. $A_T < 1$

то $T_{яр} < T_{ист}$

Глава 7. ФОТОНЫ.
§ 7.1. Фотоэффект

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

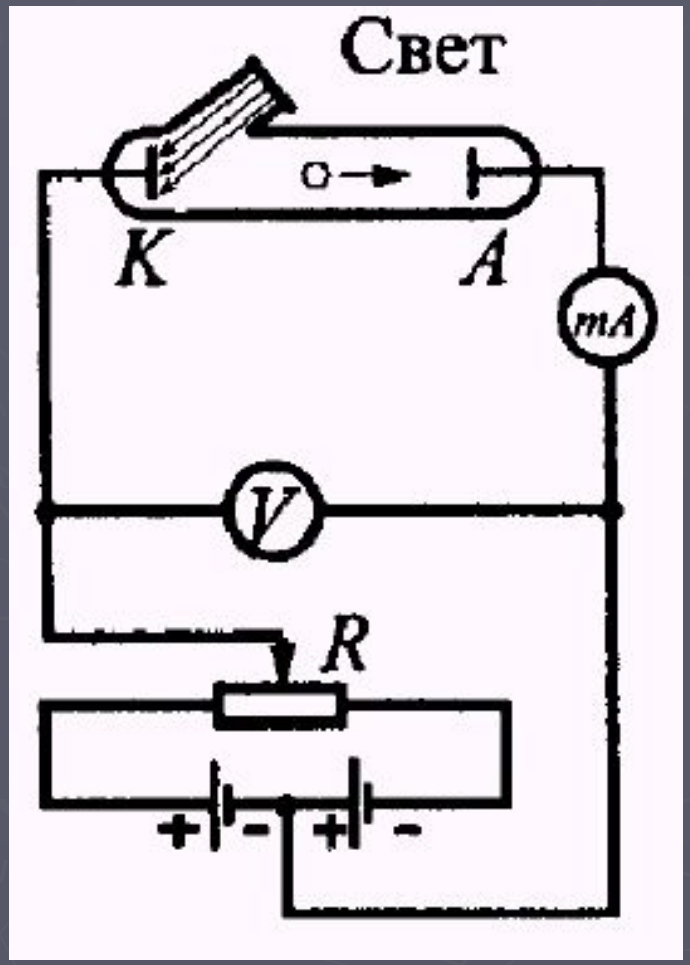
Различают фотоэффект *внутренний, вентильный и внешний*.

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.

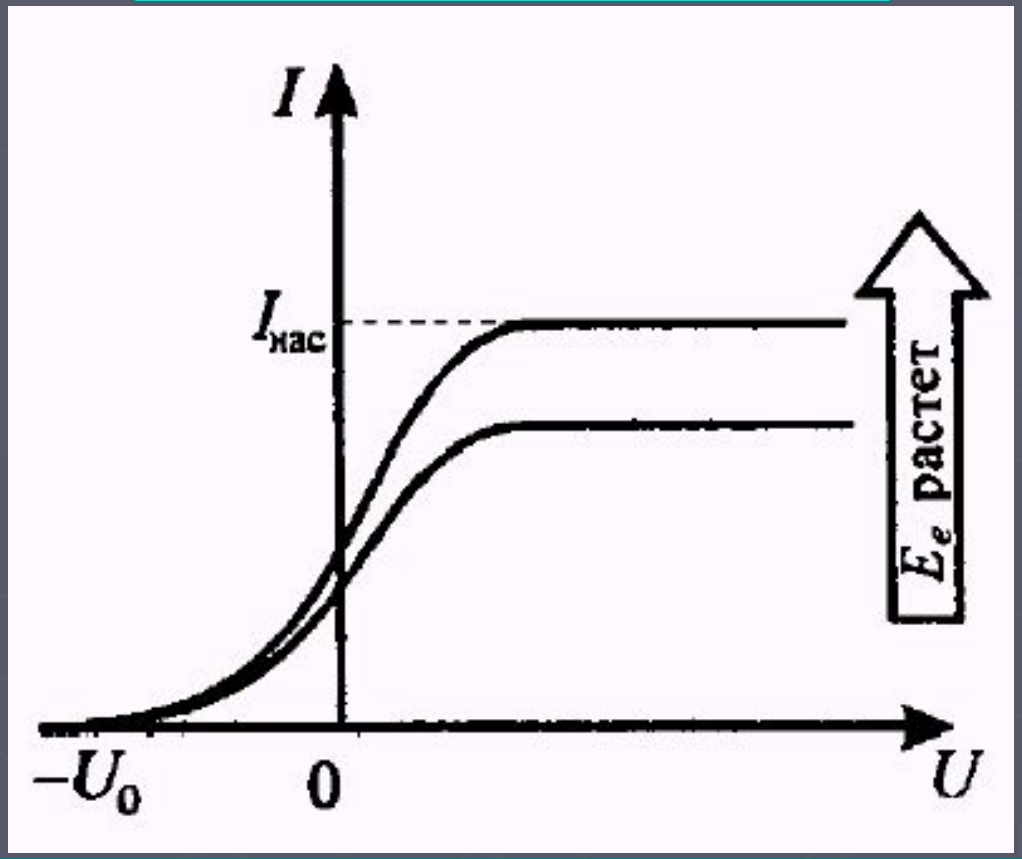
Вентильный фотоэффект (разновидность внутреннего фотоэффекта) — возникновение ЭДС (***фото-ЭДС***) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля). Вентильный фотоэффект используется в солнечных батареях для прямого преобразования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

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

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = A_{вых} + eU_з$$

Красная граница фотоэффекта :

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

$$\lambda_{кр} = \lambda_{max} = \frac{hc}{A_{вых}}$$

§ 7.3. ФОТОНЫ. Давление света.

Энергия фотона $\varepsilon_0 = h\nu = h\dfrac{c}{\lambda} = \hbar\omega$

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

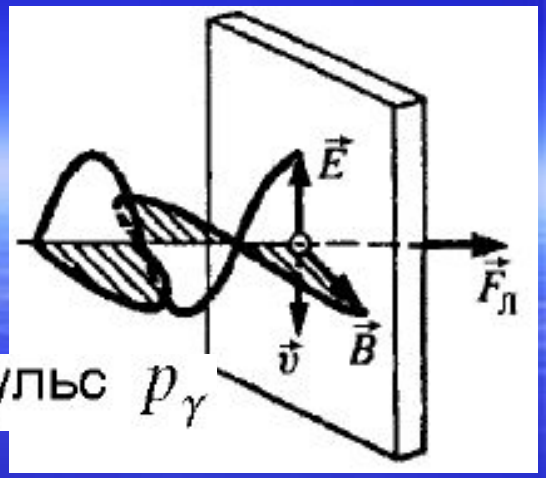
Импульс фотона (из теории относительности): $p_\gamma = \dfrac{\varepsilon_0}{c} = \dfrac{h\nu}{c}$

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:

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

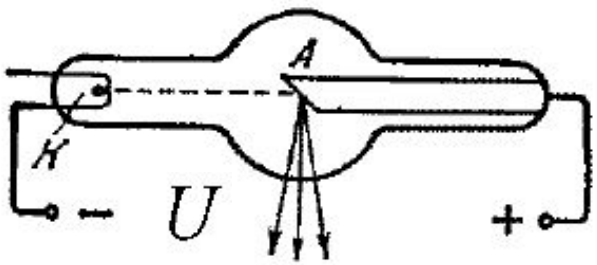
$Nh\nu = E_e$ — энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени — ***энергетическая освещенность поверхности***.

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

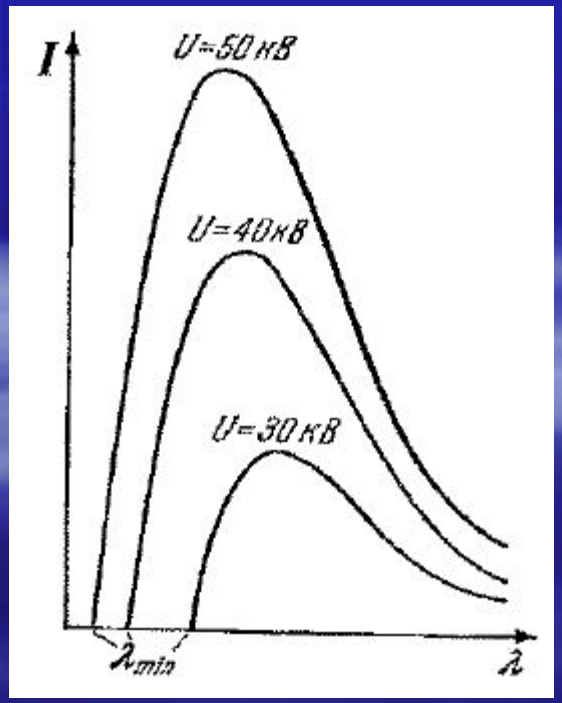
$$p = \frac{E_e}{c}(1+\rho) = w(1+\rho)$$

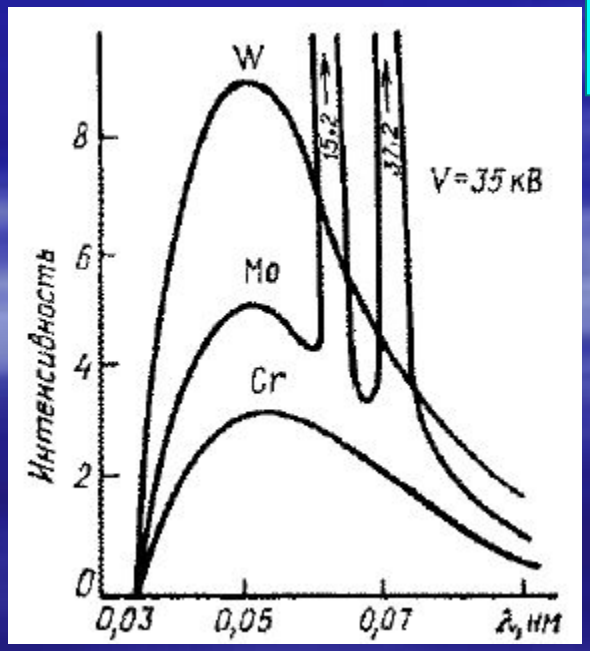
§ 7.4. Рентгеновские лучи.

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.





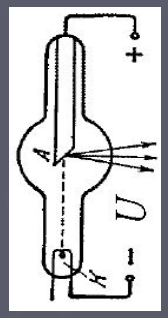
Граница сплошного спектра – λ_{min} :

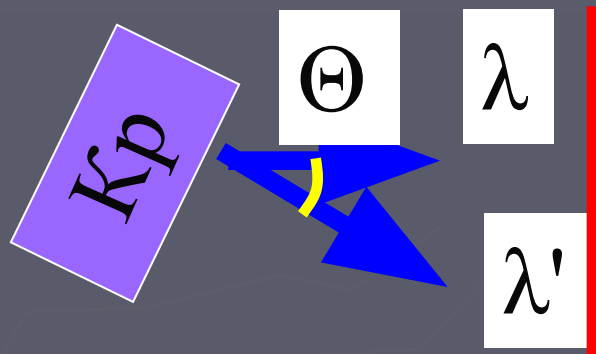
$$E_{max} = h\nu_{max} = eU$$

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

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

§ 7.5. Эффект КОМПТОНА.





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

Это увеличение **Δλ= λ'-λ** не зависит от длины волны **λ** падающего излучения и природы рассеивающего вещества а определяется только углом рассеяния Θ:

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

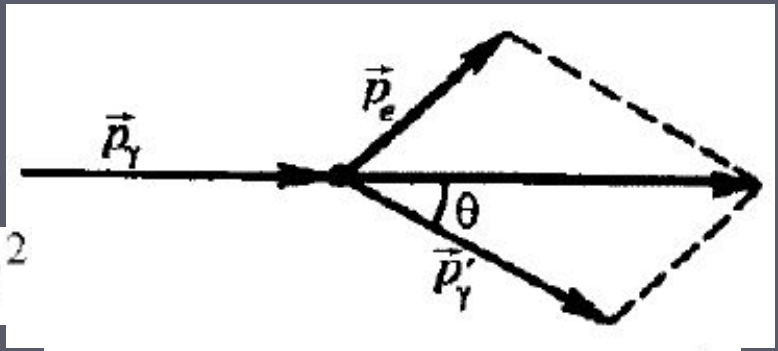
λ' — длина волны рассеянного излучения,

λ_C — ***комптоновская 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 $W_0 = m_0 c^2$



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

релятивистская энергия электрона после столкновения,

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

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

$\varepsilon'_\gamma = h\nu'$ — энергия рассеянного фотона.

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

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

θ. С у

Для электрона

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

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