

Лекция 3.

План лекции

1. Фотоэффект.
2. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
3. Фотоны. Давление света.
4. Эффект Комптона.

Гипотеза Планка

Для объяснения свойств теплового излучения и разрешения проблем в “Теории теплового излучения”, которые возникли в при ее построении в рамках представлений классической физики была введена:

Гипотеза квантов. М. Планк. 1900 г.

Испускание электромагнитного излучения происходит порциями $\hbar\omega$ (квантами), т.е. дискретно.

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

h (\hbar) – постоянная Планка.

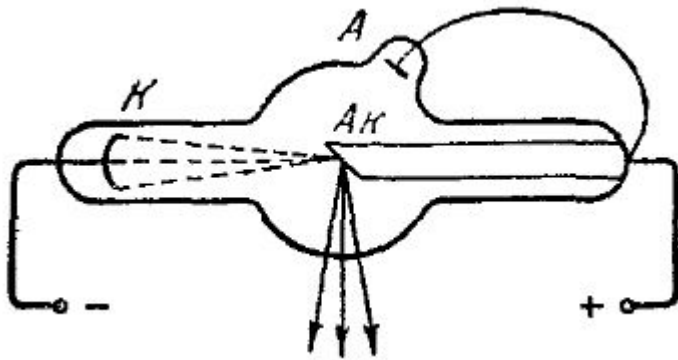
Существование коротковолновой границы спектра тормозного рентгеновского излучения подтверждает квантовую природу света.

Подтверждение гипотезы Планка

Рентгеновские лучи – возникают при бомбардировке твердых мишеней быстрыми электронами.

Рентгеновские трубки:

Ионные

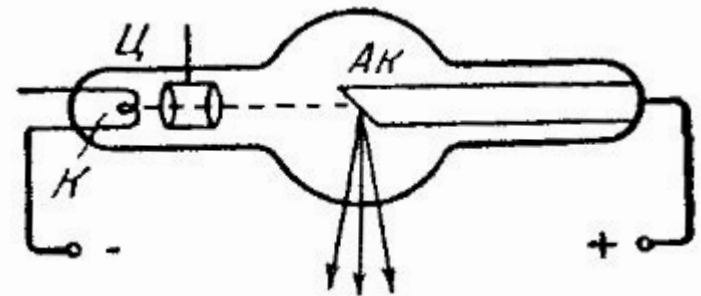


K – катод; A – анод; A_k – мишень (антикатод).

Тлеющий разряд низкого давления
(10^{-3} мм.рт.ст.)

Катод особой формы для фокусировки
катодных лучей

Электронные



Вакуум (10^{-5} - 10^{-7} мм.рт.ст.)

Нагреваемый катод

Цилиндр (\mathcal{C}) для фокусировки
катодных лучей

Подтверждение гипотезы Планка

Используются наиболее часто.

Устойчивее и проще в эксплуатации.

На нагреваемый катод подается напряжение U_0



Электроны разгоняются до энергии eU_0

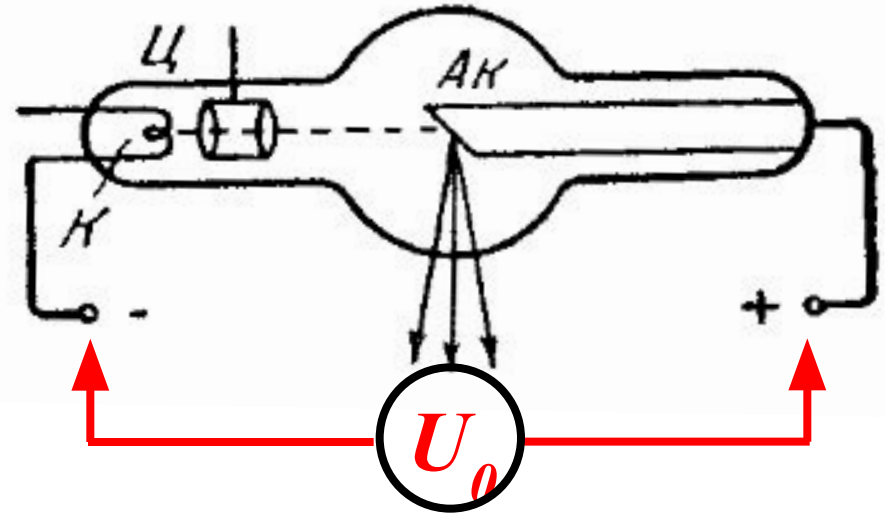


Испытывают торможение на A_k и становятся источником ЭМ волн

Энергия электронов выделяется на антикатоде в виде тепла.

В излучение переходит лишь 1-3% энергии электронов.

Антикатод охлаждают.



K – катод; A_k – мишень (антикатод), она же анод.

$$I = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{e^2 a^2}{6\pi c^2}$$

a – ускорение электрона

Подтверждение гипотезы Планка

За время торможения электрон излучит энергию:

$$E = I\tau = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{e^2 a^2}{6\pi c^2} \tau = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{e^2 v_0^2}{6\pi c^2 \tau} \sim \frac{v_0^2}{\tau}$$

v_0 – начальная скорость электрона



Заметное излучение лишь при резком торможении

$$U_0 \sim 50 \text{ кВ} \rightarrow v_0 \sim 0,4c$$

$$\text{Бетатрон: } eU_0 \sim 50 \text{ МэВ} \rightarrow v_0 \sim 0,99995c$$

Если начальная скорость велика, то помимо *тормозного*, возникает *характеристическое* рентгеновское излучение, обусловленное возбуждением внутренних электронных оболочек атомов мишени.

Подтверждение гипотезы Планка

Согласно классической электродинамике:

1. При торможении электрона должны возникать волны с длинами от 0 до ∞
2. Величина λ_m должна уменьшаться с ростом U_0 .

*Распределения энергии излучения
обрываются на некотором λ_{min}*

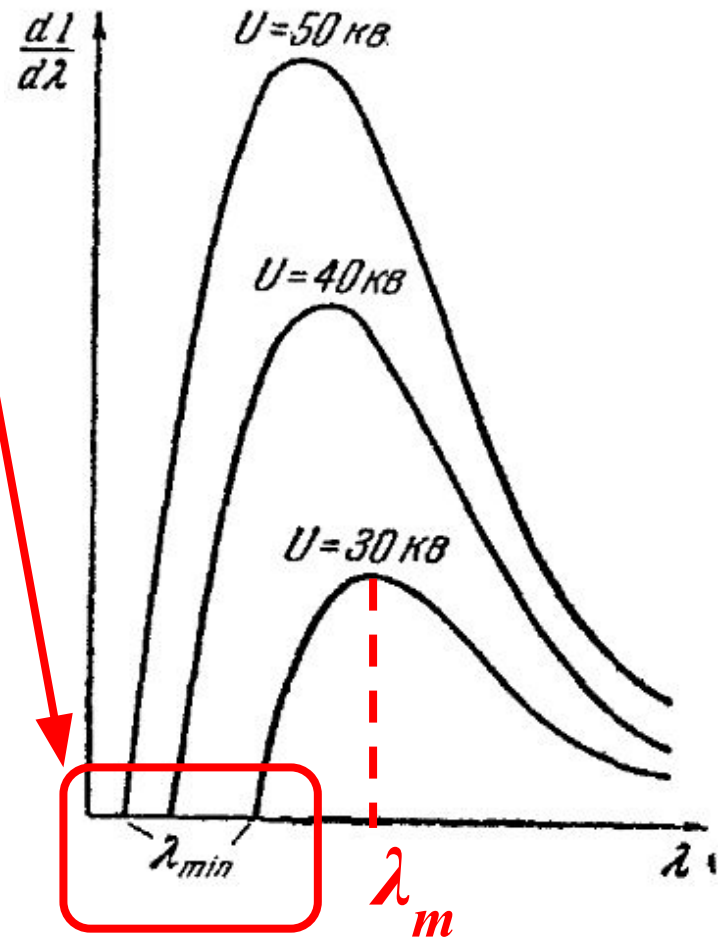
Излучение возникает за счет энергии
теряемой электроном при торможении



Величина кванта излучения не может
превысить энергию электрона

$$\hbar \omega \leq eU_0$$

$$\lambda_{min} = \frac{2\pi c}{\omega_{max}} = \frac{(2\pi \hbar c / e)}{U} = \frac{12390}{U}$$



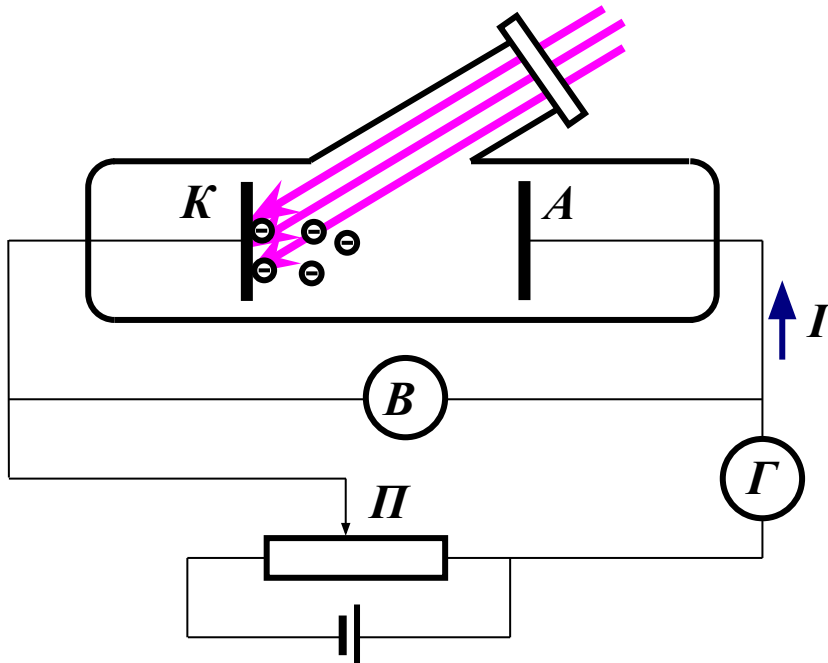
Самый точный метод определения \hbar !

Фотоэффект

Фотоэффект – явление испускания электронов веществом под действием света.

Открыто Г. Герцем в 1887 г.: проскакивание искры м/у металлическими шариками облегчалось при освещении одного из них УФ излучением.

Детально исследовалось А.Г. Столетовым в 1888-1889 г.



K – катод;

A – анод;

П – потенциометр;

В – вольтметр;

Г – гальванометр.

Закономерности Столетова

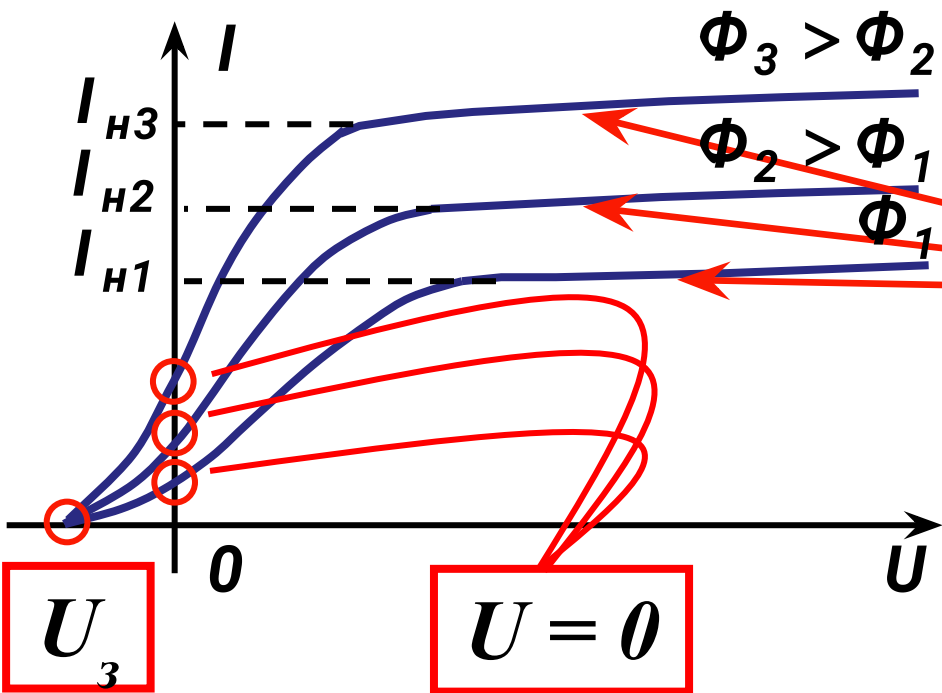
1. Заряды испускаемые под действием света имеют отрицательный знак. (Подтверждено Ленардом в 1898 г.)

2. Фотоэффект тем интенсивней, чем короче длина волны падающего излучения. (наибольший эффект для УФ излучения)

3. Величина испущенного телом заряда пропорциональна поглощенной им световой энергии. (Фототок пропорционален потоку падающего на него излучения)

Фотоэффект

Эксперимент: Регистрация вольт-амперных характеристик при одной частоте ω (λ) излучения и различных Φ .



I – фототок;

U – напряжение на промежутке K - A ;

Φ – интенсивность светового потока.

$$U > 0$$

При небольшом U фототок достигает насыщения – все электроны, испускаемые катодом приходят на анод.

Чем больше Φ , тем больше электронов выбивается в единицу времени, тем больше I_H .

Только часть самых быстрых электронов достигает анода.

Закон Столетова: При неизменном спектральном составе $I_H \sim \Phi$

Фототок сильно зависит от состояния поверхности.

Фотоэффект

При U_3 ни один электрон, даже обладающей при вылете из материала максимальной скоростью v_m , не достигает анода.

$$\frac{1}{2} m_e v_m^2 = eU_3 \Rightarrow v_m = \sqrt{\frac{2eU_3}{m_e}}$$

m_e – масса электрона

Р. Милликен установил: Задерживающее напряжение U_3 не зависит от интенсивности света. При освещении катода монохроматическим светом с частотой ω задерживающее напряжение изменяется по закону:

$$U_3 = a\omega - \varphi$$

a, φ – const, не зависят от материала катода

$$\omega \geq \omega_0 = \frac{\varphi}{a} \Leftrightarrow \lambda \leq \lambda_0 = \frac{2\pi a}{\varphi}$$

ω_0 (λ_0) – красная граница фотоэффекта

Фотоэффект. Противоречия

Классическая электродинамика:

В результате взаимодействия с ЭМ волной (свет), электрон совершает вынужденные колебания.

Амплитуда колебаний может быть достаточной для того, чтобы электрон покинул металл.

$$v_m = \sqrt{\frac{2eU_3}{m_e}}$$

Энергия, забираемая от волны не зависит от ω и пропорциональна интенсивности $\Phi \sim E^2$.



С ростом Φ при $\omega = \text{const}$ должна расти E_k^{max} фотоэлектронов, т. е. должно расти U_3

В эксперименте не наблюдается!

Фотоэффект. Противоречия

Классическая электродинамика:

Для свободных электронов: $E_k^{max} \sim 1/\omega^2$

Для связанных электронов: $E(\omega)$ – резонансная

В эксперименте:

Задерживающее напряжение изменяется с изменением частоты излучения, падающего на катод.

Энергия электронов растет с ростом частоты света!

Волновая теория:

Энергия электронов зависит от интенсивности но не частоты излучения.

В эксперименте:

Минимальная частота света, ниже которой явление невозможно.

Существует красная граница фотоэффекта!

Фотоэффект. Разрешение противоречий

А. Эйнштейн предположил (1905 г.):

1. Поглощение света, равно как и испускание происходит порциями (квантами).

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

2. Квант энергии целиком поглощается электроном.

Часть энергии затрачивается на то, чтобы электрон мог покинуть тело. Такая энергия называется *работой выхода A* .

Если электрон находится не у самой поверхности, то часть энергии E' будет израсходована на столкновения в веществе.

Оставшаяся энергия образует кинетическую энергию E_k вышедшего из тела электрона.

Фотоэффект. Формула Эйнштейна

E_k будет максимальна, если $E' = 0$

$$\hbar \omega = \frac{m_e v_0^2}{2} + A$$

Формула Эйнштейна правильно описывает особенности явления фотоэффекта, не нашедшие объяснения в рамках классической физики.

1. *С ростом частоты света растет скорость v_{max} электронов, испускаемых катодом.*

2. *Максимальная скорость не зависит от интенсивности света.*

3. *Если работа выхода $A > \hbar\omega$, электроны не покидают металл.*

Следовательно для возникновения явления фотоэффекта должно выполняться условие $\omega > \omega_0 = A/\hbar$. ω_0 – красная граница фотоэффекта.

Виды фотоэффекта

Тот фотоэффект, что был нами рассмотрен – внешний.

Т.е. электроны выходят из материала наружу вследствие, освещения его поверхности светом.

Используется, например, в газовых лазерах. Для увеличения проводимости межэлектродного промежутка и зажигания однородного разряда.

Существует – внутренний фотоэффект.

Имеет место в полупроводниках и диэлектриках. Используется в микроэлектронике.

При освещении полупроводника (диэлектрика) светом он начинает проводить электрический ток. Если энергия кванта больше ширины запрещенной зоны. Фотопроводимость.

Гипотеза фотонов

Чтобы устранить противоречия в **Теории теплового излучения**, т. е. объяснить распределение энергии в спектре равновесного теплового излучения, Планк допустил испускание света порциями энергии $\hbar\omega$ (*квантами*).

Для объяснения явления **фотоэффекта** Эйнштейн предположил, что и поглощение света происходит порциями энергии $\hbar\omega$ (*квантами*).

А. Эйнштейн: гипотеза о том, что свет распространяется в виде частиц (*дискретных*) – **фотонов**, имеющих энергию, равную энергии кванта $\hbar\omega$.

Фотоны. Импульс фотона. Давление света

Световая волна, как и всякая ЭМВ, обладает импульсом и оказывает давление на поверхность (с учетом частичного отражения):

$$P = w(1 + \rho)$$

w – объемная плотность энергии; ρ – коэффициент отражения

Фотон как любая движущаяся частица, должен иметь импульс p :

$$p = \frac{E_\phi}{c} = \frac{\hbar\omega}{c} = \hbar k$$

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

$$\vec{p} = \hbar \vec{k}$$

$$m_\phi = \frac{\hbar\omega}{c^2}$$

- импульс фотона в скалярной форме

- модуль волнового вектора

- импульс фотона в векторной форме

- масса фотона (*нет массы покоя !*)

Фотоны. Импульс фотона. Давление света

Квантовая теория:

При падении на поверхность световая волна, оказывает на нее давление обусловленное передачей импульса от падающих фотонов.

Рассчитаем давление оказываемое на поверхность тела потоком монохроматического излучения, падающего перпендикулярно к поверхности.

В единицу времени на поверхность падает N фотонов.

При коэффициенте отражения ρ от поверхности отразится ρN фотонов, а поглотится $(1 - \rho) N$.

$$p_n = \frac{\hbar \omega}{c} \quad - \text{импульс, передаваемый телом поглощенным фотоном}$$

$$p_o = \frac{2\hbar \omega}{c} \quad - \text{импульс, передаваемый телом отраженным фотоном}$$

Фотоны. Импульс фотона. Давление света

Тогда, давление света равно импульсу, передаваемому всеми фотонами на единицу площади в единицу времени:

$$P = p = \frac{2\hbar\omega}{c} \rho N + \frac{\hbar\omega}{c} (1 - \rho) N = \frac{\hbar\omega N}{c} (1 + \rho)$$

$\hbar\omega N$ – энергия всех фотонов, падающих в единицу времени на единицу площади (плотность потока энергии).

Плотность потока $\hbar\omega N$ и объемная плотность связаны через скорость света $\hbar\omega N = w c$

Откуда для нормального падения света получаем

$$P = w(1 + \rho)$$

Выражение для давления света из ЭМ теории!

Эффект Комптона

Помимо теплового излучения, фотоэффекта, коротковолновой границы рентгеновского излучения существует еще ряд явлений, подтверждающих квантовую природу излучения.

эффект Комптона

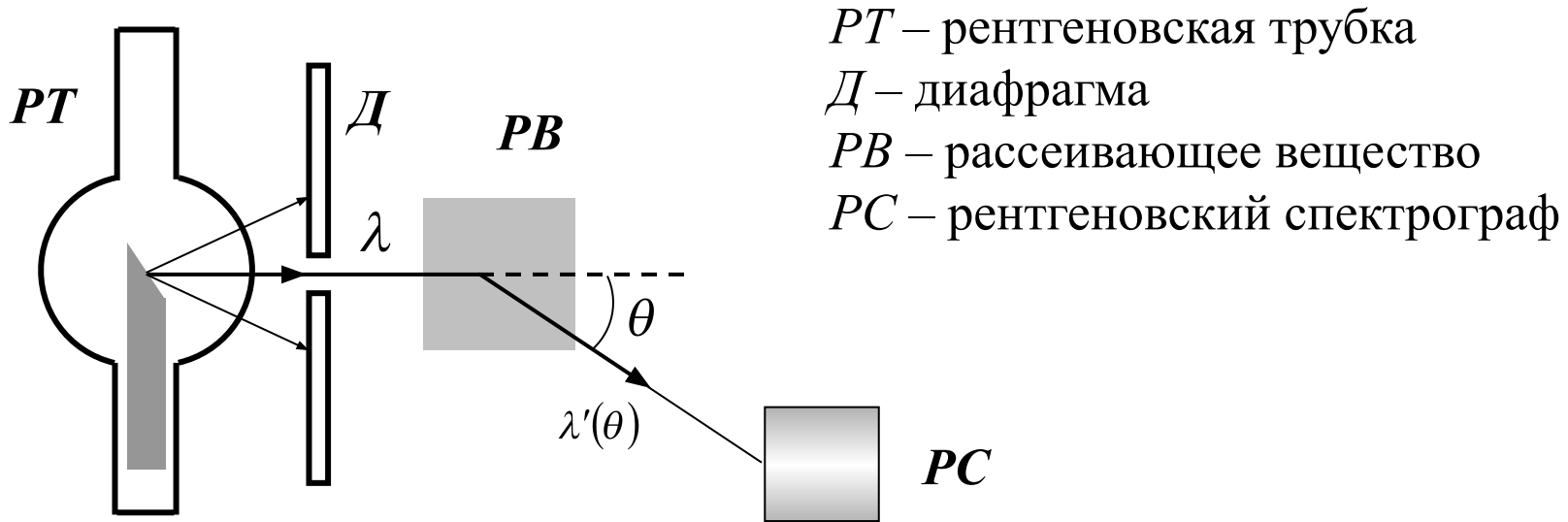
(одно из важных доказательств корпускулярной природы света)

В 1922 г. американский физик Артур Комптон экспериментально показал:

При рассеянии рентгеновских лучей свободными электронами (или слабо связанными с атомами) происходит изменение их частоты в соответствии с законами упругого столкновения двух частиц – фотона и электрона.

Эффект Комптона

Схема эксперимента:



Результаты:

1. В составе рассеянного излучения наряду с излучением первоначальной длины волны λ наблюдается более длинноволновое $\lambda'(\theta)$.
2. Разность $\Delta\lambda = \lambda'(\theta) - \lambda$ не зависит от длины волны падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только углом рассеяния θ .

$$\Delta\lambda = \lambda'(\theta) - \lambda = \lambda_c (1 - \cos\theta)$$

$\lambda_c = \text{const}$ – КОМПТОНОВСКАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ

Эффект Комптона

Волновая теория:

Длина волны при рассеивании изменяться не должна, т.к. под действием электрического поля световой волны электрон колеблется с частотой поля и поэтому излучает рассеянные волны той же частоты.

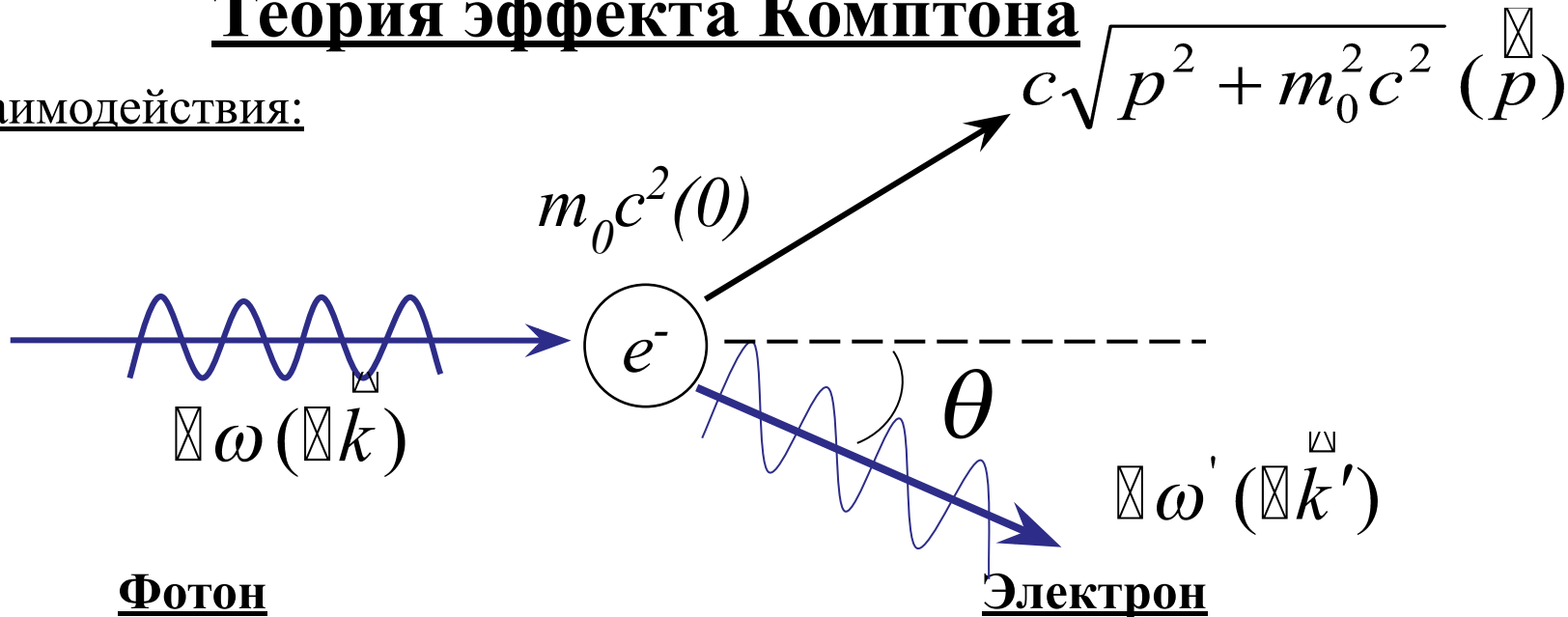
Объяснение наблюдаемому в эксперименте может быть дано на основе представлений о рентгеновском излучении как о потоке частиц – фотонов, обладающих энергией $\hbar\omega$ и импульсом $\hbar k$

Рассмотрим упругое столкновение рентгеновского фотона с покоящимся квазисвободным электроном внешней электронной оболочки атома.

Квазисвободный электрон – энергия связи электрона в атоме (энергия ионизации) много меньше энергии, которую фотон может передать электрону при столкновении.

Теория эффекта Комптона

Схема взаимодействия:



$\hbar\omega$ – энергия до столкновения
 $\hbar\omega'$ – энергия после столкновения
 $\hbar k$ – импульс до столкновения
 $\hbar k'$ – импульс после столкновения

m_0c^2 – энергия до столкновения
 $c(p^2 + m_0^2c^2)^{1/2}$ – энергия после столкновения
 0 – импульс до столкновения
 p – импульс после столкновения

Закон сохранения энергии

$$\hbar\omega + m_0c^2 = \hbar\omega' + c\sqrt{p^2 + m_0^2c^2}$$

Закон сохранения импульса

$$\hbar k = p + \hbar k'$$

Теория эффекта Комптона

Разделим ЗСЭ на скорость света c

$$\hbar\omega + m_0c^2 = \hbar\omega' + c\sqrt{p^2 + m_0^2c^2}$$

$$p^2 = \hbar^2(k^2 - 2kk' + k'^2) - 2\hbar(k - k')m_0c \quad (1)$$

Из ЗСИ получаем:

$$\hbar\vec{k} = \vec{p} + \hbar\vec{k}'$$

$$p^2 = (\vec{p}, \vec{p}) = pp \cos \alpha = p^2$$

$$p^2 = \hbar^2(\vec{k} - \vec{k}')^2 = \hbar^2(k^2 + k'^2 - 2(\vec{k}, \vec{k}')) \quad (2)$$

$$(\vec{k}, \vec{k}') = kk' \cos \theta$$

Приравниваем (1) = (2)

Теория эффекта Комптона

Получаем

$$\hbar^2 (k^2 - 2kk' + k'^2) - 2\hbar (k - k') m_0 c = \hbar^2 (k^2 + k'^2 - 2kk' \cos \theta)$$

После алгебраических преобразований:

$$(k - k') m_0 c = \hbar k k' (1 - \cos \theta)$$

Умножим на 2π и разделим на $m_0 c k k'$:

$$\frac{(k - k') m_0 c}{k k'} = \frac{\hbar k k' (1 - \cos \theta)}{m_0 c} \Rightarrow \frac{2\pi}{k'} - \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi \hbar (1 - \cos \theta)}{m_0 c}$$

Учитывая:

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

Теория эффекта Комптона

Формула Комптона

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{2\pi\hbar}{m_0c} (1 - \cos\theta) = \lambda_c (1 - \cos\theta)$$

$\lambda_c = 2,426 \cdot 10^{-12}$ м – комптоновская длина волны

Гипотеза о квантованности света объясняет эффект Комптона, не объясняемый с позиций классической теории.

Рассеяние рентгеновских фотонов на электронах с большой энергией связи с атомом обмен энергией и импульсом происходит с атомом как целым.

$$\lambda_c = \frac{2\pi\hbar}{Mc}, \text{ где } M \text{ – масса атома.}$$