

ЛЕКЦИЯ 1. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

1. ФОТОНЫ

ФОТОНЫ

- В соответствии с гипотезой А. Эйнштейна (1905 г.) распространение электромагнитного излучения (света) в вакууме можно рассматривать как движение частиц – **фотонов** – со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Энергия фотона

- Энергия фотона излучения с частотой ν (или длиной волны λ):

$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\omega = 2\pi\nu; \quad \nu = \frac{c}{\lambda} \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Масса фотона

- Масса покоя фотона равна нулю, а его релятивистская масса:

$$m = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{\hbar\omega}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$$

Импульс фотона

$$p = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{\hbar\omega}{c} = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$$

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

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

Корпускулярно-волновой дуализм фотонов

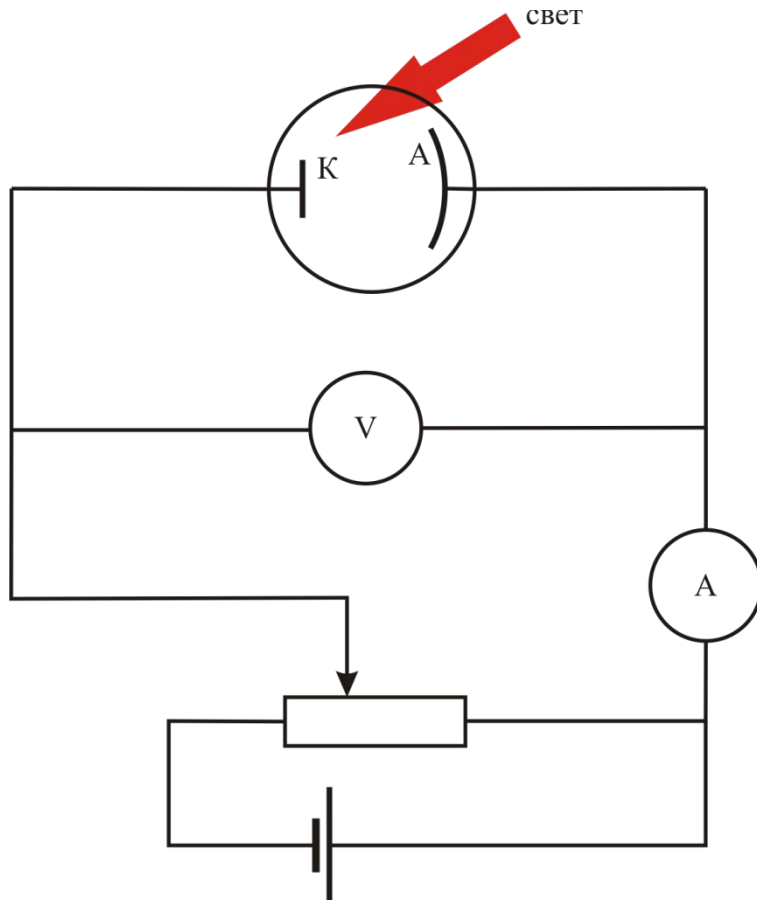
- Наблюдали интерференционную картину от двух когерентных источников света (опты Юнга). Затем уменьшали интенсивность света или плотность потока фотонов. При очень малых плотностях интерференционная картина начинала «мигать», т.е. на экран в область максимума попадали то 105 фотонов, то 95 фотонов. 105 фотонов глаз наблюдателя видел, а 95 – нет, т.к. порог зрения человека – приблизительно 100 фотонов.
- Но попадали фотоны именно в те места, в которые предписывали законы волновой оптики, т.е. в места максимумов. Там, где согласно волновой теории должны быть минимумы, всегда было темно, а в областях максимумов происходило мигание.
- Когда на месте экрана поместили фотопластинку и произвели съемку интерференционной картины с длительной выдержкой, то фото не отличалось от фото с большими интенсивностями света.

ЛЕКЦИЯ 1. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

2. Внешний фотоэффект

- **Внешний фотоэффект** – это явление эмиссии электронов из вещества (металла) под действием электромагнитного излучения (света).
- Фотоэффект был **открыт в 1887 г. Г.Герцем** (проскакивание искры между двумя цинковыми шариками разрядника значительно облегчается, если один из шариков облучать УФ-лучами) и **исследовался в 1888 г. А.Г. Столетовым**

Установка для исследования внешнего фотоэффекта



- **Фотоэлемент** в виде вакуумной двухэлектродной лампы имеет металлический катод, который при освещении его видимым или УФ-излучением испускает электроны (**фотоэлектроны**). Долетая до анода эти фотоэлектроны создают в цепи ток.

Наблюдения А. Столетова

- Под действием света вещество теряет только отрицательный заряд.
- Наибольшее действие оказывают УФ-лучи.
- Величина испущенного телом заряда пропорциональна поглощенной им световой энергии.
- Это явление практически безынерционно

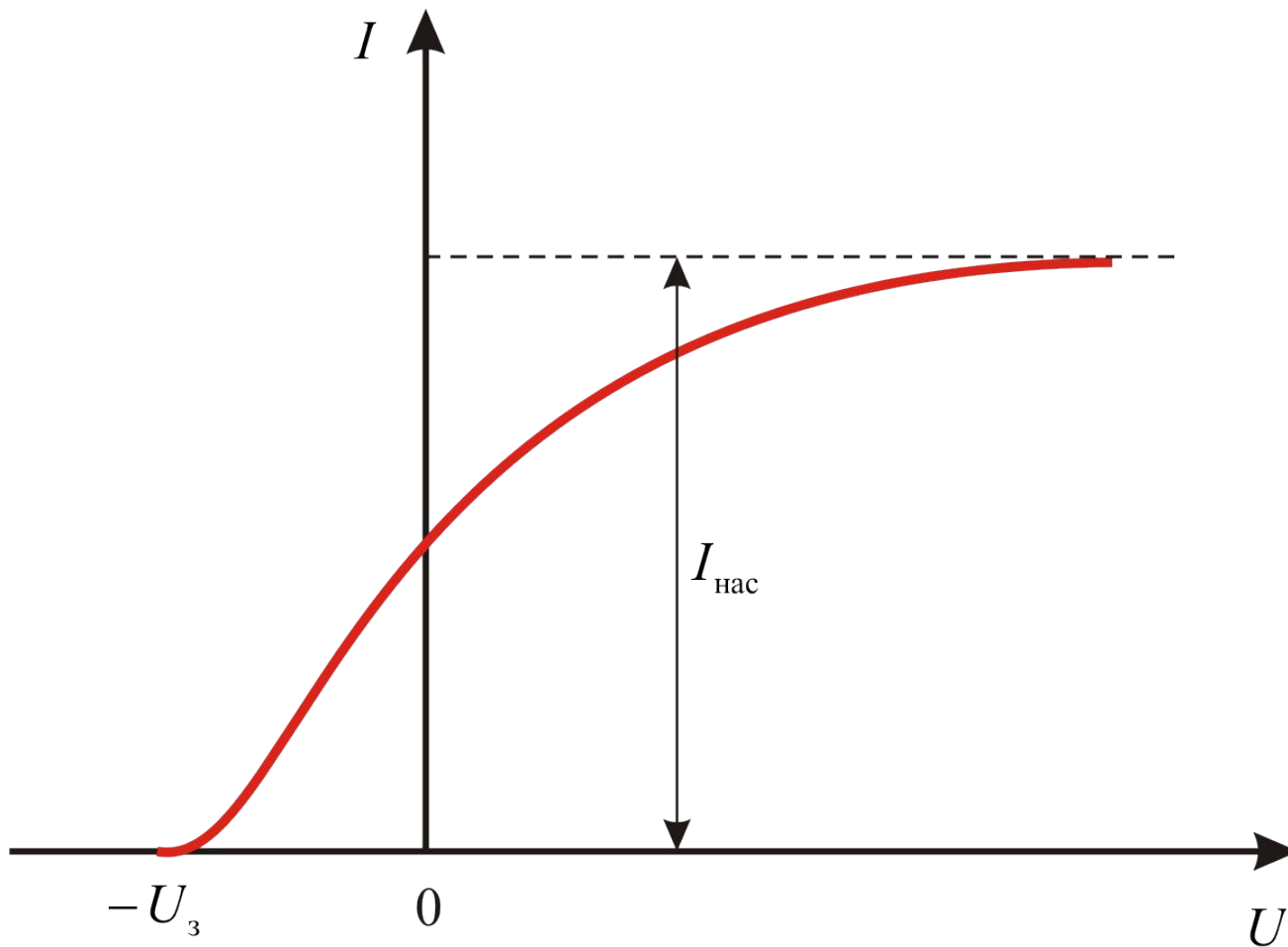
Опыты Ф. Леннарда и Дж. Томсона (1895 г.)

- В 1898 г. Ф. Леннард и Дж. Томсон измерили удельный заряд отрицательных частиц, вырванных из цинка по отклонению их в электрическом и магнитном полях и установили, что ими являются **электроны**

Наблюдение фотоэффекта

- **Фотоэлемент** в виде вакуумной двухэлектродной лампы имеет металлический катод, который при освещении его видимым или УФ-излучением испускает электроны (**фотоэлектроны**). Долетая до анода эти фотоэлектроны создают в цепи ток.

Вольтамперная характеристика фотоэлемента



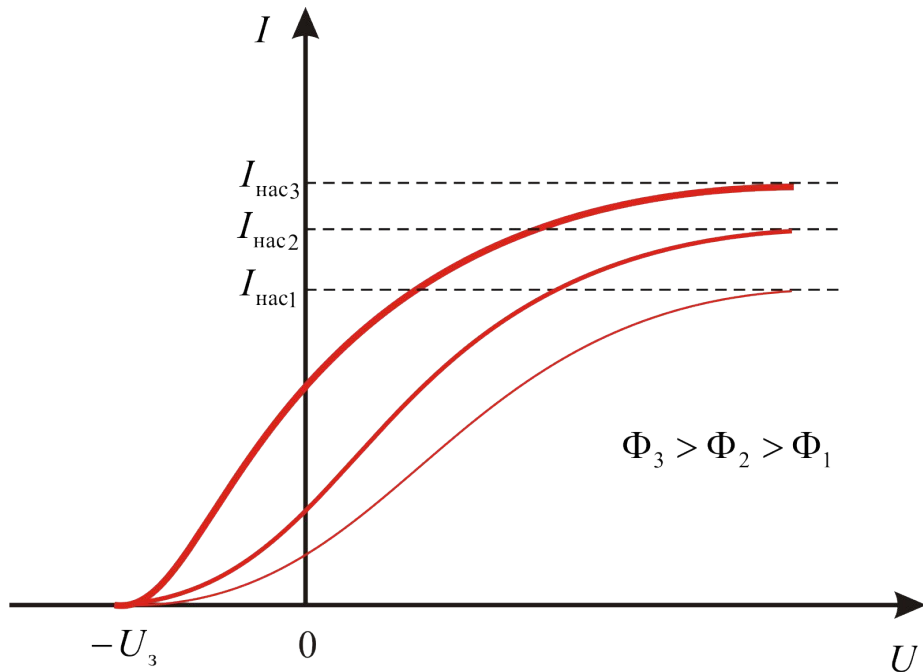
Особенности ВАХ фотоэлемента:

- При положительном напряжении $U > 0$ все вылетающие из катода фотоэлектроны достигают анода, обуславливая фототок насыщения $I_{\text{нас}}$, пропорциональный световому потоку, падающему на катод (**первый закон Столетова**):

$$I_{\text{нас}} = \gamma \Phi$$

- γ - спектральная чувствительность фотокатода

Экспериментальное подтверждение первого закона Столетова



$$\frac{I_{\text{нас}1}}{\Phi_1} = \frac{I_{\text{нас}2}}{\Phi_2} = \frac{I_{\text{нас}3}}{\Phi_3}$$

Особенности ВАХ фотоэлемента:

- При отрицательном напряжении $U < 0$ испущенные катодом фотоэлектроны попадают в **тормозящее** электрическое поле. Спад фототока в области $U < 0$ указывает на то, что вылетающие из катода электроны имеют разные скорости и, следовательно, разные кинетические энергии

Особенности ВАХ фотоэлемента:

- При некотором отрицательном напряжении, модуль которого U_3 называют **задерживающим напряжением (потенциалом)**, ни один из фотоэлектронов не достигает анода и фототок прекращается ($I = 0$). Поэтому

$$eU_3 = K = \begin{cases} \frac{1}{2}mv_{\max}^2, & v_{\max} \ll c \\ m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_{\max}^2}{c^2}}} \right), & v_{\max} < c. \end{cases}$$

Фотоэффект как квантовое явление

- Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов **не зависит от интенсивности падающего света** и прямо пропорциональна частоте ν падающего излучения:

$$K \neq K(\Phi); \quad K \propto \nu$$

Фотоэффект как квантовое явление

- Существует определенная **минимальная частота ν_0** (и соответствующая ей **максимальная длина волны λ_0**), называемые **красной границей фотоэффекта**, при которых свет любой интенсивности не вызывает фотоэффекта

Фотоэффект как квантовое явление

- Фотоэффект практически **безынерционен** (явление начинается непосредственно сразу после начала облучения).

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + K$$

- Здесь $A_{\text{ВЫХ}}$ – работа выхода электрона из металла, K – максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов.

Противоречие между экспериментальными данными и объяснением явления с т.з. волновой теории света

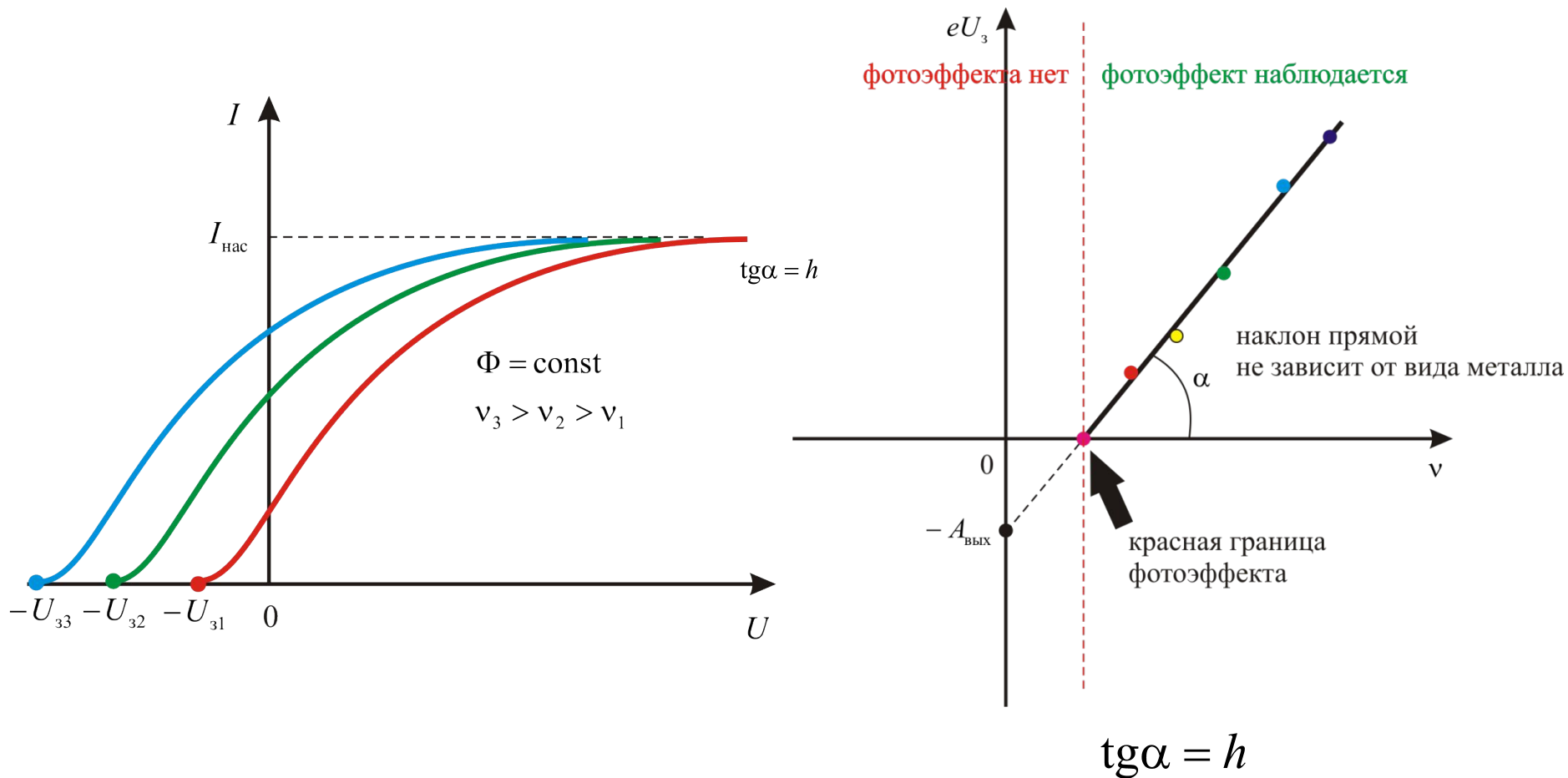
Эксперимент	Волновая теория света
Кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света и прямо пропорциональна частоте падающего излучения	Энергия (интенсивность) электромагнитной волны зависит от квадрата амплитуды волны. Следовательно, кинетическая энергия фотоэлектронов должна зависеть от интенсивности падающего света, а не от его частоты
Существует красная граница фотоэффекта – минимальная частота, при которой свет любой интенсивности не вызывает фотоэффекта	Красной границы фотоэффекта существовать не может: достаточно увеличить интенсивность падающего света для возникновения фотоэффекта
Фотоэффект безынерционен	При малых интенсивностях света электроны накапливают энергию электромагнитной волны, а затем, по мере накопления, происходит их вырывание из металла

Следствия из уравнения Эйнштейна:

- Независимость максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от интенсивности падающего света и прямая пропорциональность K и ν :

$$K = h\nu - A_{\text{вых}} \neq f(\Phi)$$

Экспериментальное подтверждение линейной зависимости K и ν



Следствия из уравнения Эйнштейна: существование красной границы фотоэффекта

- Если $h\nu < A_{\text{ВЫХ}}$, т.е. $\nu < \nu_0 = A_{\text{ВЫХ}}/h$, то фотоэффект не наблюдается (энергии фотона не хватает даже для вырывания электрона из металла).
- Из уравнения Эйнштейна для внешнего фотоэффекта получаем формулы для красной границы фотоэффекта:

$$\nu_0 = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{h}, \quad \lambda_0 = \frac{hc}{A_{\text{ВЫХ}}}$$

ЛЕКЦИЯ 1. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

3. Эффект Комптона

Эффект Комптона

- В 1923 г. А. Комптон обнаружил, что при рассеянии рентгеновского излучения веществом длина волны рассеянного излучения больше, чем длина волны падающего излучения, причем изменение длины волны при рассеянии зависит только от угла рассеяния и не зависит от природы рассеивающего вещества

Формула Комптона

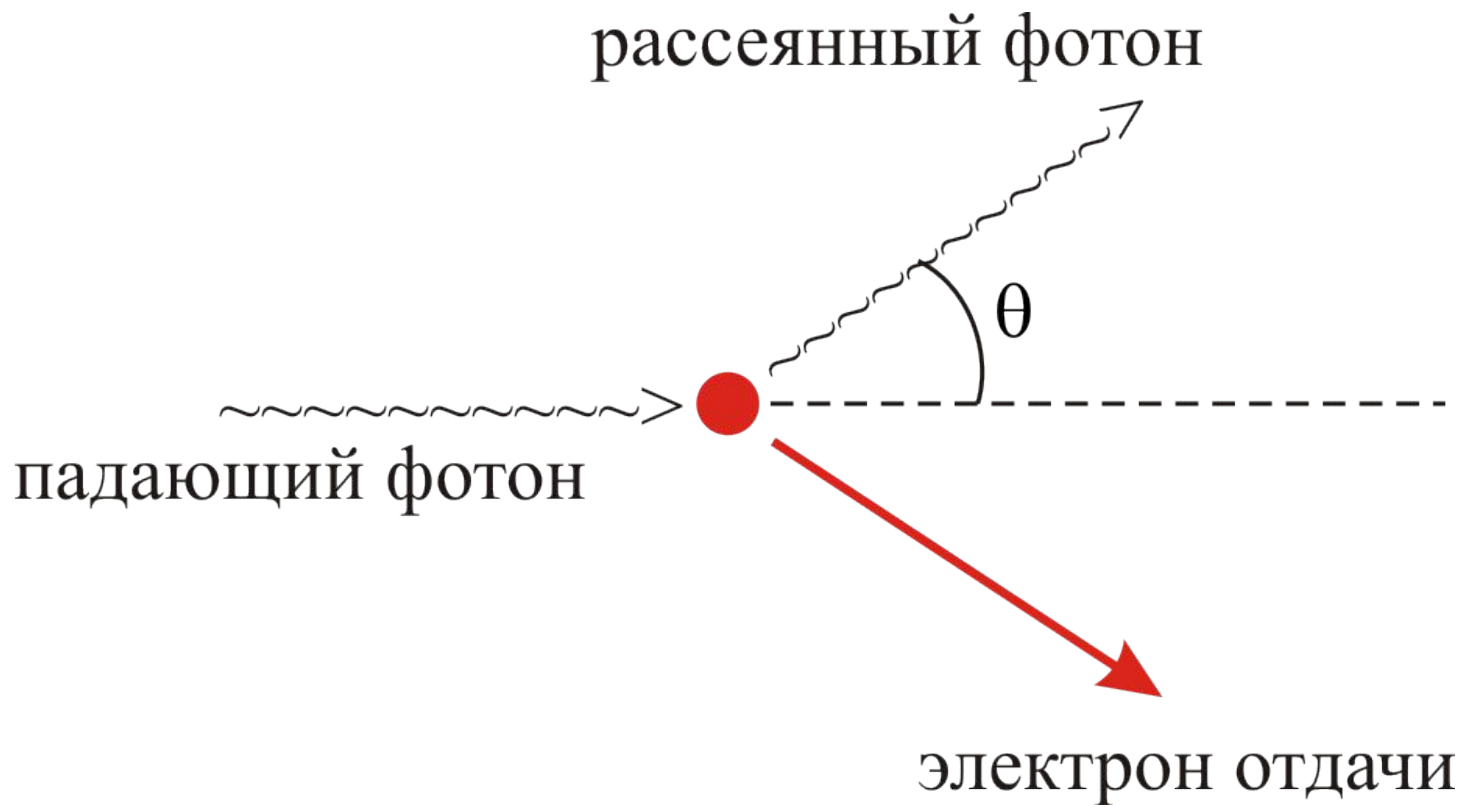
$$\Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta) = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

Здесь $\lambda_c = 2,426$ пм – комптоновская длина волны, θ – угол рассеяния.

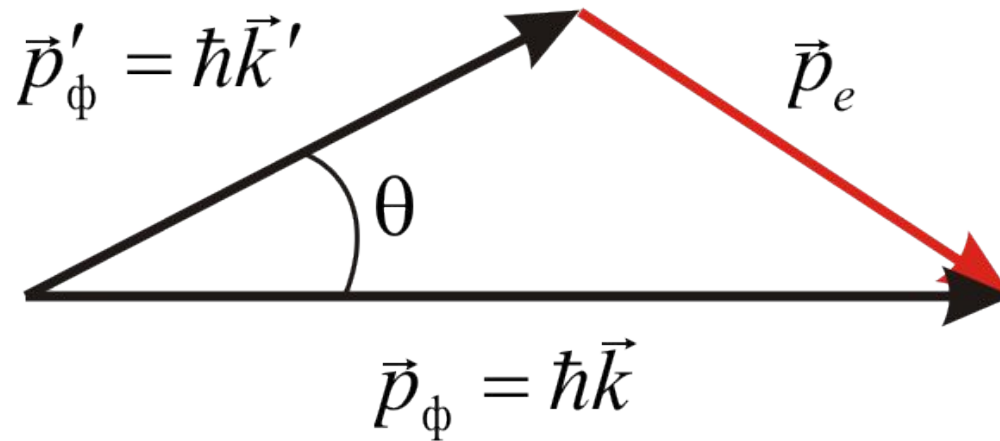
Объяснение Комптоном эффекта:

- Комптон показал, что эффект изменения длины волны излучения при рассеянии объясняется упругим соударением фотона падающего излучения со свободным электроном вещества, в результате которого рассеянный фотон изменяет направление своего движения на угол θ , отдавая часть своей энергии электрону отдачи.

К объяснению эффекта Комптона



Закон сохранения импульса при эффекте Комптона



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

$$p_e^2 = \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda'}\right)^2 - 2\frac{h^2}{\lambda\lambda'}\cos\theta$$

Закон сохранения энергии при эффекте Комптона

$$\frac{hc}{\lambda} + m_0 c^2 = \frac{hc}{\lambda'} + mc^2, \text{ где } mc^2 = \sqrt{p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4}$$

Рассеяние фотонов на связанных электронах вещества

- Рассеяние фотона на связанном с атомом электроном изменение длины волны оказывается настолько малым, что его нельзя обнаружить экспериментально. Поэтому в реальных опытах по рассеянию рентгеновского излучения веществом наблюдается как смещенная компонента, так и несмещенная.

Вывод

- Явления квантовой оптики показывают, что электромагнитное излучение (свет) обладает двойственной природой, получившей название **корпускулярно-волнового дуализма света**