

The background of the image is a spiral-bound notebook with a light beige, textured cover. The metal spiral binding is visible on the left side. The text is written in a bold, green, serif font with a slight drop shadow.

Физика колебаний и волн. Квантовая физика.

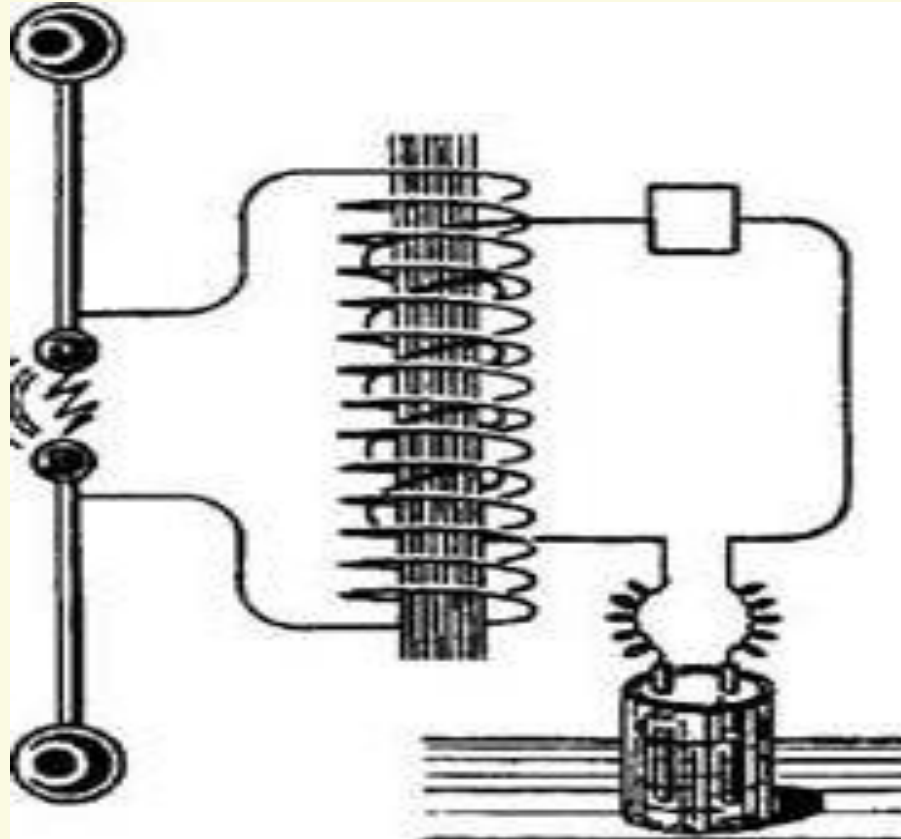
Лекция № 9

Экспериментальные основы квантовой физики.

- 1. Внешний фотоэффект. Уравнение Эйнштейна .*
- 2. Эффект Комптона.*
- 3. Корпускулярно-волновая природа излучения .*

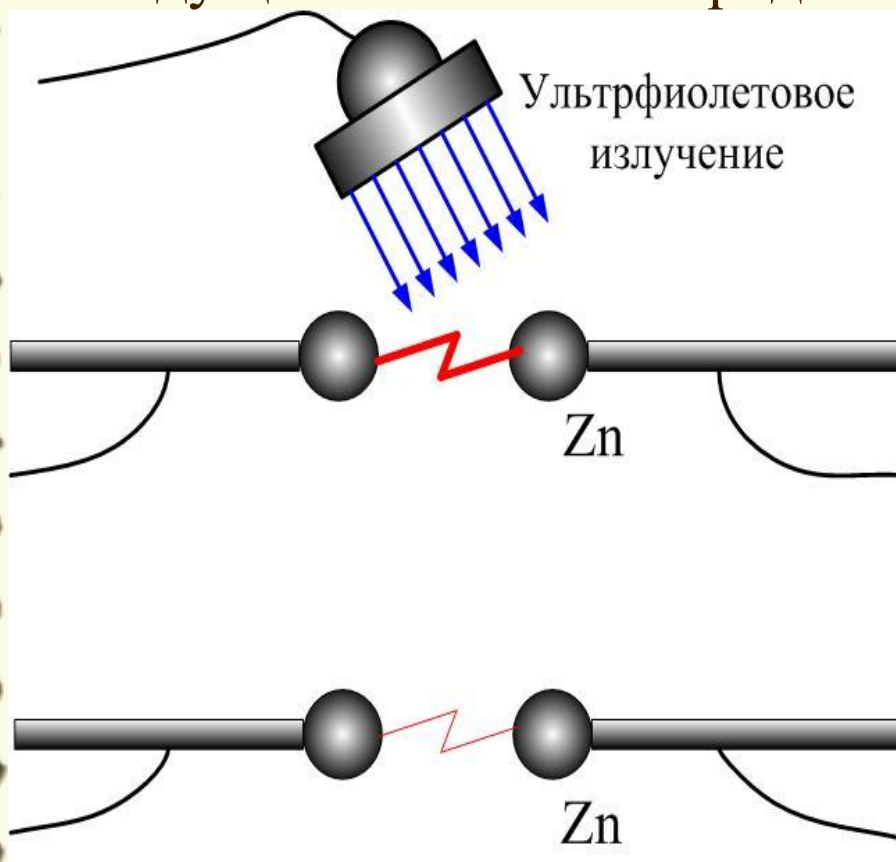
Фотоэффект и его виды

Открыт Г. Герцем в 1887 г. – проскакивание искры между цинковыми шариками разрядника заметно **увеличивается**, если один из шариков осветить УФ лучами.



Открытие фотоэффекта Герцем

Герц (случайно) установил, что ультрафиолетовое излучение усиливает электрический разряд между цинковыми электродами.



Генрих Рудольф Герц
(1857 - 1894)

Из-за несовершенства экспериментальной техники Герцу не удалось подробно исследовать это явление. Некоторые выводы Герца оказались ошибочными.

Виды фотоэффекта

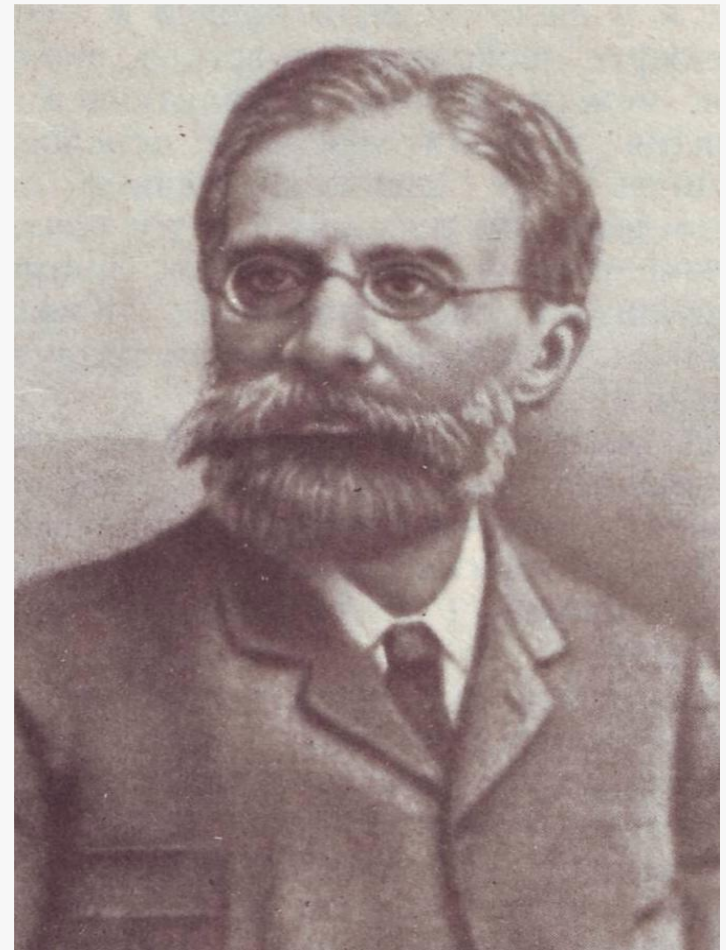
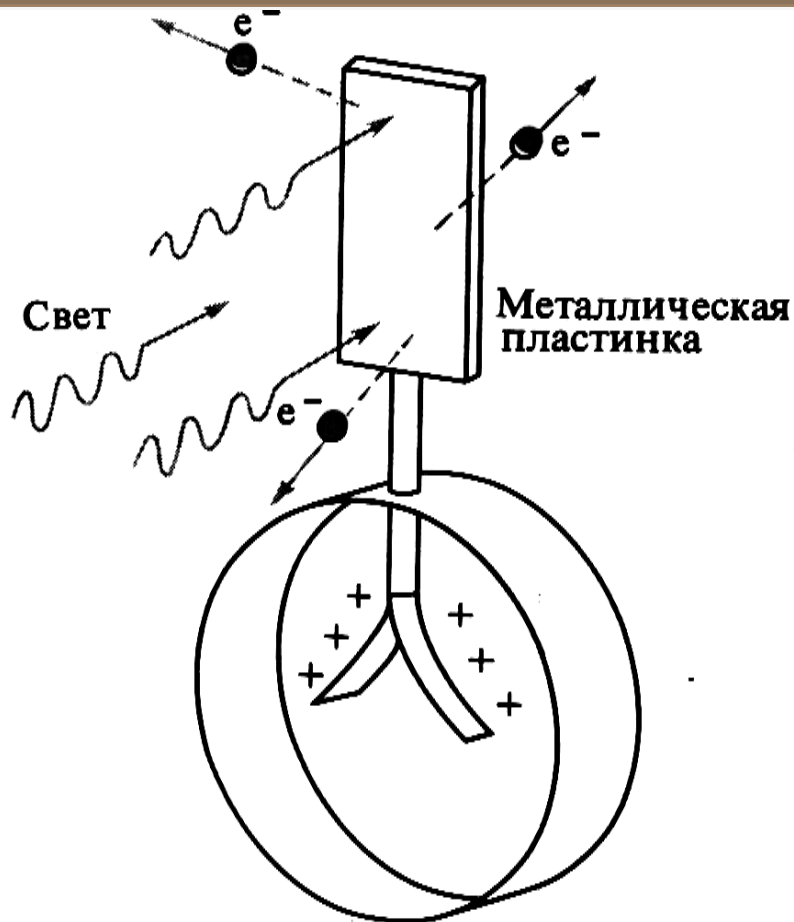
Различают *фотоэффект* *внешний*, *внутренний*, *вентильный* и *многофотонный*.

Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения.

Внутренний фотоэффект – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу.

Вентильный фотоэффект - возникновение эдс (фотоэдс) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля).

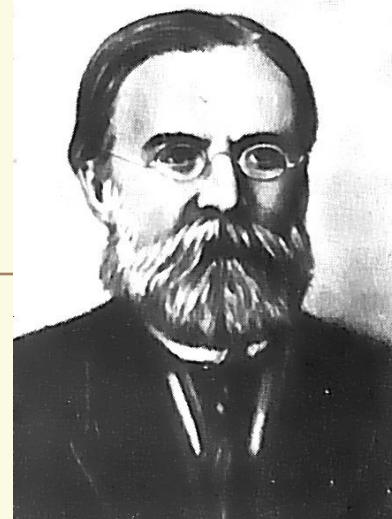
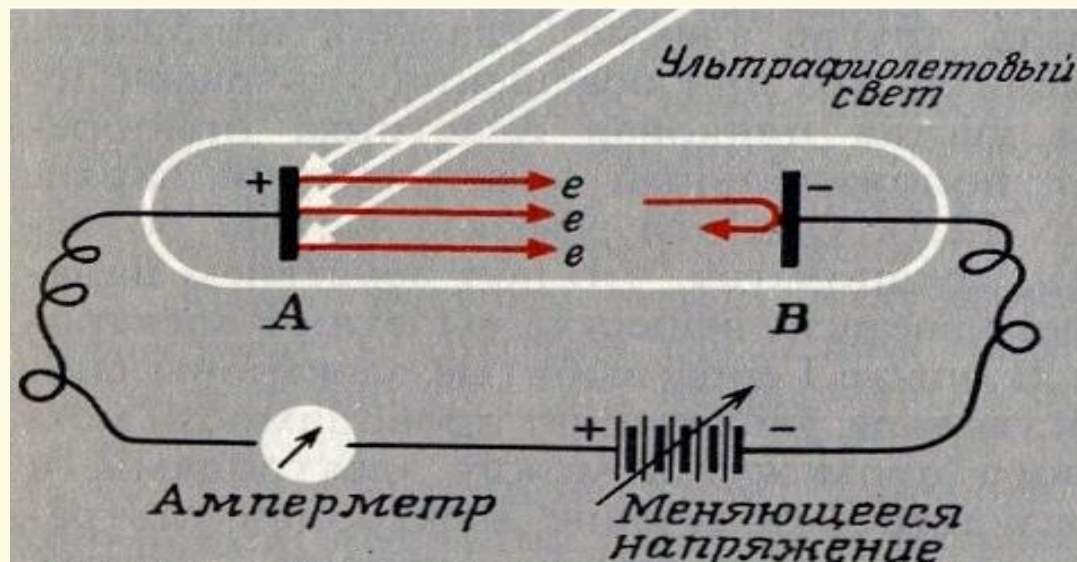
Многофотонный фотоэффект возможен, если интенсивность света очень большая (при использовании лазерных пучков). При этом электрон, испускаемый металлом, может одновременно получить энергию не от одного, а от нескольких фотонов.



Первые фундаментальные исследования фотоэффекта выполнены русским ученым **А.Г. Столетовым.**

Нейтральный электроскоп, соединен с металлической пластинкой. При освещении пластинки светом из нее выбиваются фотоэлектроны, и листочки заряжаются положительно.

Исследования А. Г. Столетова



Александр Григорьевич
Столетов (1839 - 1896)

В 1888 - 1889 г. Столетов исследовал влияние излучения ртутной лампы на прохождение тока через плоский конденсатор с цинковыми пластинами. Он установил, что

- 1) на цинковые пластины действуют только УФ-лучи;
- 2) появление тока наблюдается только при облучении «отрицательной» пластины;
- 3) сила тока пропорциональна световому потоку;
- 4) нет никакой задержки между началом освещения пластины и возникновением тока (безинерционность фотоэффекта).

Схема установки Столетова

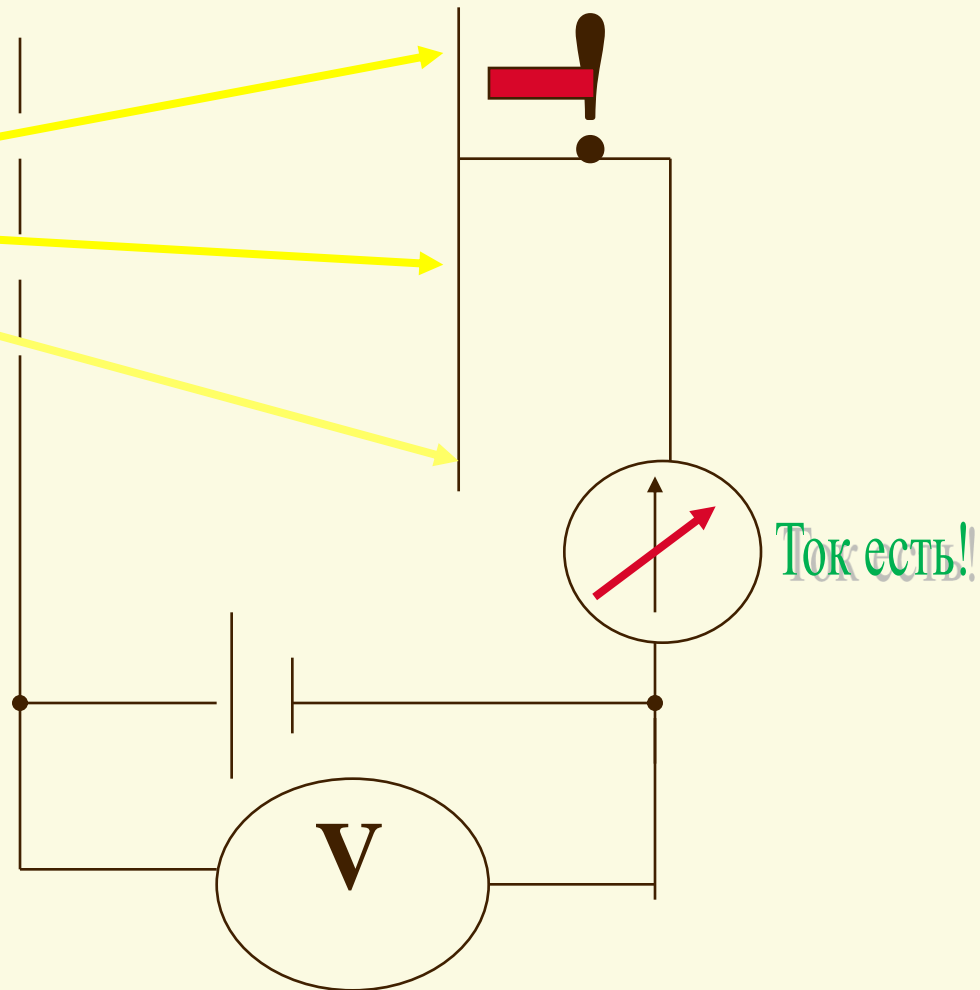
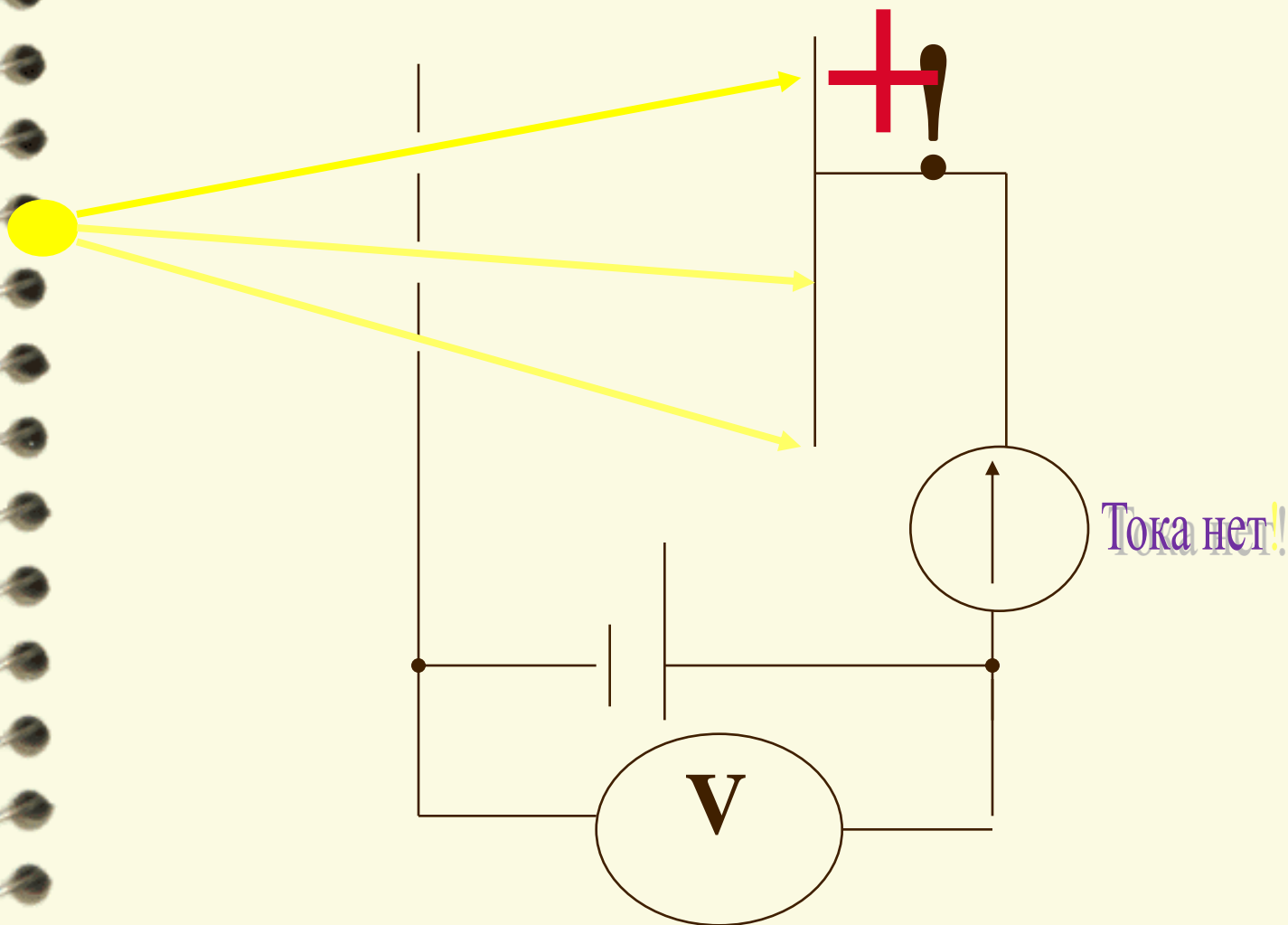
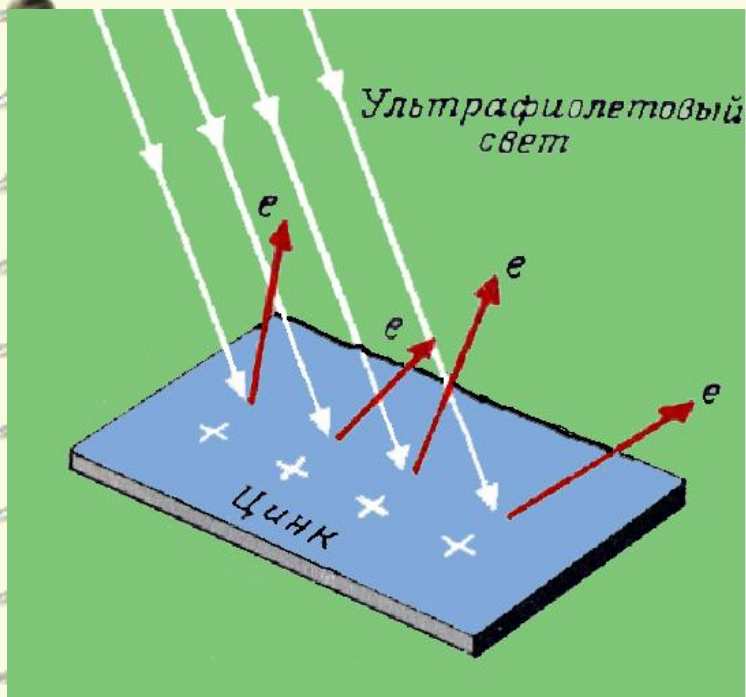


Схема установки Столетова

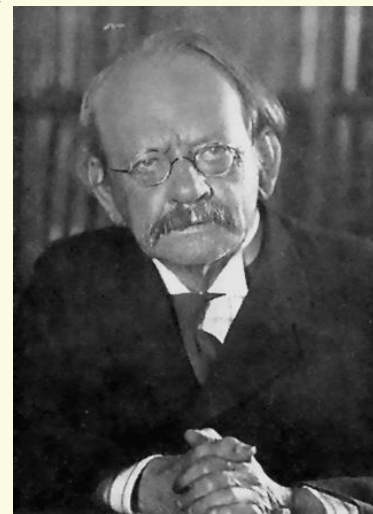


Исследования Леннарда и Томсона



1. Леннард и Томсон доказали, что из пластины вылетают электроны.
2. Подтвердили, что ток насыщения пропорционален световому потоку.
3. Определили задерживающее напряжение

$$\frac{mV^2}{2} = eU_3$$



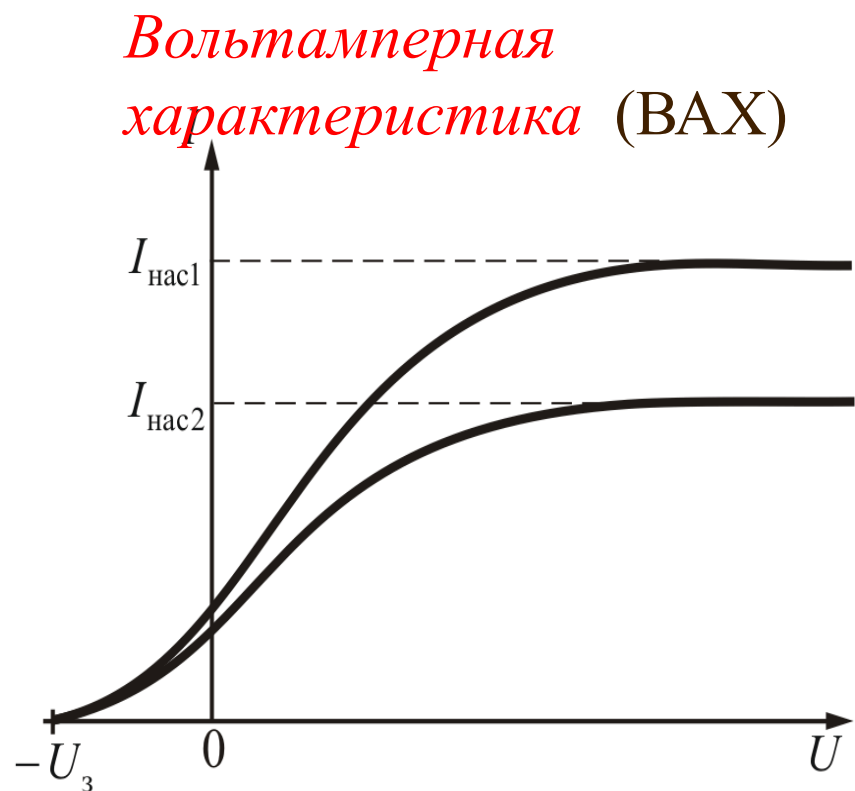
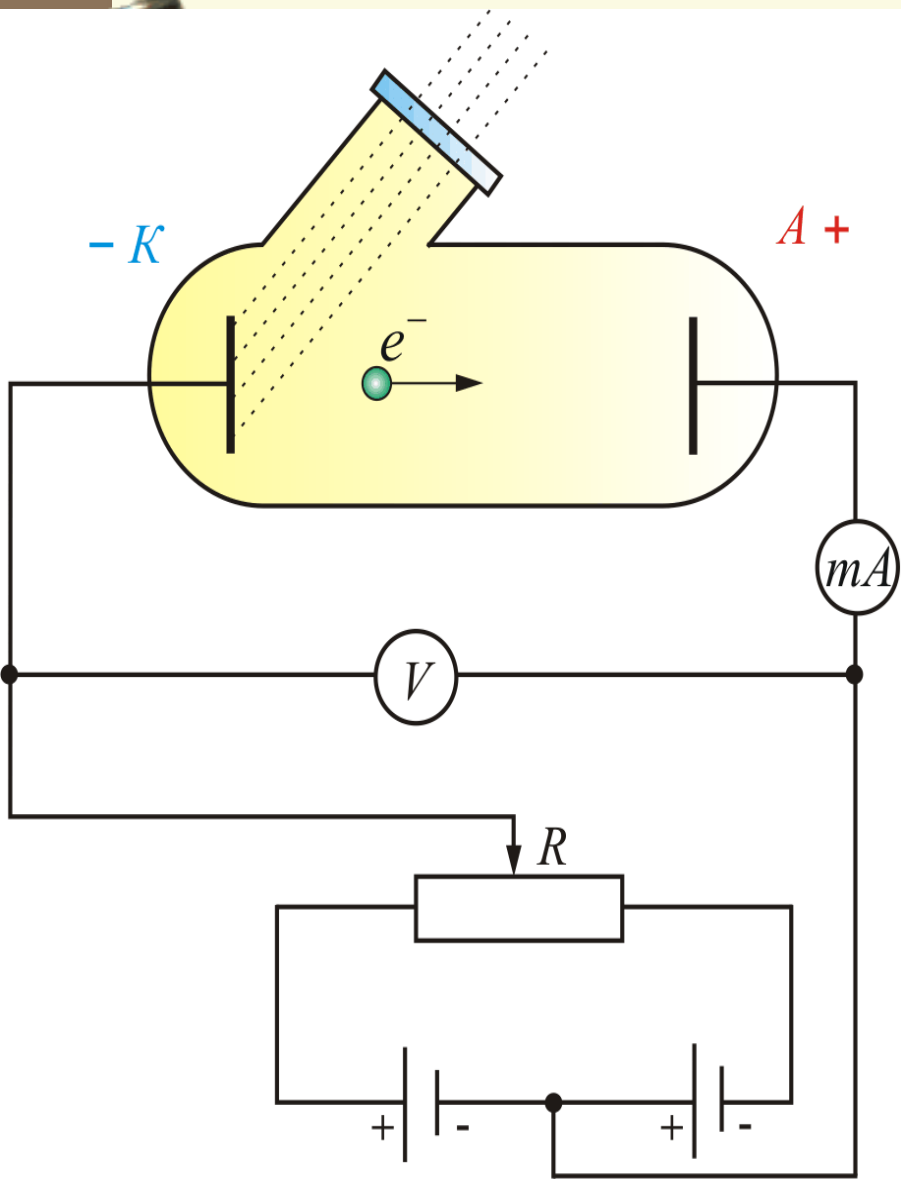
Джозеф Джон Томсон
(1856 - 1940)

4. Величина U_3 не зависит от светового потока и для данного материала определяется

частотой излучения: $U_3 = k\nu - U_0$

5. Существует «красная граница» фотоэффекта, т.е. минимальная частота излучения, при которой еще возможен фотоэффект.

В 1899 Дж. Дж. Томпсон и Ф. Ленард доказали, что при фотоэффекте *свет выбивает из вещества электроны*.



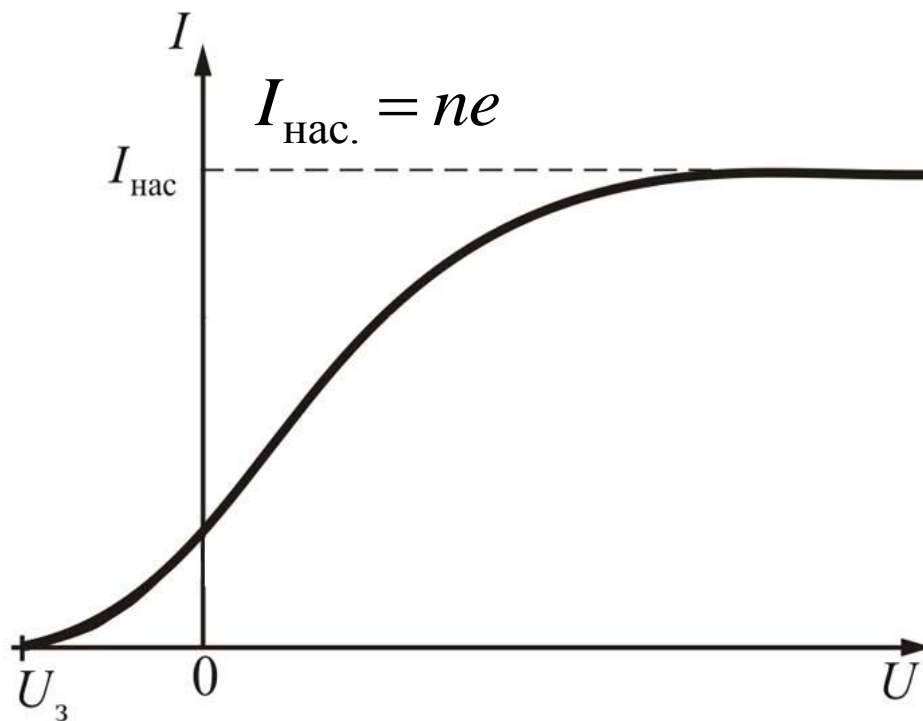
Максимальное значение тока $I_{\text{нас.}}$ – *фототок насыщения* – определяется таким значением U , при котором *все электроны, испускаемые катодом, достигают анода:*

$$I_{\text{нас.}} = ne,$$

где n – число электронов испускаемых катодом в 1 с.

Для того чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить *задерживающее напряжение U_3*

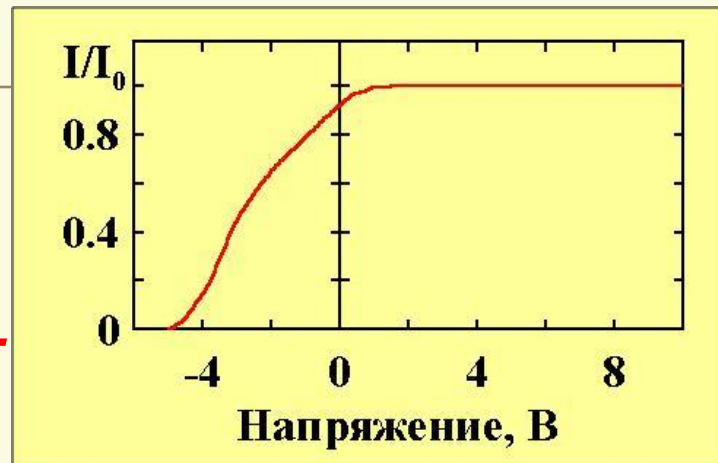
$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = eU_3$$



Законы внешнего фотоэффекта

Сила тока пропорциональна световому потоку, сл-но,

1. **Количество фотоэлектронов, вырываемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны (интенсивности света).**



2. **Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов** линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.

$$\frac{mV^2}{2} = eU_3, \quad U_3 = k\nu - U_0, \quad \frac{mV^2}{2} = k\nu - U_0$$

Законы внешнего фотоэффекта:

1. *Закон Столетова:* при фиксированной частоте падающего света *число фотоэлектронов*, вырываемых из катода в единицу времени, *пропорционально интенсивности света.*
2. *Максимальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой ν .*
3. *Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. минимальная частота ν_0 света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен:*
$$\nu \geq \nu_0 = \frac{A}{h}$$

Почему нельзя объяснить фотоэффект с классических позиций?

Классическая модель фотоэффекта. Электромагнитная волна «раскачивает» электроны вещества. Электроны ускоряются. Некоторые из них вылетают из металла.

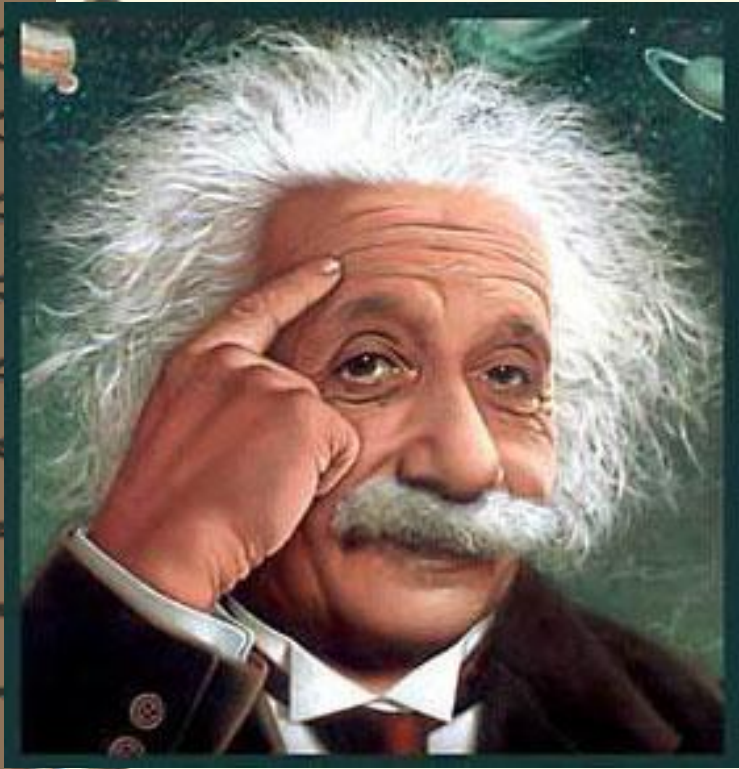
Противоречия классической модели эксперименту.

1. Величина задерживающего напряжения должна быть пропорциональна световому потоку. (Световой поток пропорционален энергии излучения).
2. В этом случае фотоэффект должен иметь резонансный характер. При совпадении частоты излучения с собственной частотой колебаний электрона в атоме должен наблюдаться максимум фототока.
3. Фотоэффект не должен быть безинерционным. Чем дольше электромагнитная волна «раскачивает» электрон, тем больше его скорость и энергия. В 1914 г. Майер и Герлах оценили минимальное время, необходимое для «раскачки» электрона. Оно оказалось порядка нескольких минут.

Кто дал объяснение явлению фотоэффекта?

Альберт Энштейн (1879-1955) – великий физик XX века. Им создано новое учение о пространстве и времени – специальная теория относительности. Энштейн впервые ввел представление о частицах света – фотонах, дал объяснение явлению фотоэффекта разработал теорию броуновского движения.





Объяснение наблюдаемых экспериментально закономерностей было дано Эйнштейном:

Свет не только испускается (Планк), но и распространяется, и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых :

$$E = h\nu.$$

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = \frac{mv_{\max}^2}{2} + A.$$

где A – работа выхода электронов.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

В отличие от Планка Эйнштейн постулировал, что само световое излучение, а не только механизм его испускания - поглощения имеет дискретный характер.

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mV_{\text{max}}^2}{2}$$

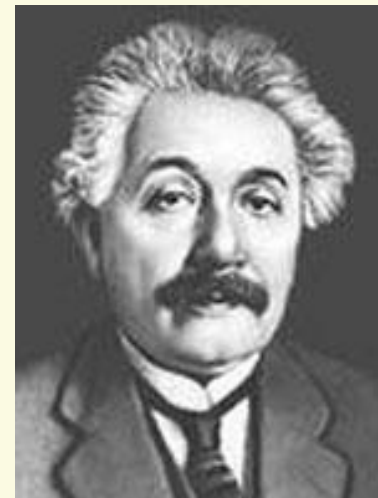
Это уравнение позволило объяснить все наблюдаемые свойства фотоэффекта.

1. Безинерционность.

2. Сила тока пропорциональна числу поглощенных *квантов света*, т.е. энергии света.

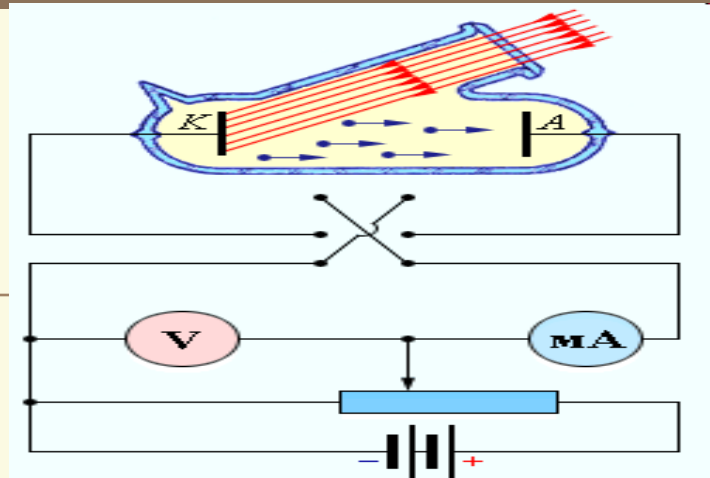
4. «Красная граница»

$$3. \frac{mV_{\text{max}}^2}{2} = h\nu - A_{\text{вых}} \quad E_{\text{кин}} = 0, \nu_{\text{кр}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$$



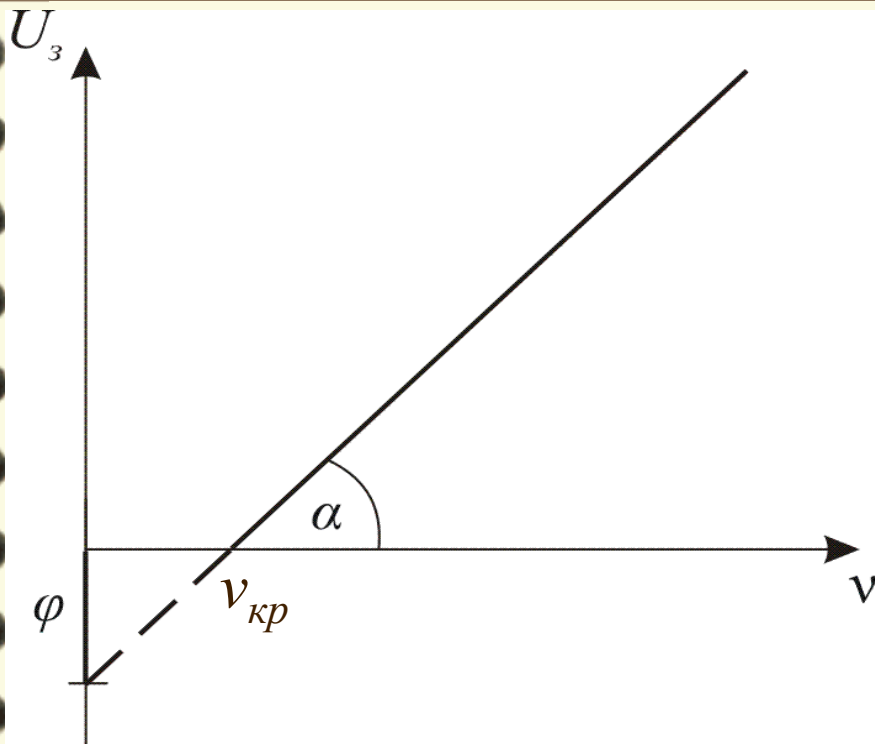
Альберт Эйнштейн
(1879 - 1955)

Из теории Эйнштейна для фотоэффекта следует:



1. Увеличение интенсивности света означает увеличение числа налетающих фотонов, которые выбивают с поверхности металла больше электронов. Но так как энергия фотонов одна и та же, максимальная кинетическая энергия электрона не изменится (подтверждение I закона фотоэффекта).
2. При увеличении частоты падающего света максимальная кинетическая энергия электронов возрастает линейно по формуле Эйнштейна (т.е. II закон фотоэффекта).

$$\frac{mv_{\text{макс.}}^2}{2} = h\nu - A_{\text{вых}}$$



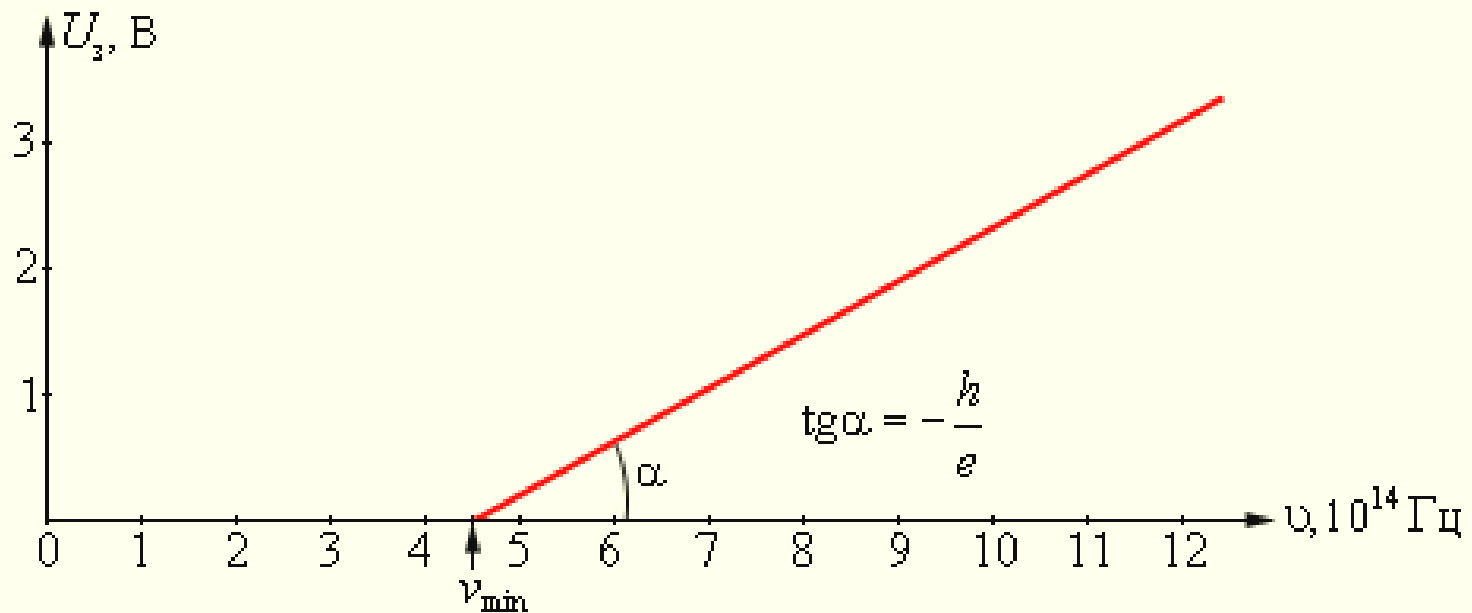
$$\frac{m v_{\text{макс.}}^2}{2} = h \nu - A_{\text{вых}}$$

$$e U_3 = h(\nu - \nu_0)$$

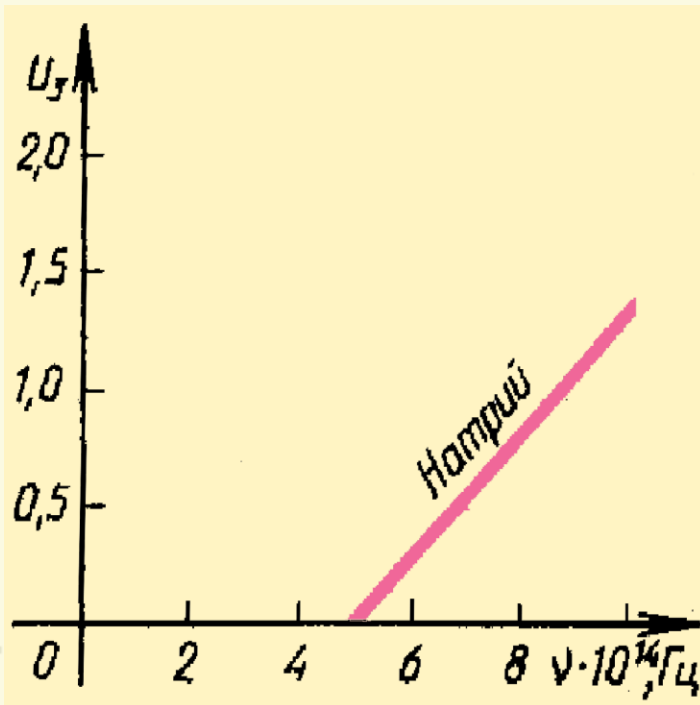
3. Если частота ν меньше циклической частоты ν_{kp} , при которой $h\nu_{kp} = A_{\text{вых}}$, то выбивание электронов с поверхности не происходит. (III закон). Уравнение Эйнштейна было подтверждено опытами Милликена, выполненными в 1913 – 1914 гг.

Третий закон фотоэффекта

Для каждого вещества существует минимальная частота ν_{\min} (так называемая **красная граница фотоэффекта**), ниже которой фотоэффект НЕВОЗМОЖЕН.



Красная граница фотоэффекта



При $\nu < \nu_{\min}$ ни при какой интенсивности волны падающего на фотокатод света фотоэффект не произойдет!

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

Для каждого вещества
своя!!!

Фотонная теория света.

Масса, энергия и импульс фотона

В 1905г. Эйнштейн выдвинул смелую идею, обобщавшую гипотезу квантов, и положил ее в основу новой теории света (квантовой теории фотоэффекта).

Согласно Эйнштейну *свет частотой ν не только испускается, как это предполагал Планк, но и распространяется и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых*

$$E_{\phi} = h\nu.$$

Таким образом, распространение света нужно рассматривать не как непрерывный волновой процесс, а как поток локализованных в пространстве дискретных световых квантов, движущихся со скоростью c распространения света в вакууме

Кванты электромагнитного излучения получили название *фотонов*.

Масса, энергия и импульс фотона

Фотон обладает энергией $E = h\nu = h(c/\lambda)$.

Для видимого света $\lambda = 500 \text{ \AA}$ и $E = 2,2 \text{ эВ}$,
для рентгеновских лучей $\lambda = 10^{-4} \text{ \AA}$ и $E = 0,5 \text{ эВ}$.

Фотон обладает инертной массой:

$$E = mc^2 \Rightarrow m_{\phi} = E/c^2 = hc/\lambda c^2 = h/c\lambda;$$

$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$$

Фотон движется со скоростью света $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Подставим это значение скорости в выражение:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - 1}} = \frac{m_0}{0} \rightarrow \infty.$$

$m_{\text{фотона}} = 0$

Фотон – частица, не обладающая массой покоя потому, что она может существовать только двигаясь со скоростью света c .

*Релятивистское выражение
для импульса:*

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

И для энергии:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Отсюда связь :

$$E = c \sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}$$

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{\hbar\omega}{c}, \quad p = \frac{h}{\lambda}, \quad k = \frac{\omega}{c} \text{ — волновое число}$$

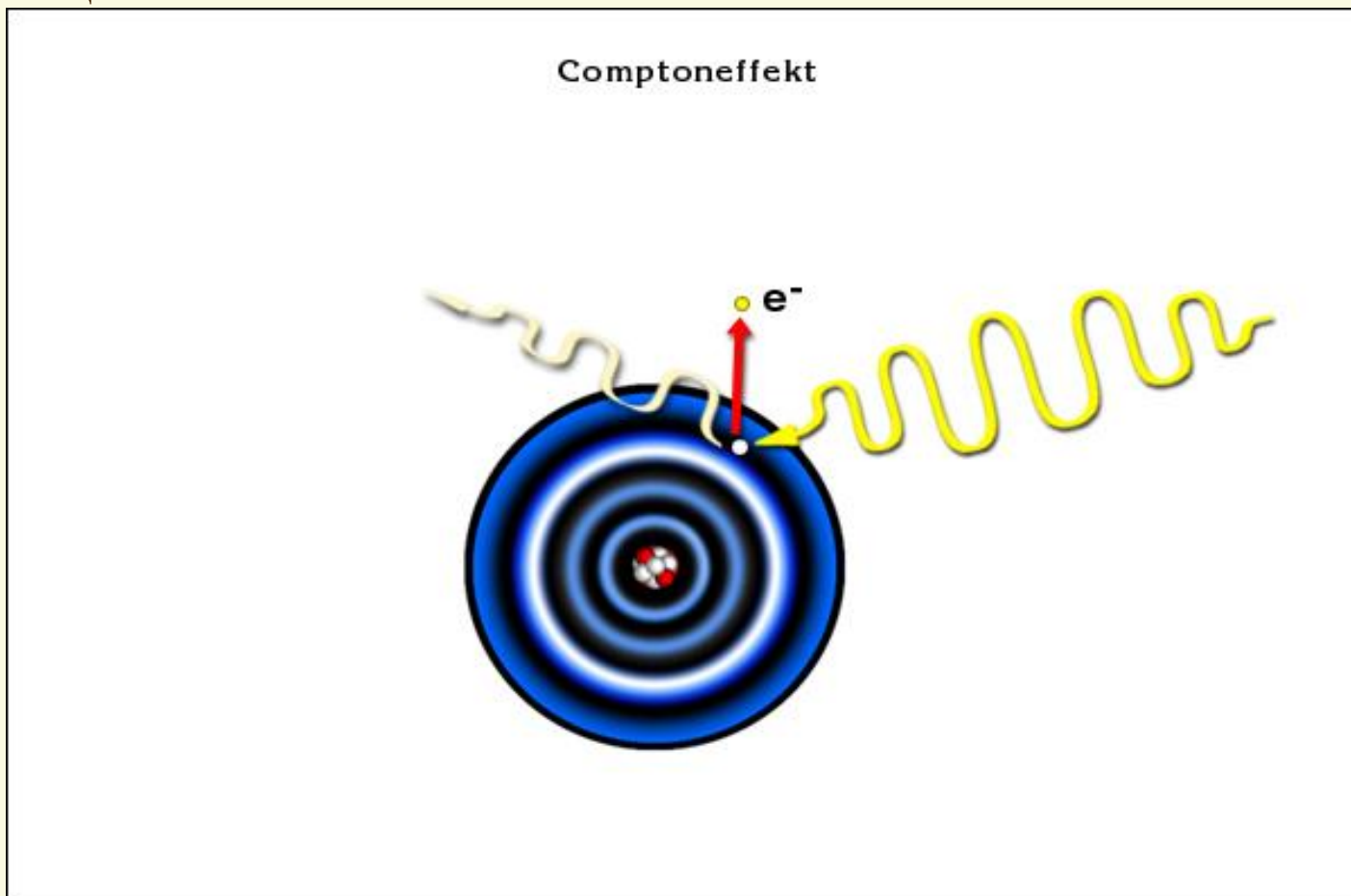
$$\vec{p} = \hbar \vec{k}$$

- импульс фотона.

\vec{k} — волновой вектор фотона.

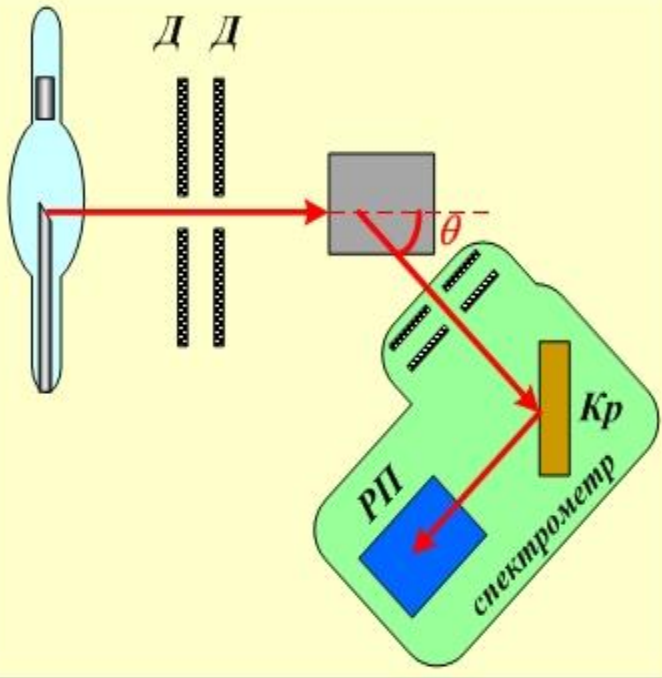
Эффект Комптона

А.Г. Комптон занимался изучением рассеяния рентгеновского излучения различными веществами и обнаружил, что частота рассеянного света меньше частоты падающего света.

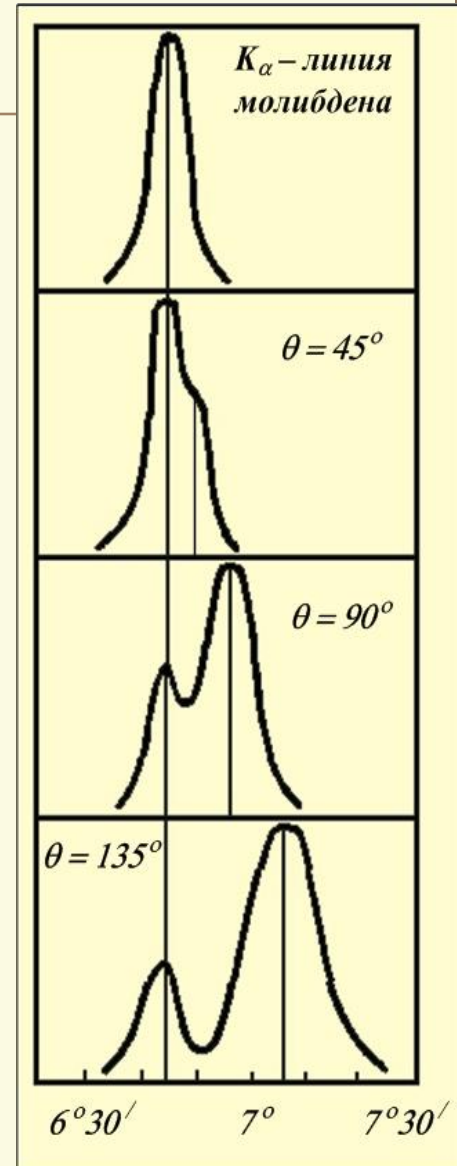


Эффект Комптона.

(Неупругое рассеяние рентгеновских фотонов на электронах)



Э. Комптон в 1922 - 23 г. исследовал взаимодействие характеристического рентгеновского излучения молибдена (K_α — линию) с различными веществами. Он обнаружил, что если наблюдать спектр излучения молибдена под некоторым углом к оси исходного рентгеновского пучка, то появляется дополнительная длинноволновая линия.



Экспериментально было установлено, что изменение длины волны при рассеянии рентгеновского излучения составляет $\Delta\lambda = \lambda(1 - \cos \vartheta) = 2\lambda \sin^2 \vartheta/2$

$$\lambda = 2,42 \cdot 10^{-12} \text{ (м)}.$$

Объяснить этот эффект можно, рассмотрев взаимодействие рентгеновских фотонов с электронами. (Если бы фотоны взаимодействовали с атомами вещества, результат зависел бы от рода вещества).

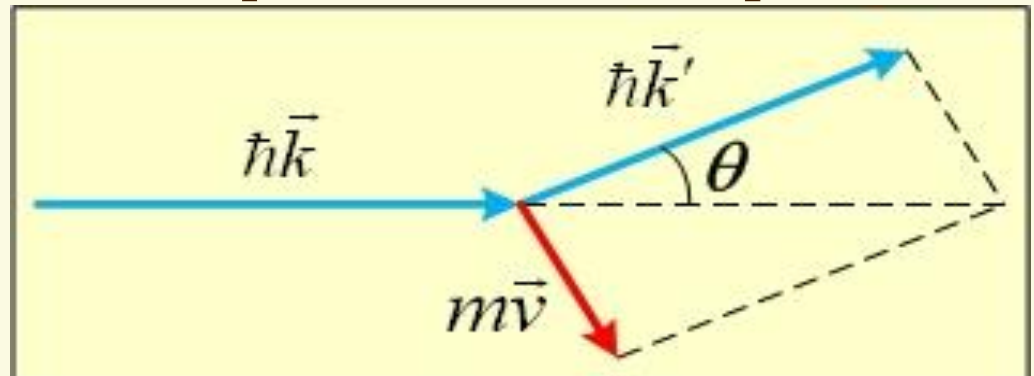
Рассмотрим столкновение рентгеновского фотона с электроном.

$m\vec{v}$ — импульс
электрона,

ϑ — угол рассеяния,

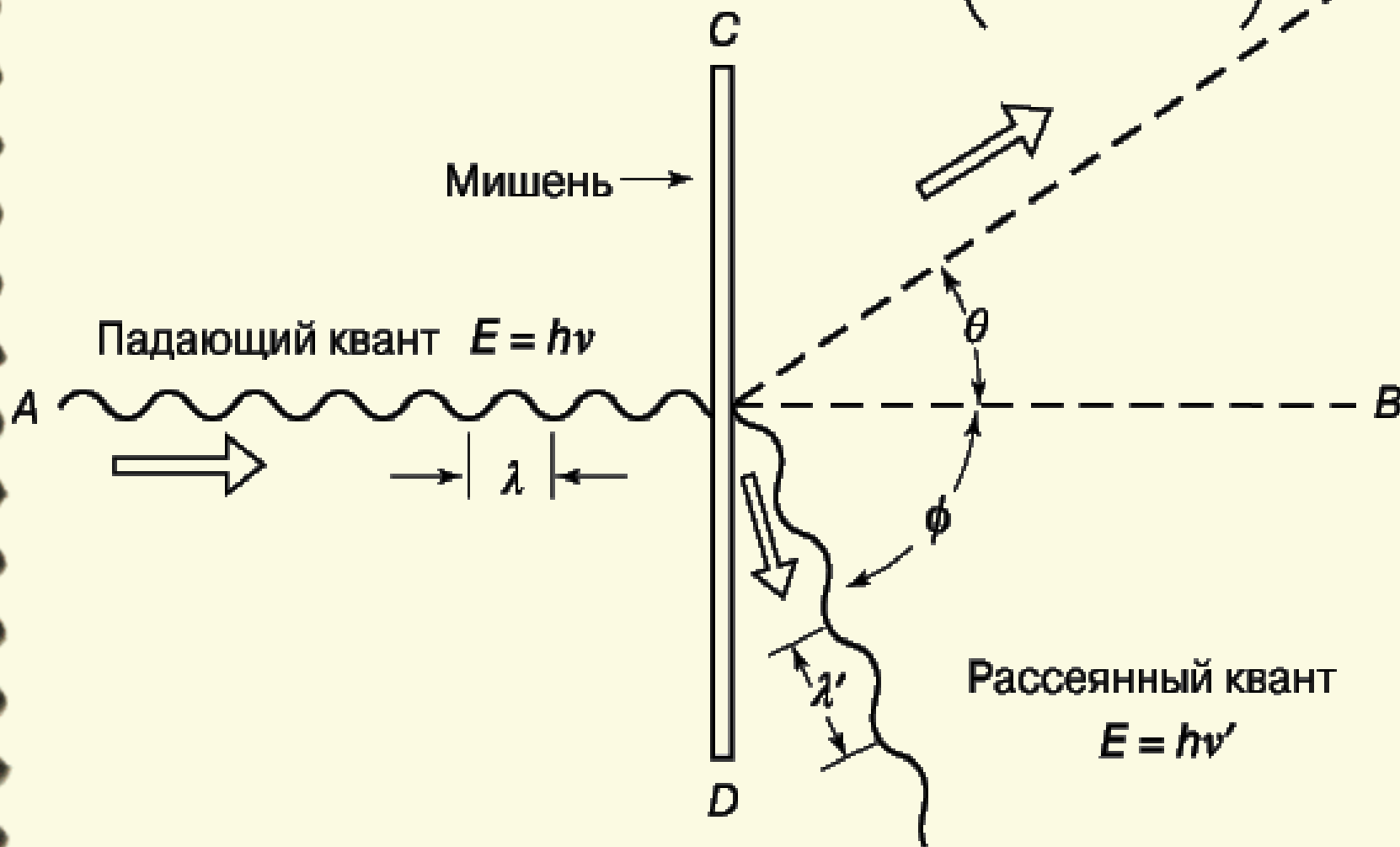
$\hbar\vec{k}$ — импульс фотона до столкновения,

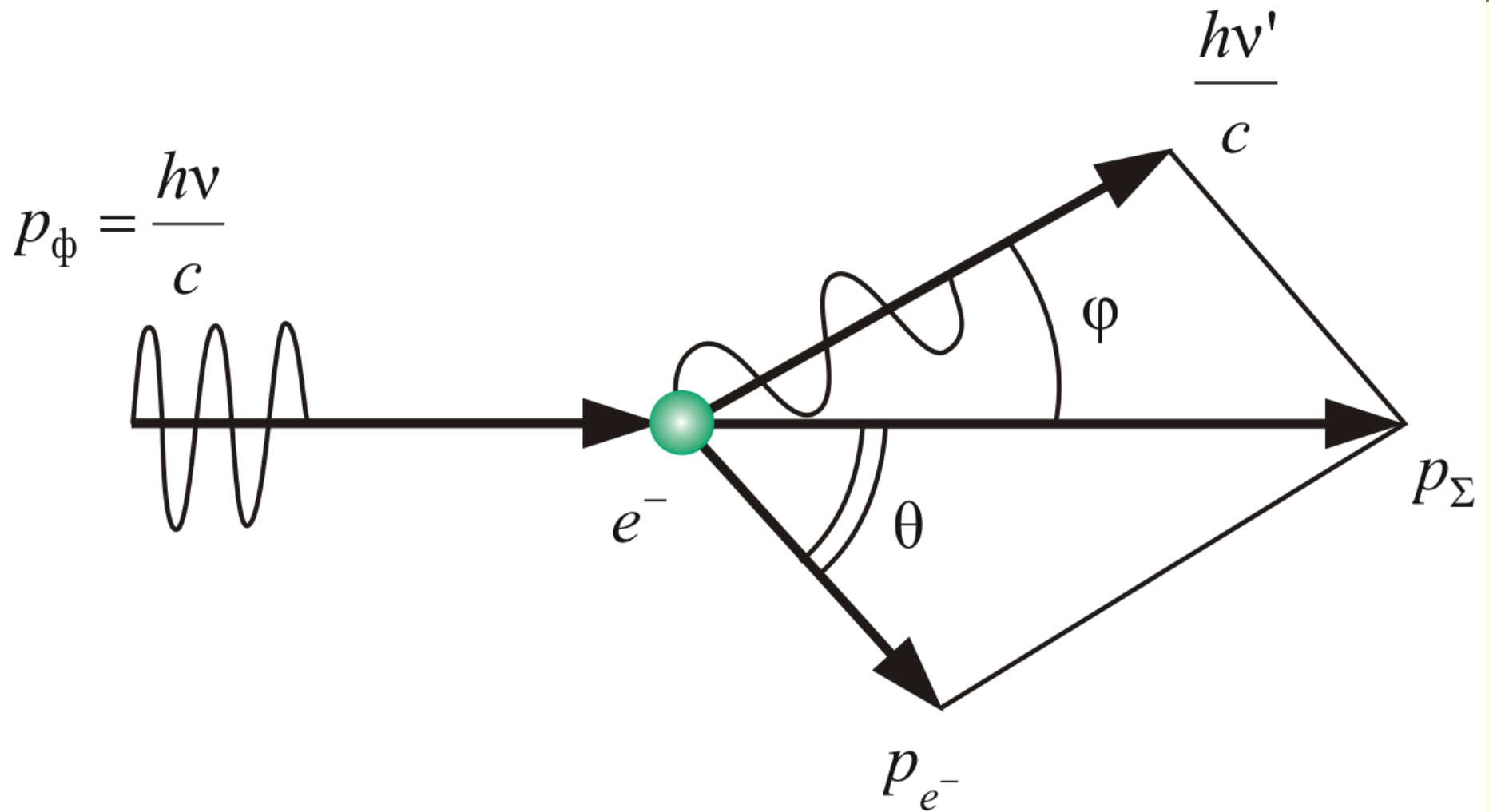
$\hbar\vec{k}'$ — импульс фотона после столкновения.



Электрон отдачи

$$E = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right)$$





$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_e \sin^2 \frac{\phi}{2},$$

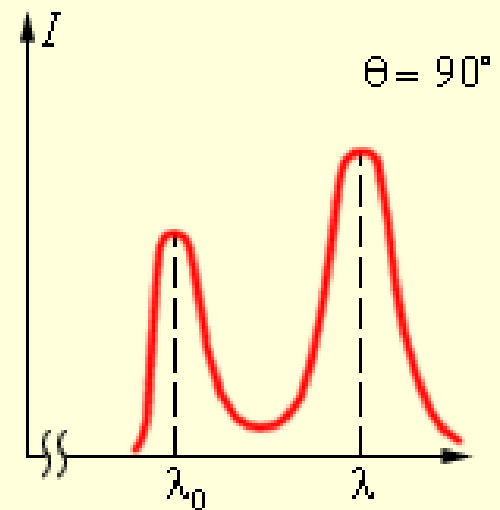
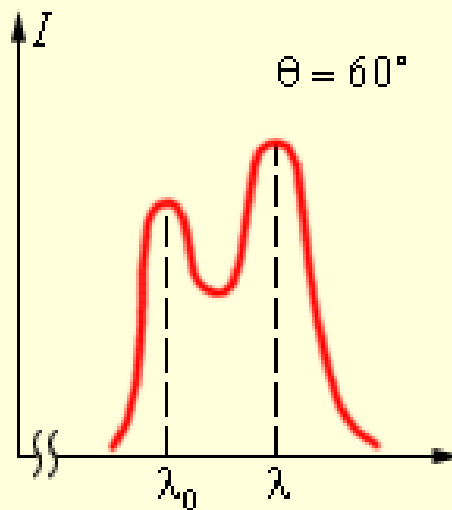
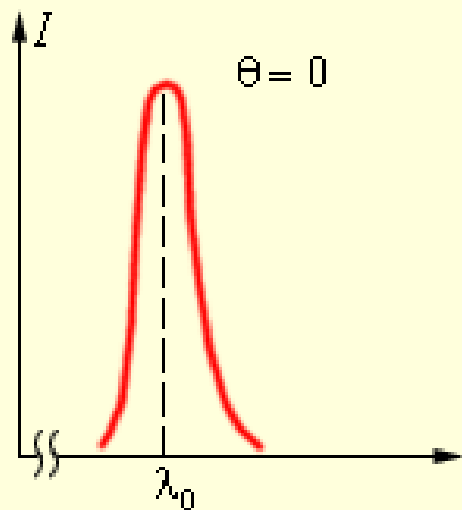
Опыты показали, что *разность* $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ *не зависит от длины волны λ падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только углом рассеяния φ*

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_e \sin^2 \frac{\varphi}{2},$$

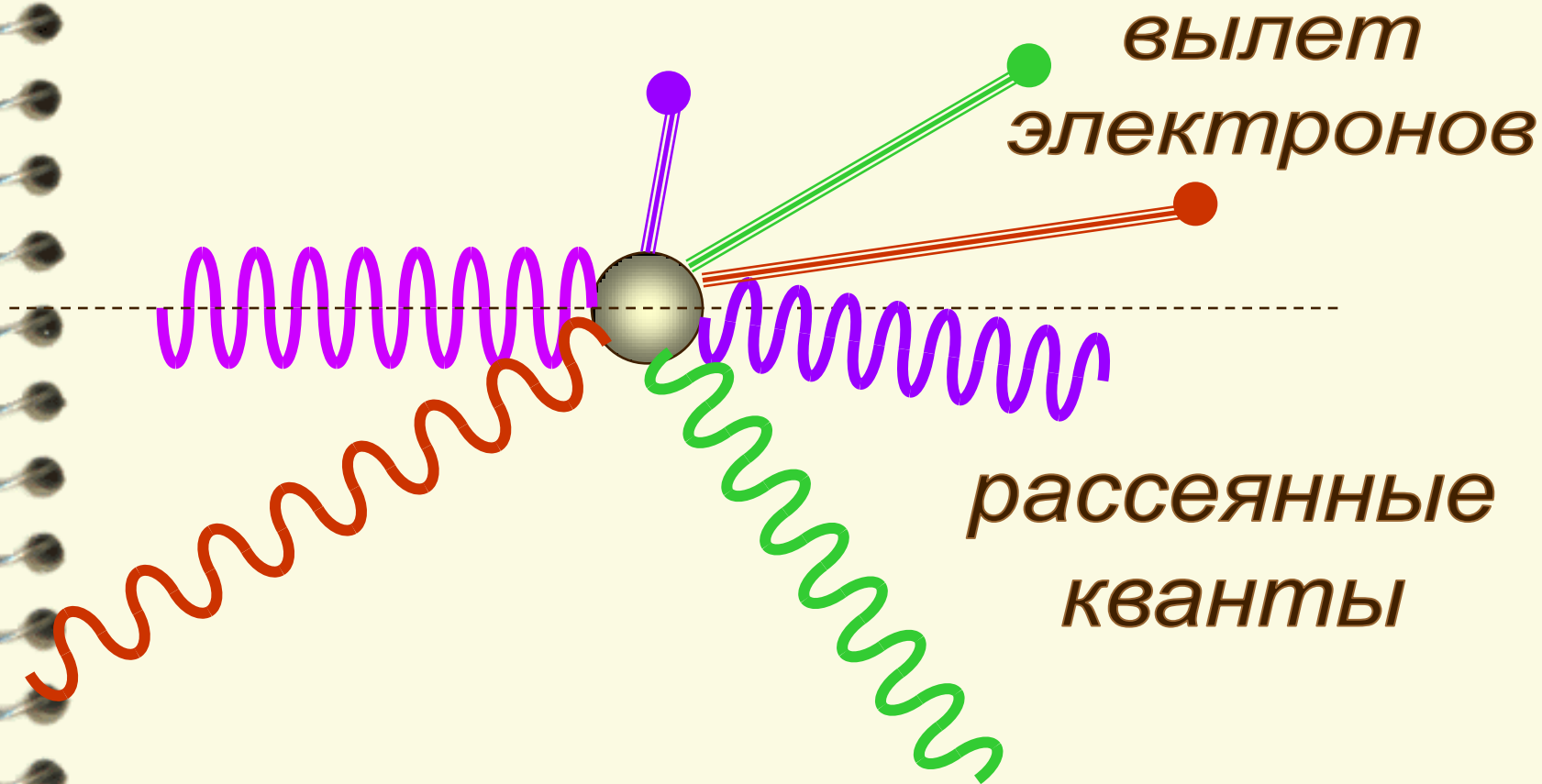
λ' — длина волны рассеянного излучения,

λ_e — КОМПТОНОВСКАЯ длина волны

(при рассеянии фотона на электроне $\lambda_e = 2,426$ пм).



Моделирование эффекта Комптона



До столкновения.

Фотон: $\vec{p} = \hbar \vec{k}$, $E = \hbar \omega$.

Электрон: $\vec{p} = 0$, $E = mc^2$.

После столкновения.

Фотон: $\vec{p} = \hbar \vec{k}'$, $E = \hbar \omega'$.

Электрон: $\vec{p} \neq 0$,

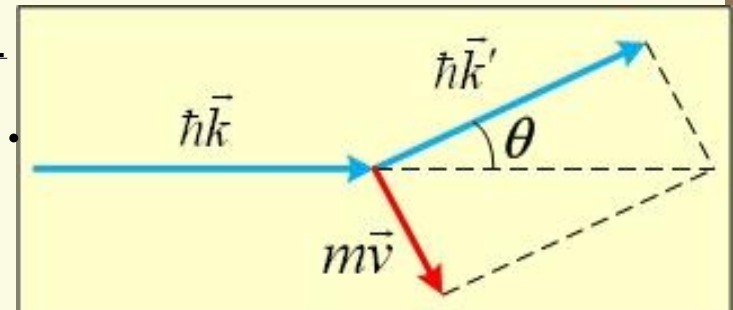
$$E = c\sqrt{p^2 + m^2 c^2}.$$

Закон сохранения энергии:

$$\hbar \omega + mc^2 = \hbar \omega' + c\sqrt{p^2 + m^2 c^2}.$$

Закон сохранения импульса:

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



$$\left[\begin{array}{l} \hbar \omega + mc^2 = \hbar \omega' + c\sqrt{p^2 + m^2 c^2}, \\ \hbar \vec{k} = \hbar \vec{k}' + \vec{p}. \end{array} \right.$$
 Разделим первое уравнение системы на скорость света c :

$$\hbar \frac{\omega}{c} + mc = \hbar \frac{\omega'}{c} + \sqrt{p^2 + m^2 c^2},$$

$$\hbar \frac{\omega}{c} + mc = \hbar \frac{\omega'}{c} + \sqrt{p^2 + m^2 c^2}, \quad \frac{\omega}{c} = k, \quad \frac{\omega'}{c} = k',$$

k, k' — модули волновых векторов.

$$\hbar k + mc = \hbar k' + \sqrt{p^2 + m^2 c^2},$$

$$\hbar(k - k') + mc = \sqrt{p^2 + m^2 c^2}.$$

Возведём в квадрат:

$$(\hbar(k - k') + mc)^2 = p^2 + m^2 c^2.$$

$$\hbar^2 (k - k')^2 + 2\hbar(k - k')mc + m^2 c^2 = p^2 + m^2 c^2.$$

$$p^2 = \hbar^2 (k - k')^2 + 2\hbar mc(k - k').$$

Второе уравнение системы – векторное. Для его решения применим теорему косинусов.

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

$$\hbar (\vec{k} - \vec{k}') = \vec{p},$$

Возведём в квадрат;

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

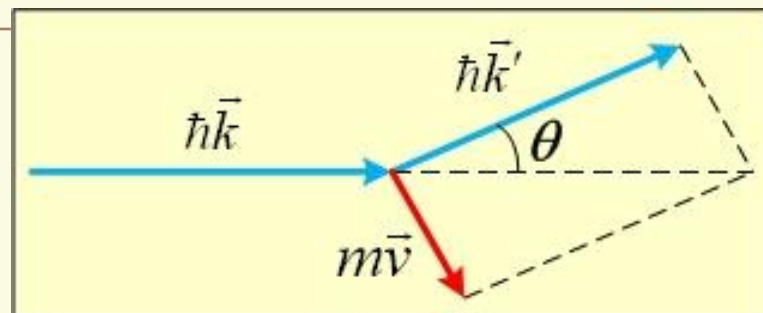
$$p^2 = \hbar^2 (k^2 - 2kk' \cos \vartheta + k'^2).$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p^2 = \hbar^2 (k - k')^2 + 2\hbar mc (k - k'). \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p^2 = \hbar^2 (k^2 - 2kk' \cos \vartheta + k'^2), \end{array} \right.$$

Первое уравнение получено из закона сохранения энергии, второе уравнение системы – из закона сохранения импульса.

$$\hbar^2 (k^2 - 2kk' \cos \vartheta + k'^2) = \hbar^2 (k - k')^2 + 2\hbar mc (k - k').$$



$$\hbar^2 (k^2 - 2kk' \cos \vartheta + k'^2) = \hbar^2 (k - k')^2 + 2\hbar mc (k - k'),$$

$$\hbar^2 k^2 - 2\hbar^2 kk' \cos \vartheta + \hbar^2 k'^2 = \hbar^2 k^2 - 2\hbar^2 kk' + \hbar^2 k'^2 + 2\hbar mc (k - k'),$$

$$-\hbar kk' \cos \vartheta = -\hbar kk' + mc (k - k'),$$

$$\hbar kk' - \hbar kk' \cos \vartheta = mc (k - k'),$$

$$\hbar kk' (1 - \cos \vartheta) = mc (k - k'), \quad | : mc kk'$$

$$\frac{\hbar kk'}{mckk'} (1 - \cos \vartheta) = \frac{mc (k - k')}{mckk'},$$

$$\frac{\hbar}{mc} (1 - \cos \vartheta) = \frac{(k - k')}{kk'},$$

$$\frac{\hbar}{mc} (1 - \cos \vartheta) = \frac{1}{k'} - \frac{1}{k},$$

$$\frac{\hbar}{mc}(1 - \cos \vartheta) = \frac{1}{k'} - \frac{1}{k},$$

$$\frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos \vartheta) = \frac{2\pi}{k'} - \frac{2\pi}{k},$$

$$\frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos \vartheta) = \lambda' - \lambda,$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos \vartheta) = \frac{h}{mc}(1 - \cos \vartheta).$$

$$\Lambda = \frac{2\pi\hbar}{mc} = \frac{h}{mc} = 2,42 \cdot 10^{-12} \text{ (м)} - \text{Комптоновская}$$

длина волны

Корпускулярно-волновой дуализм излучения

Свет по своей природе дуалистичен
(*двойственная природа света*):

с одной стороны он проявляет ярко
выраженные *волновые свойства* -
интерференцию, дифракцию, а с другой
проявляет себя, как *поток частиц* -
фотонов.

Двойственная природа излучения

Основной постулат корпускулярной теории электромагнитного излучения, звучит так:

Электромагнитное излучение (и в частности, свет) — это поток частиц, называемых фотонами.

Фотоны распространяются в вакууме со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Масса и энергия покоя фотона равны нулю.

Энергия фотона E связана с частотой электромагнитного излучения ν и длиной волны λ формулой:

$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Эта формула **связывает** *корпускулярную* характеристику электромагнитного излучения – *энергию фотона* с *волновыми* характеристиками – *частотой и длиной волны*.

Она представляет собой **МОСТИК** между корпускулярной и волновой теориями. Существование этого мостика неизбежно, т. к и фотон, и электромагнитная волна, это две модели *одного и того же реально существующего объекта* – электромагнитного излучения.

Всякая движущаяся частица (*корпускула*) обладает импульсом, причём согласно теории относительности энергия частицы E и ее импульс p связаны формулой:

$$E = \sqrt{E_0^2 + (cp)^2}$$

$$E = cp$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

Свет — диалектическое единство противоположных свойств: он одновременно обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн и дискретных фотонов.

При уменьшении длины волны все явственнее проявляются корпускулярные свойства.

Волновые свойства коротковолнового излучения проявляются слабо (например, рентгеновское излучение).

Наоборот, у длинноволнового (инфракрасного) излучения квантовые свойства проявляются слабо.

Взаимодействие фотонов с веществом (например, при прохождении света через дифракционную решетку) приводит к *перераспределению* фотонов в пространстве и возникновению дифракционной картины на экране.

Очевидно, что освещенность экрана в различных точках экрана прямо пропорционально вероятности попадания фотонов в различные точки экрана.

Но с другой стороны, *из волновых представлений видно, что освещенность пропорциональна интенсивности света I , а та в свою очередь, пропорциональна квадрату амплитуды A^2 .*

Вывод: квадрат амплитуды световой волны, в какой либо точке есть мера вероятности попадания фотонов в эту точку.



ЛЕКЦІЯ ЗАКОНЧЕНА!