

Квантовая оптика

продолжение

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Фотоны. Энергия, масса и импульс фотона.
2. Фотоэффект. Виды фотоэффекта.
3. Законы внешнего фотоэффекта.
4. Квантовая теория фотоэффекта. Уравнение А. Эйнштейна.
5. Объяснение законов внешнего фотоэффекта квантовой теорией (с помощью уравнения А. Эйнштейна).
6. Давление света.
7. Эффект Комптона.
8. Корпускулярно- волновой дуализм электромагнитного излучения

Ф О Т О Н Ы

Энергия фотона

Свет испускается, поглощается и распространяется дискретными порциями (квантами), названными фотонами.

Энергия фотона

$$E = h\nu$$

где h - постоянная Планка ($6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с)

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

$$E = \hbar \omega.$$

Масса фотона

Масса движения фотона находится из закона взаимосвязи массы и энергии

$$m = \frac{h\nu}{c^2}$$

Фотон – элементарная частица, которая всегда движется со скоростью света c и имеет массу покоя, равную нулю.

Импульс фотона

Импульс фотона определяется по формуле

$$p = \frac{E_0}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

ФОТОЭФФЕКТ

Фотоэффект

Фотоэлектрическим эффектом (фотоэффектом) называется явление взаимодействия света с веществом, в результате которого энергия фотонов передается электронам вещества. Различают *внешний, внутренний и внешний фотоэффект.*

**ФОТО
ЭФФЕК
Т**

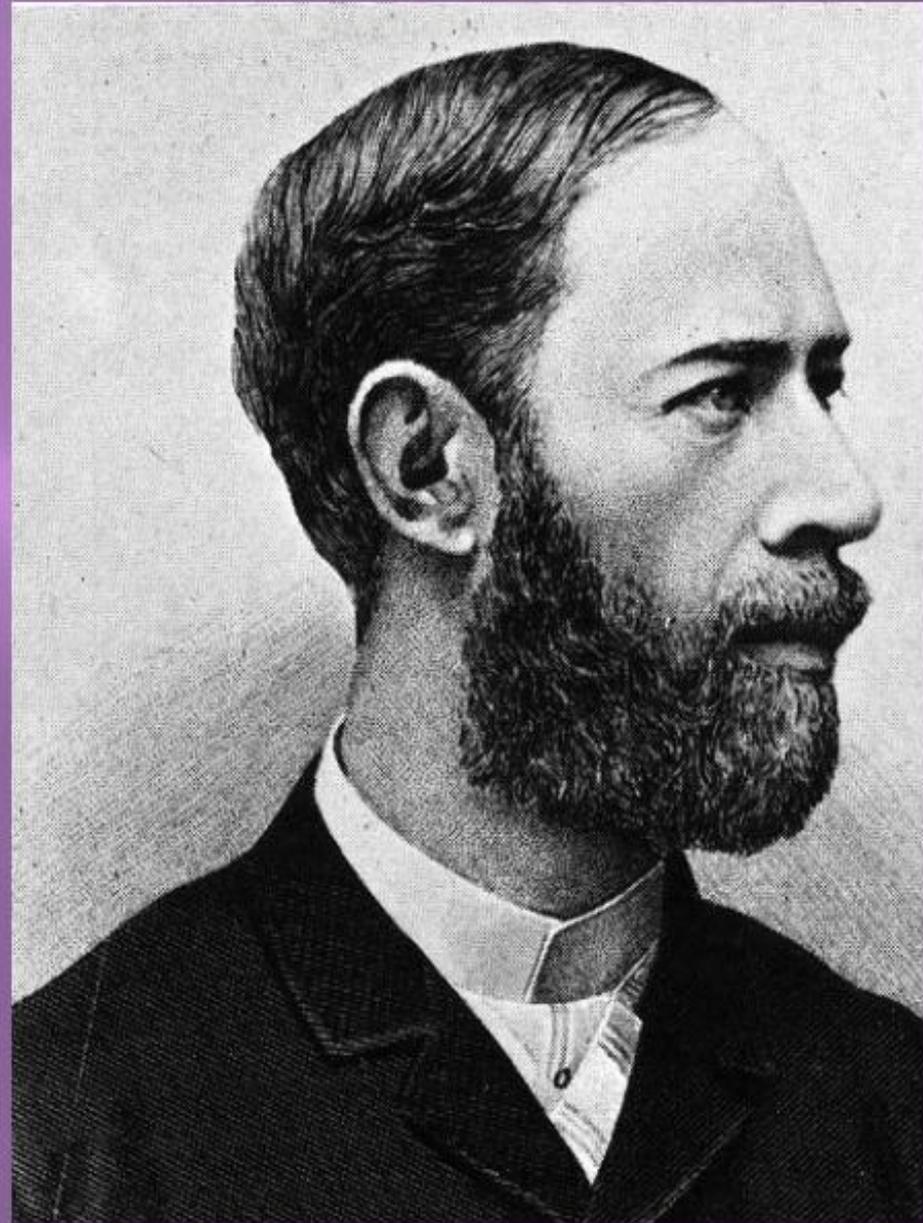
**ВНЕШНИ
Й**

**ВНУТРЕ
Н.**

**ВЕНТИЛ
Ь-
НЫЙ**

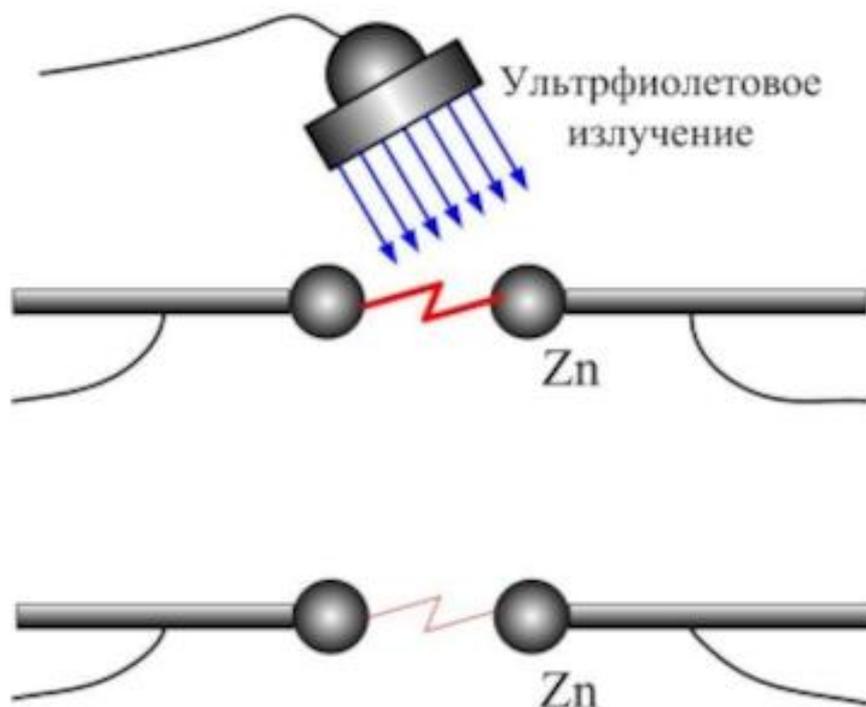
Генрих Герц (1857-1894)

Электромагнитные
волны были
впервые
экспериментально
получены Герцем в
1887г.



Открытие фотоэффекта Герцем

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



Генрих Рудольф Герц
(1857 - 1894)

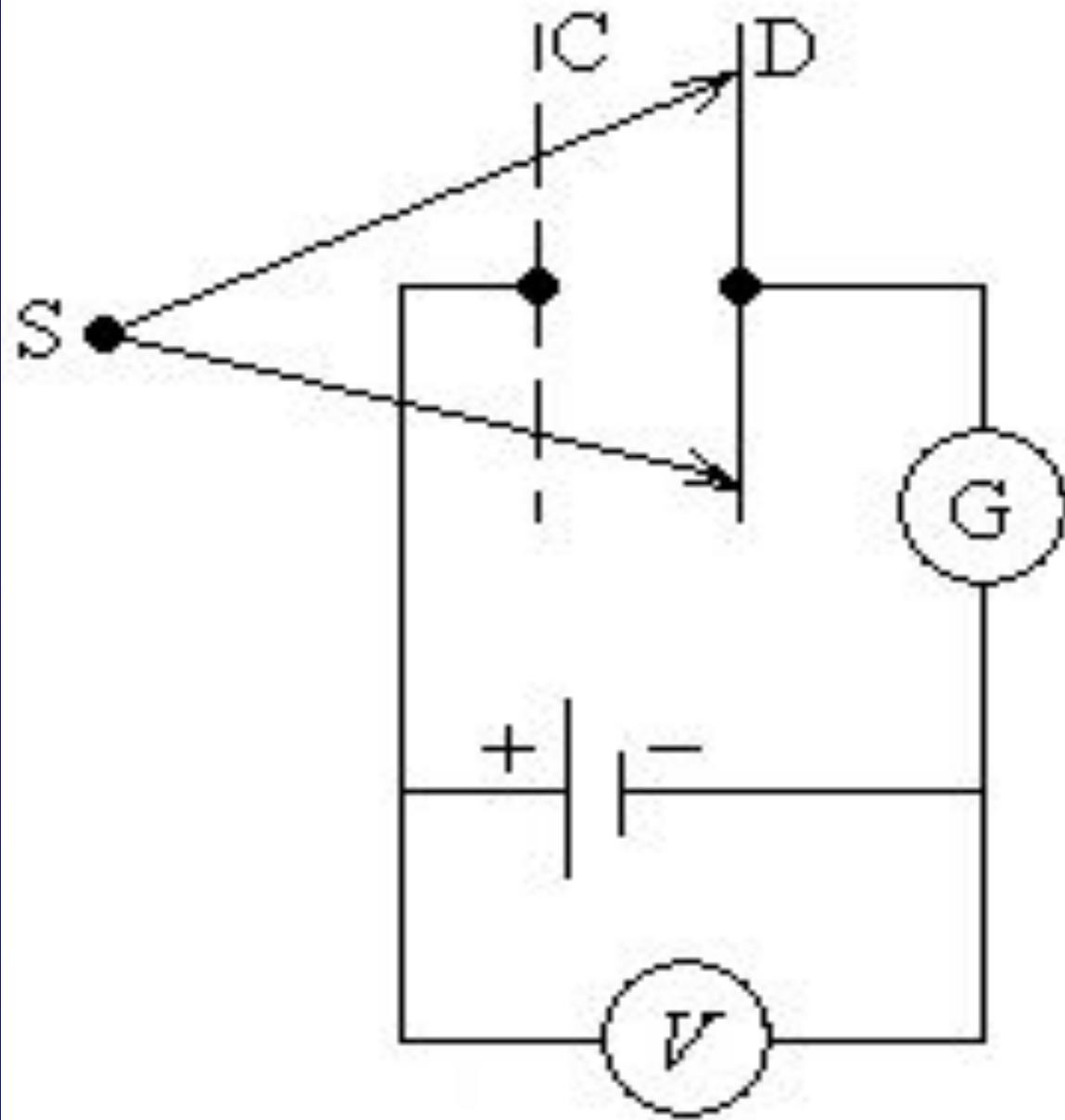
Из-за несовершенства экспериментальной техники Герцу не удалось подробно исследовать это явление. Некоторые выводы Герца оказались ошибочными.

Исследования продолжили Гальвакс, Видеман и Эберт.

ФОТОЭФФЕКТ

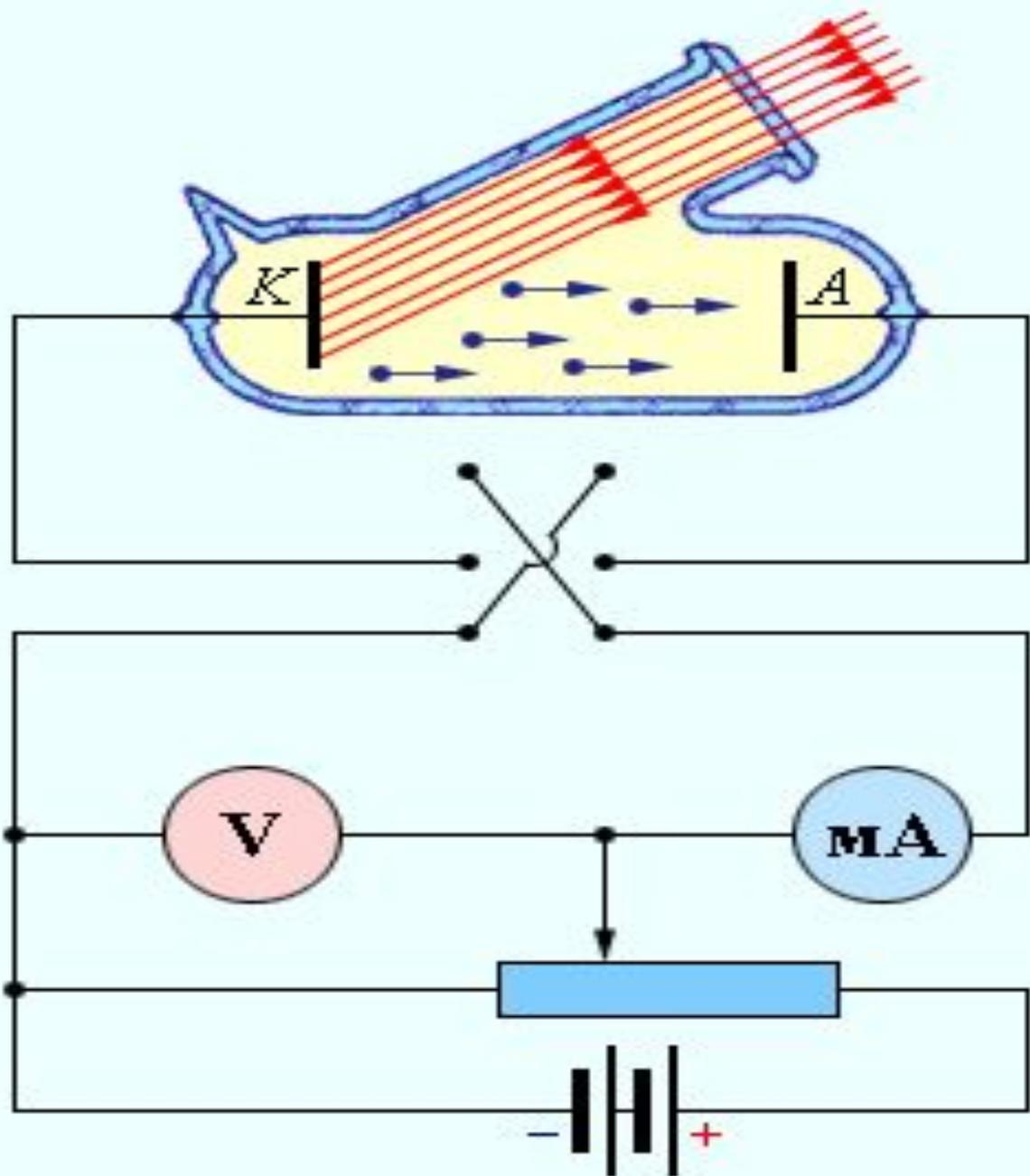


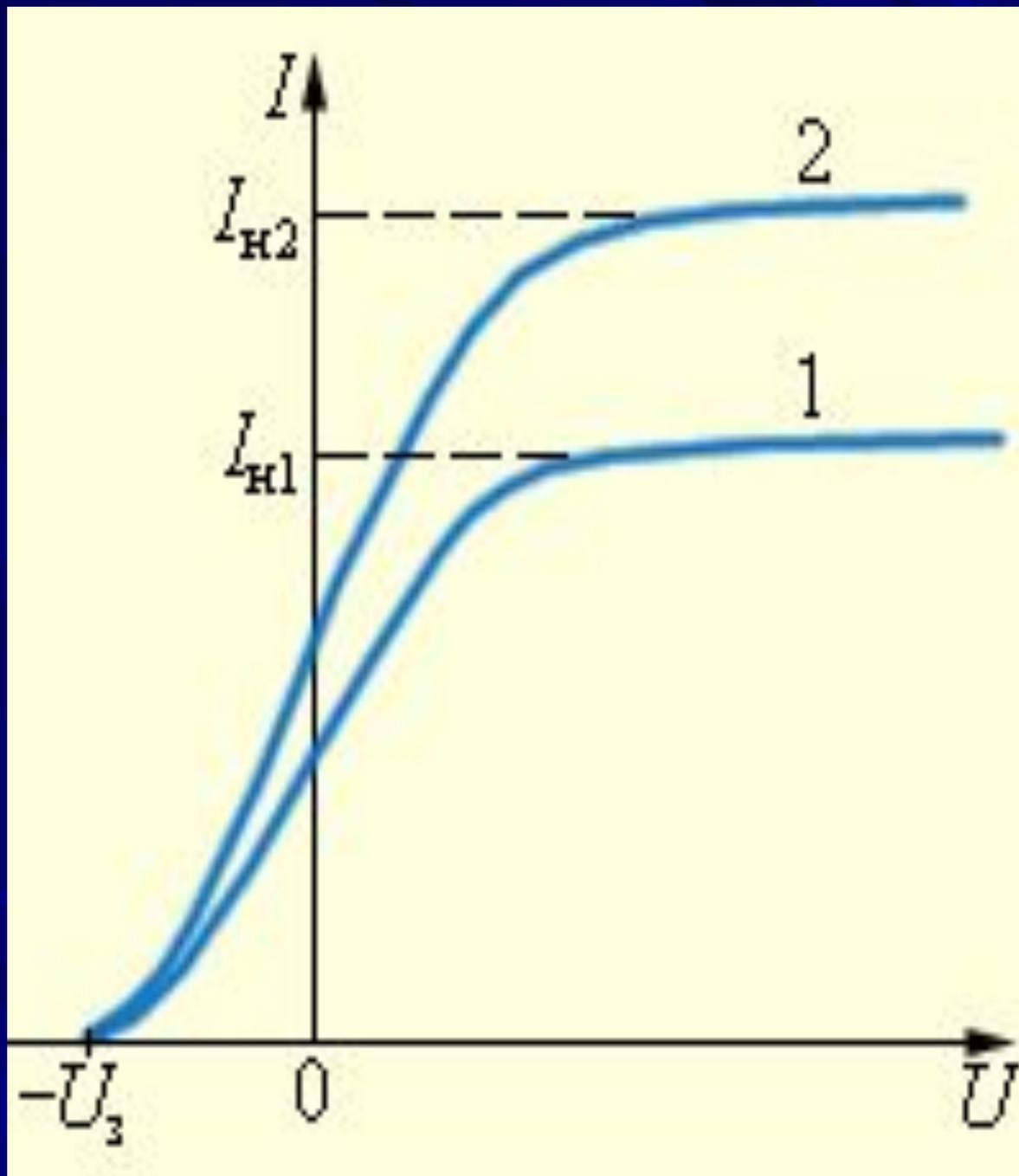
Русский физик
Александр
Григорьевич
Столетов,
открывший
фотоэффект...



Закономерности, установленные А. Г. Столетовым

1. Наибольшее действие оказывают **УФ** лучи.
2. Сила тока возрастает с увеличением освещённости пластины (т.е. его интенсивности)
3. Испускаемые под действием света заряды имеют **отрицательный знак**



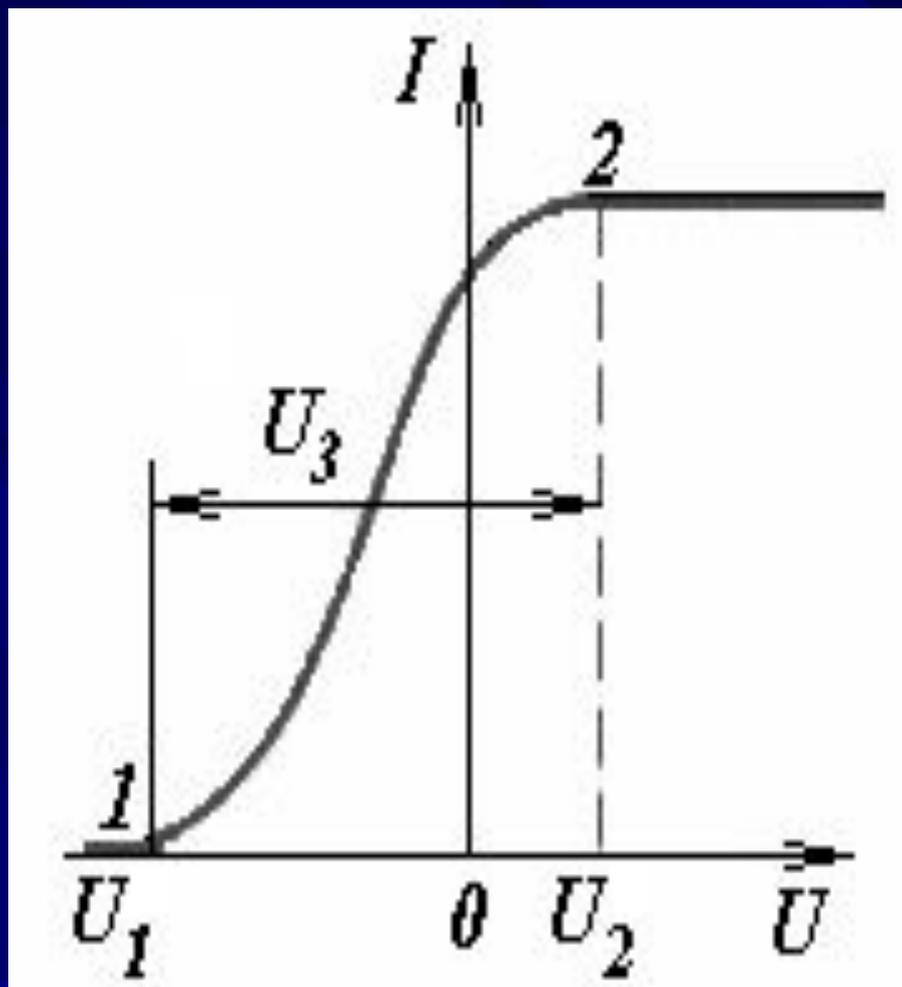


$$\vec{j}_H = en\vec{v}$$

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3.$$

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2eU_3}{m}}.$$

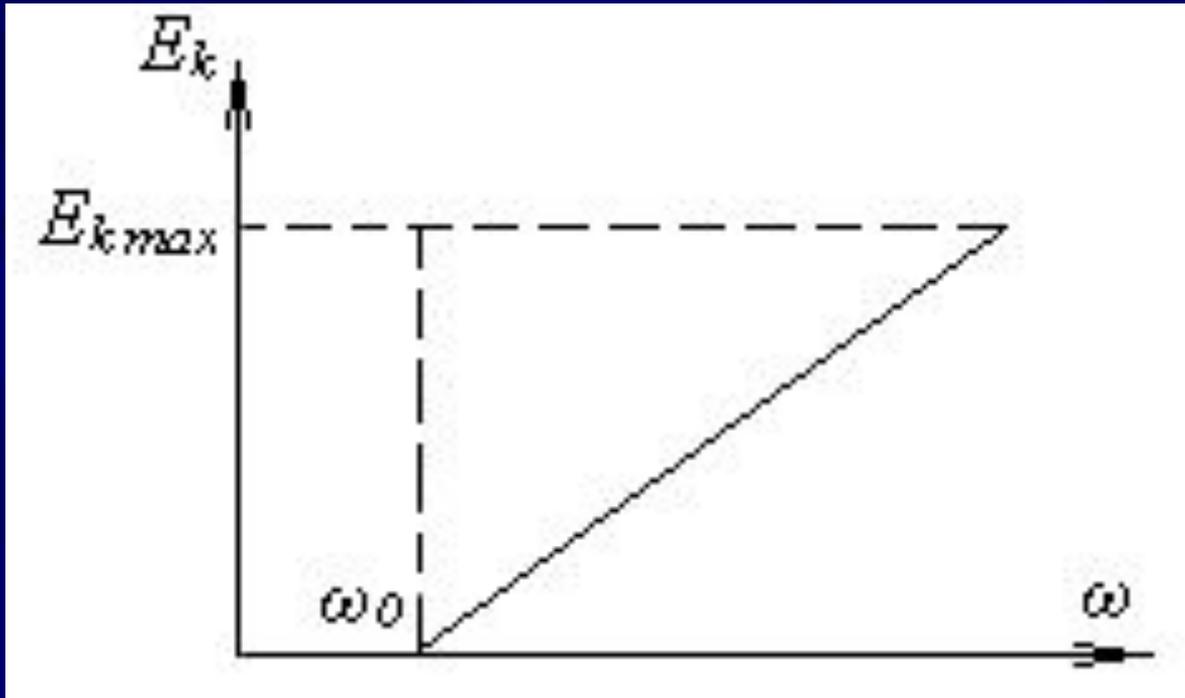
U_3



$$U_3 = U_2 + |U_1| = U_2 - U_1$$

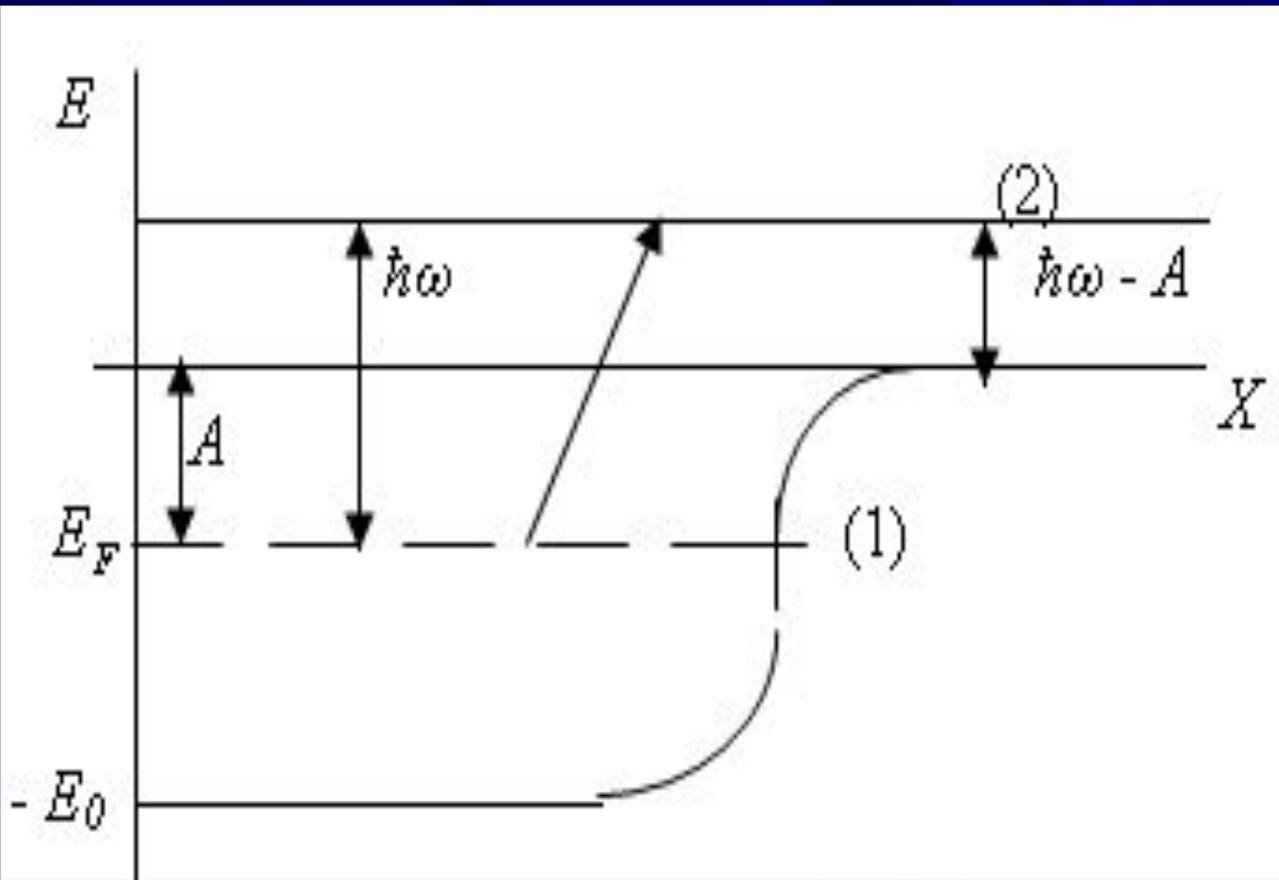
$$E_{\text{кмакс}} = eU_3 = e(U_2 - U_1)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos \omega \cdot t$$



$$A = \frac{e|\vec{E}_0|}{m\omega^2},$$

$$\frac{m\nu_{\max}^2}{2} = \hbar\omega - A,$$



$$\frac{m v_{\max}^2}{2} = \hbar\omega - A,$$

$$E = E_f + A \quad E_0 = E_f + A \quad A = E_0 - E_f$$

$$E_{\max} = \hbar\omega - A$$

Reviews of astro-ph are cool!

I like 'em!

А. Эйнштейн

Квантовая теория фотоэффекта

- Если на поверхность металла падает квант света и его энергия больше энергии связи электрона с атомом, то, поглотив данную энергию, электрон вылетает из металла. Произойдет фотоэффект.

Первый закон внешнего фотоэффекта

- При фиксированной частоте падающего света **число фотоэлектронов**, вырываемых из катода в единицу времени, **пропорционально интенсивности света** (сила фототока насыщения пропорциональна энергетической освещенности **E** катода).

Объяснение первого закона внешнего фотоэффекта квантовой теорией

Чем больше освещенность (интенсивность света), тем больше квантов, а каждый квант поглощается одним электроном, значит, будет больше вылетевших электронов.

Второй закон внешнего фотоэффекта

- Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой, а именно линейно возрастает с увеличением частоты.

Объяснение второго закона внешнего фотоэффекта квантовой теорией

Из уравнения Эйнштейна видно, что максимальная кинетическая энергия (максимальная начальная скорость) вылетевших электронов зависит от частоты падающего света (пропорционально ν).

$$h\nu = A_{\text{выхода}} + \frac{m v_{\text{max}}^2}{2}$$

Третий закон внешнего фотоэффекта

Для каждого вещества существует «красная граница» фотоэффекта, т.е. минимальная частота ν_0 света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), при которой свет любой интенсивности фотоэффекта не вызывает.

Объяснение третьего закона внешнего фотоэффекта квантовой теорией

- Из уравнения видно, что фотоэффект произойдет при условии если ,

$$h\nu_0 = A_{\text{выхода}}$$

- то есть энергии кванта должно хватить на то, чтобы вырвался электрон.
- **Красная граница** фотоэффекта **зависит** от $A_{\text{выхода}}$ то есть от химической природы металла и состояния его поверхности (для каждого металла $A_{\text{выхода}}$ своя).

Четвёртый закон внешнего фотоэффекта

Фотоэффект практически **безынерционен**: он немедленно возникает при освещении поверхности металла, но при условии, если

$$\nu \geq \nu_0$$

Объяснение четвёртого закона внешнего фотоэффекта квантовой теорией

- Согласно квантовой теории энергия излучения

$$E = h\nu$$

сосредоточена в отдельных порциях — квантах, что повышает ее ценность.

Поэтому электрон захватывает всю энергию кванта и способен вырваться с поверхности металла.

Масса и Импульс
ФОТОНА

Корпускулярно- волновой дуализм электромагнитного излучения

Свет одновременно обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн (интерференция, дифракция, поляризация) и свойствами дискретных фотонов (теплого излучение, фотоэффект, эффект Комптона).

В этом заключается корпускулярно-волновой дуализм (двойственность) электромагнитного излучения.

ТАБЛИЦА 1. АНАЛОГИЯ ФОРМУЛ КОРПУСКУЛЯРНЫХ И ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИИ

КОРПУСКУЛЯРНЫЕ СВОЙСТВА		ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА	
СКОРОСТЬ	v	ДЛИНА ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ	$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$
ИМПУЛЬС	$p = mv$	ЧАСТОТА ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ	$\nu = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h}$
ЭНЕРГИЯ	$E = mc^2$	ГРУППОВАЯ СКОРОСТЬ ВОЛН ДЕ БРОЙЛЯ	$u = v$
		ФАЗОВАЯ СКОРОСТЬ ВОЛН ДЕ БРОЙЛЯ	$v_{\text{фаз.}} = \frac{c^2}{v}$

Давление света

Петр Николаевич ЛЕБЕДЕВ (1866—1912)



- Основатель выдающейся школы физиков Московского университета.
- Первым измерил давление света на твердые тела, экспериментально доказав наличие импульса у электромагнитного излучения (1897—1901).
- Впервые измерил световое давление на газы.

Давление света

Световое давление определяется по формуле

$$P = \frac{E_0}{c} (1 + \rho)$$

где ρ – коэффициент отражения света;

E_0 – энергия, падающая на единицу поверхности за единицу времени

$$E_0 = N h \nu,$$

где N – число фотонов, падающих на единицу поверхности за одну секунду.

Эффект Комптона

Эффект Комптона (Комптон-эффект) — явление изменения длины волны электромагнитного излучения вследствие рассеивания его электронами.

Обнаружен американским физиком Артуром Комптоном в 1923 году для рентгеновского излучения. В 1927 Комптон получил за это открытие Нобелевскую премию по физике.

Артур Комптон



Артур Комптон
(Compton)
(американский
физик)
Нобелевский
лауреат по
физике

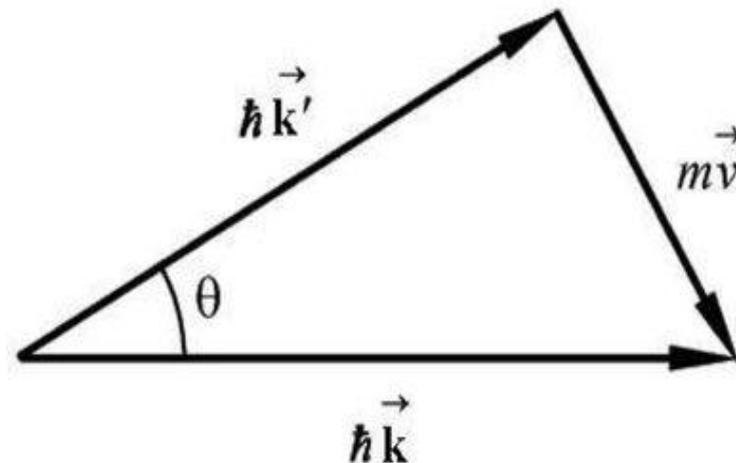
Эффект Комптона

Эффект Комптона объясняется рассеянием квантов света на свободных электронах вещества



Закон сохранения энергии

$$\hbar \frac{2\pi c}{\lambda} + m_e c^2 = \hbar \frac{2\pi c}{\lambda'} + E_e$$



Закон сохранения импульса

$$\hbar \vec{k} = \hbar \vec{k}' + m \vec{v} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} \cdot (1 - \cos \theta)$$

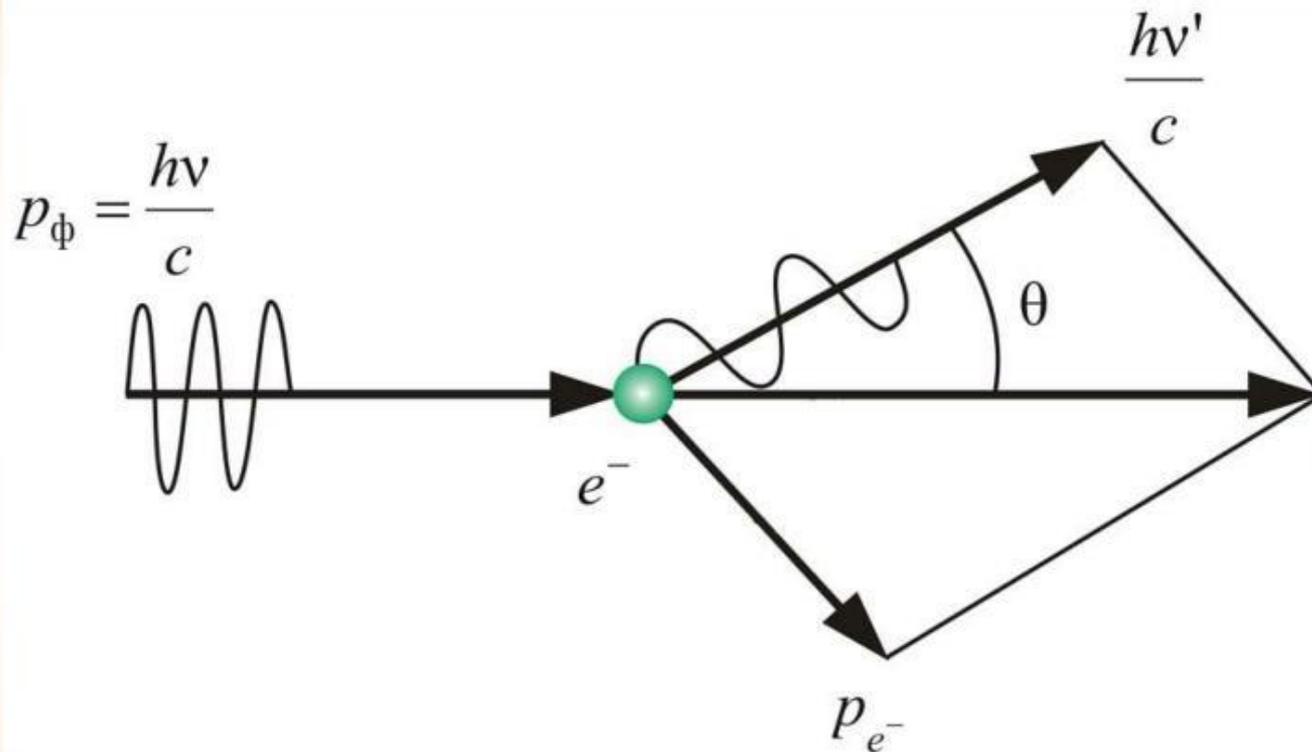
$$\lambda_K = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м} = 2,43 \text{ нм}$$

Эффект Комптона

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_K (1 - \cos\theta)$$

$$\lambda_K = \frac{h}{m_0 c} = 2.426 \times 10^{-12} \text{ м}$$

Диаграмма импульсов при упругом рассеянии фотона на покоящемся электроне.

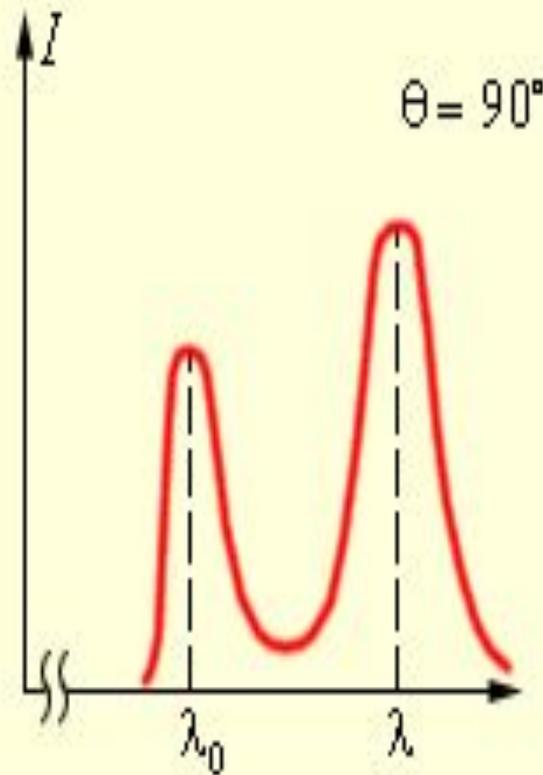
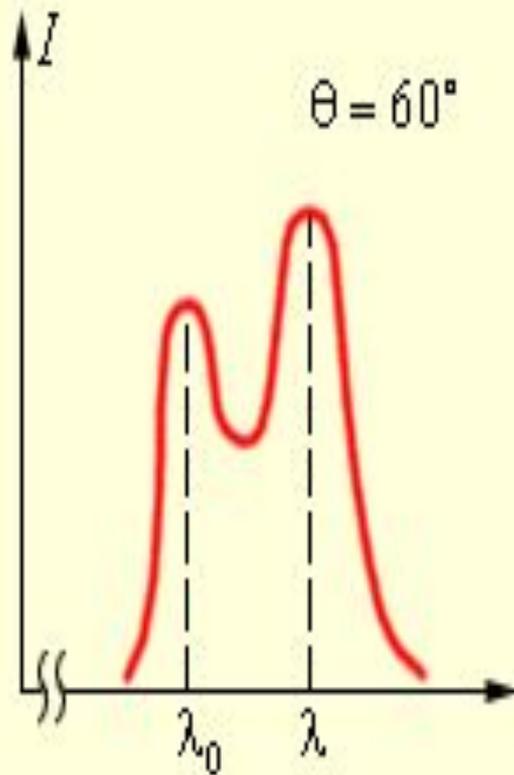
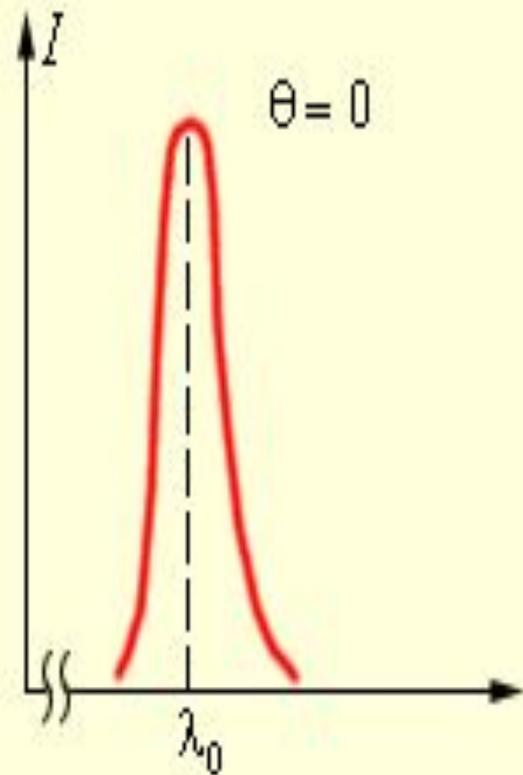


При рассеянии на покоящемся электроне фотон отдает ему часть энергии.

- p_{ϕ} – импульс фотона до столкновения;
- $p_{e^{-}}$ – импульс электрона;
- p_{ϕ}' – импульс фотона после столкновения;
- θ – угол рассеяния.

Эффект Комптона

Кривые распределения интенсивности в спектре излучения, рассеянного под некоторыми углами.



Примеры задач

Пример 2.1 Определить длину волны λ и импульс p излучения, кванты которого имеют ту же энергию, что и электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов $U=100\text{ В}$.

Решение: 1) При прохождении частицы с зарядом q ускоряющей разности потенциалов U электрическое поле совершает работу $A=qU$. Работа поля равна изменению кинетической энергии частицы. В нашем случае $q=e$, начальная скорость частицы принимается равной нулю, следовательно

$$eU = \frac{mv^2}{2}. \quad (1)$$

По условию задачи:
$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{mv^2}{2}. \quad (2)$$

Подставим (2) в (1):
$$eU = \frac{hc}{\lambda}, \quad \text{откуда } \lambda = \frac{hc}{eU}. \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^2} = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

2) Импульс фотона $p=h/\lambda$.
$$p = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{1,25 \cdot 10^{-6}} = 5,3 \cdot 10^{-28} \text{ кг} \cdot \text{м/с.}$$

Примечание: Скорость ускоренного электрона много меньше скорости света, поэтому при решении применяются законы классической механики.

Пример 2.2 Сколько фотонов с длиной волны $\lambda=0.66$ мкм ($\lambda=0.66 \cdot 10^{-6}$ м) содержит световой импульс длительностью $t=1$ мкс ($t=10^{-6}$ с) и мощностью $P=2$ мВт ($P=2 \cdot 10^{-3}$ Вт)?

Решение: Выразим энергию импульса через мощность и время $W=Pt$. (1)

Согласно квантовым представлениям о природе электромагнитного излучения световой импульс можно представить как совокупность частиц – фотонов, энергия импульса равна произведению энергии

фотона ε на число фотонов N : $W=N\varepsilon=Nh\frac{c}{\lambda}$. (2)

Приравнивая (1) и (2) $Pt=Nh\frac{c}{\lambda}$, откуда $N=\frac{Pt\lambda}{hc}$. (3)

Число фотонов $N=\frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot 0.66 \cdot 10^{-6}}{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 66 \cdot 10^6$.

Пример 2.3 Натрий освещается монохроматическим светом с длиной волны $\lambda=400$ нм ($0.4 \cdot 10^{-6}$ м). Красная граница фотоэффекта для натрия $\lambda_0=594$ нм ($0.594 \cdot 10^{-6}$ м) Определить: 1) Работу выхода электрона $A_{ВЫХ}$; 2) наименьшее задерживающее напряжение U_3 , при котором фототок прекратится; 3) максимальную скорость фотоэлектронов.

Решение: 1) Работа выхода $A_{ВЫХ}$ численно равна минимальной энергии фотона, при которой еще возможен фотоэффект:

$$A_{ВЫХ} = hv_0 = hc/\lambda_0, \quad A_{ВЫХ} = 6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 / 0.594 \cdot 10^{-6} = 3.3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

В квантовой механике часто применяется внесистемная единица измерения энергии - электрон – вольт (эВ). 1 эВ численно равен энергии, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов 1 В. В этом случае работа поля равна $A=qU=eU$ ($e=1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона), т.е. $1\text{эВ}=1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 1=1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Таким образом, вычисленная ранее работа выхода $A_{ВЫХ} = \frac{3.3 \cdot 10^{-19}}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 2.1 \text{ эВ}$

2) Из уравнения Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$eU_3 = hv - A_{ВЫХ} = h \frac{c}{\lambda} - h \frac{c}{\lambda_0}, \text{ откуда } U_3 = \frac{hc}{e} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right).$$

$$U_3 = \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1.6 \cdot 10^{-19}} \left(\frac{1}{0.4 \cdot 10^{-6}} - \frac{1}{0.594 \cdot 10^{-6}} \right) = 1 \text{ В}$$

3) Из уравнения Эйнштейна $h \frac{c}{\lambda} = h \frac{c}{\lambda_0} + mv_{\max}^2 / 2$ максимальная скорость

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2hc}{m} \left[\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right]}, \quad v_{\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{9.1 \cdot 10^{-31}} \left(\frac{1}{0.4 \cdot 10^{-6}} - \frac{1}{0.594 \cdot 10^{-6}} \right)} = 6 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$

Пример 2.4. При увеличении частоты излучения, вызывающего фотоэффект в 1.5 раза $\nu_2 = 1.5\nu_1$, задерживающая разность потенциалов увеличилась в два раза $U_2 = 2U_1$. Найдите конечную частоту ν_2 , если красная граница фотоэффекта $\nu_0 = 10^{15}$ Гц.

Решение: Уравнения Эйнштейна частот фотонов ν_1 и ν_2 :

$$h\nu_1 = h\nu_0 + eU_1, \quad (1)$$

$$h\nu_2 = h\nu_0 + eU_2. \quad (2)$$

Умножим левую и правую часть (1) на два и вычитая из (1) (2), имеем

$$h(2\nu_1 - \nu_2) = h\nu_0. \quad (3)$$

Подставляя в (3) данные задачи $\nu_2 = 1.5\nu_1$, получим $0.5\nu_2 = \nu_0$, $\nu_2 = 2 \cdot 10^{15}$ Гц.

Пример 2.5. Определить энергию электрона отдачи при эффекте Комптона, если фотон с длиной волны $\lambda=100$ нм (10^{-10} м) был рассеян на угол $\theta=180^\circ$.

Решение: Длина волны рассеянного рентгеновского λ' фотона согласно (6.15)

$\lambda'=\Delta\lambda+\lambda=\lambda_k(1-\cos\theta)+\lambda$, производя расчеты $\lambda'=2.43\cdot 10^{-12}(1-(-1))+10^{-10}=1.05\cdot 10^{-10}$ м

Энергия E' электрона отдачи равна разности энергий падающего и рассеянного фотонов (6.14')

$$E'=h\nu-h\nu'=\frac{hc}{\lambda}-\frac{hc}{\lambda'}=hc\left(\frac{1}{\lambda}-\frac{1}{\lambda'}\right), \text{ подставляя}$$

полученное выше значение λ' , имеем

$$E'=6.63\cdot 10^{-34}\cdot 3\cdot 10^8\left(\frac{1}{10^{-10}}-\frac{1}{1.05\cdot 10^{-10}}\right)=0.947\cdot 10^{-16} \text{ Дж или } E'=0.58 \text{ кэВ}$$