

Конспект лекций по курсу общей физики. Часть III
“Оптика. Квантовые представления о свете.
Атомная физика и физика ядра”
Лекция № 8

6. ФОТОЭФФЕКТ

6.1 Фотоэлектрический эффект

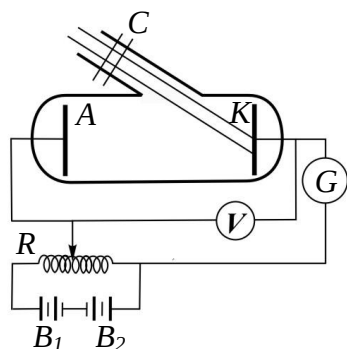


Рис.1

Рассмотрим некоторые эксперименты, имеющие фундаментальное значение для понимания современной физики. Для начала – один из наиболее важных.

Явление, называемое фотоэлектрическим эффектом, было обнаружено в конце XIX столетия. Заключается оно в том, что **тела, подвергнутые облучению светом, испускают отрицательные электрические заряды.**

Для изучения фотоэффекта используется вакуумная трубка (рис.1). Катод K из исследуемого металла освещается монохроматическим светом достаточно малой длины волны. Световые лучи входят через окошко C из кварцевого стекла. Кварцевое стекло обладает свойством пропускать видимые и ультрафиолетовые лучи. Гальванометр G измерит ток в цепи, т.к. электроны достигнут анода A и замкнут цепь.

Две батареи B_1 и B_2 включены «навстречу» друг другу и позволят с помощью потенциометра R изменять как величину, так и знак напряжения между электродами.

Опыты показали, что фототок зависит от химической природы металла и состояния его поверхности, малейшее загрязнение изменяет величину фототока. Гарантеей частоты опытов является достаточно высокая степень вакуума.

При анализе эксперимента оказалось, что квантовая физика дает удовлетворительное согласие теории и практики, а классическая теория совершенно несовместима с ней.

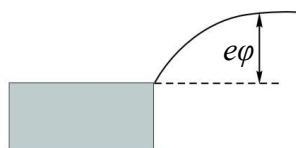


Рис.2

Прежде чем убедиться в этом, введем понятие **работы выхода**, общее для обеих теорий. Очевидно, что существует энергии связи электрона с твердым телом. Для того, чтобы удалить электрон из твердого тела, ему необходимо сообщить энергию $e\phi$ (рис.2). При фотоэффекте добавочным источником энергии является падающий свет.

Внутри твердого тела имеются электроны с различными энергиями. Обозначим их энергию связи с твердым телом через $e\phi$ (в электронвольтах, эВ), ϕ – работа выхода, измеряемая в вольтах. Принято считать, что **$e\phi$ есть минимальная энергия, которую необходимо сообщить электрону для того, чтобы удалить его из твердого тела.** Это и есть **работа выхода**

$$A = e \cdot \phi$$

Опыты по изучению фотоэффекта состоят в измерении числа испускаемых электронов и их энергии как функции интенсивности и частоты падающего монохроматического света. Интенсивность света определяется числом фотонов, частота – задает энергию фотонов.

Качественное объяснение фотоэффекта с волновой точки зрения на первый взгляд довольно простое. Электроны в металле должны ускоряться электрическим полем электромагнитной волны. Чем больше интенсивность падающего света, тем большей кинетической энергией должны обладать испускаемые электроны, так как большее количество энергии остается у них после преодоления поверхности энергетического барьера. Учитывая, что интенсивность энергии электромагнитной волны ($I = \bar{E}\bar{H}$) равна среднему значению произведения модулей векторов поля, не должно существовать простой зависимости кинетической энергии испускаемых электронов от частоты падающего света. Однако результат опыта прямо противоположен предсказанию классической теории.

Поскольку окончательным судьей в науке является опыт, мы должны отдать предпочтение квантовой теории, которая находится в согласии со всеми экспериментальными законами фотоэффекта.

6.2. Законы внешнего фотоэффекта

Основные свойства фотоэффекта могут быть выяснены с помощью вольт – амперных характеристик – кривых, выражающих зависимость фотоэлектрического тока от разности потенциалов V (между K и A).

Опытным путем установлены три закона внешнего фотоэффекта.

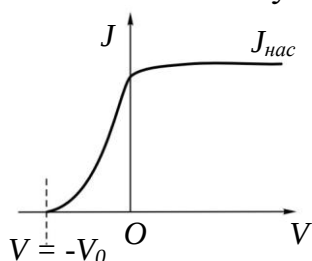


Рис.3

I. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности.

Испускаемые электроны можно подвергнуть действию либо ускоряющего ($V > 0$), либо задерживающего ($V < 0$) поля (рис.3). При $V > 0$ с некоторого значения напряжения ток не зависит от него, это означает, что все испущенные электроны достигают анода. Величина тока насыщения

$$J_{нас} = en,$$

n – число фотоэлектронов, испускаемых светом.

В случае задерживающих полей фототок существует за счет большой начальной кинетической энергии фотоэлектронов. Движение к аноду уменьшает их энергию. Максимальная начальная скорость v_{max} фотоэлектронов связана с тормозящим напряжением V_0 соотношением

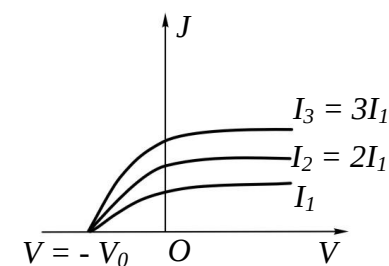


Рис.4

$$\frac{mv_{max}^2}{2} = eV_0$$

Если изменять интенсивность света, поддерживая

частоту света постоянной (рис.4), фототок будет строго пропорционален интенсивности света. Особенностью результата является постоянство V_0 . Это означает только одно – энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности света.

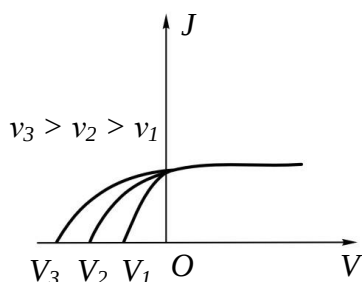


Рис.5

В следующем эксперименте поддерживаем интенсивность света I постоянной, одновременно изменяя частоту света ν . Из рисунка 5 видно, что максимальная энергия фотоэлектронов eV_0 изменяется с изменением ν . Кроме того, V_0 является линейной функцией от ν .

Максимальную кинетическую энергию, которую сможет приобрести фотоэлектрон, можно найти по закону сохранения энергии:

$$\frac{m\nu_{\max}^2}{2} = h\nu - A. \quad (1)$$

Это уравнение впервые было предложено Эйнштейном и называется уравнением Эйнштейна.

II. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. минимальная частота ν_0 света, при которой еще возможен внешний фотоэффект. Величина ν_0 зависит от химической природы вещества и от состояния его поверхности.

Зависимость скорости фотоэлектронов от частоты падающего света наиболее отчетливо вскрывает природу фотоэффекта. Кинетическая энергия линейно зависит от частоты света (рис.6). При некоторой частоте ν_0 скорость фотоэлектронов оказывается равной нулю. Эта частота разграничивает излучение на две области: область излучения ($\nu > \nu_0$), способного возбудить фотоэффект, и область излучения ($\nu < \nu_0$) не создающего фотоэффекта.

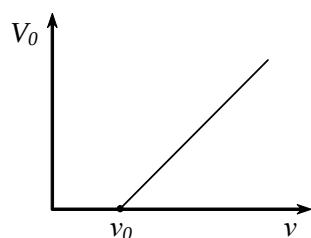


Рис.6

Уравнение Эйнштейна позволяет определить наименьшую частоту ν_0 , или красную границу фотоэффекта. Энергия кванта расходуется только на работу выхода:

$$\nu_0 = \frac{A}{h}. \quad (2)$$

Термин «красная граница» подчеркивает, что фотоэффект ограничен со стороны длинноволновой части спектра. Наличие красной границы совершенно не совместимо с представлением о свете как об электромагнитных волнах.

III. Число фотоэлектронов n , вырываемых с катода за единицу времени (фототок насыщения) пропорционально интенсивности света.

$$I = en. \quad (3)$$

Квантовый характер взаимодействия света с веществом проявляется в безинерционности фотоэффекта. С волновой точки зрения электромагнитная волна за определенное конечное время передает свою энергию электрону.

6.3. Фотоны. Масса, энергия, импульс фотона

Фотонная теория света утверждает следующее:

1) Свет состоит из «порций» электромагнитных волн, называемых фотонами.

2) Во время испускания или поглощения света фотоны рождаются или поглощаются как нечто неделимое. Такие процессы аналогичны процессу столкновения фотона и электрона атома, испускающего или поглощающего свет. Точно так же и рассеяние света представляет собой процесс столкновения между фотоном и рассеивателем (например, электроном).

3) Каждый фотон обладает энергией $h\nu$, где ν – частота света, равная c/λ , а h – универсальная постоянная, называемая *постоянной Планка*.

4) Наличие у фотона массы m вытекает из взаимосвязи между энергией и массой в теории относительности $\varepsilon = mc^2$, для фотона $\varepsilon = h\nu$, следовательно

$$m = \frac{h\nu}{c^2} \quad (4)$$

Масса фотона существенно отличается от массы макроскопических тел и масс других элементарных частиц. Это отличие состоит в том, что фотон не имеет массы покоя m_0 . Действительно для фотона $v = c$, и если считать, что $m_0 \neq 0$, то релятивистская формула зависимости массы от скорости

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

дает бессмысленный результат $m = \frac{m_0}{0} = \infty$ и $\varepsilon = \infty$, в то время, как $\varepsilon = h\nu$.

Таким образом, для фотона $m_0 = 0$, т. е. покоящихся фотонов не существует. Если распространяющийся световой луч остановить, то свет прекратит свое существование. Это означает, что фотоны будут поглощены атомами и молекулами вещества.

5) Помимо энергии и массы фотон обладает импульсом p . Из теории относительности связь энергии и импульса определена

$$\varepsilon = c\sqrt{p^2 - m_0^2 c^2}.$$

Для фотона $m_0 = 0$ и

$$p = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} = mc. \quad (5)$$

6) Для фотона всегда должно выполняться условие $v = c$, таким образом **в любой среде** фотоны движутся со скоростью c . На первый взгляд это противоречит известному факту: фазовая скорость света в среде меньше, чем в вакууме в n (показатель преломления) раз, $V_\phi = \frac{c}{n}$. В действительности,

никакого противоречия нет. Процесс распространения света в веществе состоит в поглощении фотона атомом, а затем «переизлучении» фотона атомом. Переизлучение фотонов атомами происходит с запаздыванием по фазе по отношению к поглощению света частицами среды.

6.4. Эффект Комптона (1923г.)

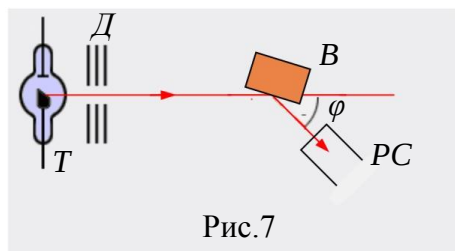


Рис.7

Квантовые свойства света проявляются в явлении, обнаруженном А.Комптоном. Эксперимент демонстрирует, во – первых, то, что фотон обладает импульсом, и, во – вторых, то, что взаимодействие между электромагнитным излучением и электронами может рассматриваться как столкновение между фотонами и электронами.

Схема опытов Комптона изображена на рисунке 7. Монохроматические рентгеновские лучи, возникающие в рентгеновской трубке T , проходят через диафрагму D и узким пучком направляются на легкое рассеивающее вещество B . Это может быть графит, парафин и др. После рассеяния на угол φ попадают в приемник – рентгеновский спектрограф PC , где измеряется длина волны рассеянного излучения. Рентгеновская трубка смонтирована на вращающейся платформе, так что рентгеновские лучи могут падать на рассеивающее вещество под любым заданным углом. Исследуется одна из характеристических рентгеновских линий λ . Кристалл B медленно вращается, подбирается такое его положение, при котором на фотопленке экспонируется спектральная линия рассеянных рентгеновских лучей.

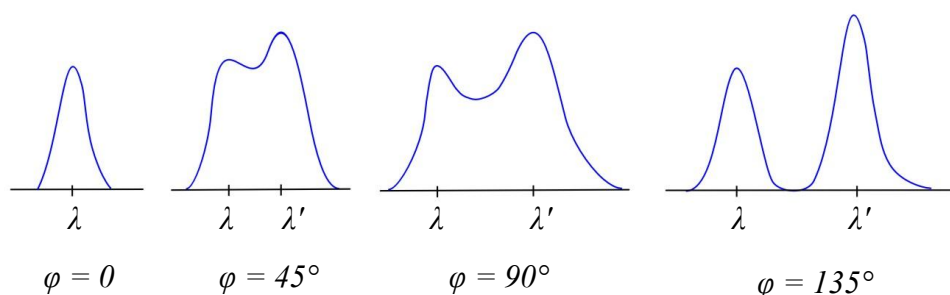


Рис.8. Спектры рассеянных рентгеновских лучей при различных углах рассеяния.

Новый и интересный результат – появление в спектре рассеянного рентгеновского излучения **добавочной линии λ'** , которая не испускалась рентгеновской трубкой. Рассеяние $\lambda' - \lambda$ зависит от угла φ , но не зависит от длины волны λ и от материала рассеивателя:

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \text{const} \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2} \quad (6)$$

Фотонная теория допускает, что рентгеновский фотон сталкивается со сравнительно слабо связанным электроном и передает ему некоторую часть своего импульса и энергии. При этом процессе энергия и импульс сохраняются. Энергия рассеянного фотона $h\nu'$ меньше энергии падающего фотона $h\nu$, в спектре появляется добавочная линия λ' .

Геометрия столкновения показана на рисунке 9. Квант света с импульсом

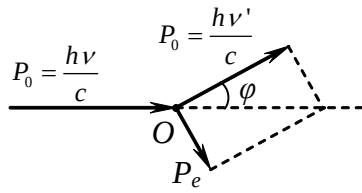


Рис.9

$P_0 = \frac{h\nu}{c}$ сталкивается с неподвижным электроном атома в точке O . Сам квант при этом летит в направлении, определенным углом φ , его импульс $P = \frac{h\nu'}{c}$. Электрон приобретет у кванта кинетическую энергию E и некоторое количество движения p_e .

Из закона сохранения энергии следует

$$h\nu = h\nu' + E$$

Из закона сохранения импульса следует

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} + \bar{p}_e,$$

или, в скалярной форме

$$\left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h\nu}{c}\frac{h\nu'}{c}\cos\varphi = p_e^2$$

Решая совместно систему уравнений (1) и (2) и учитывая релятивистский характер движения электрона, получим соотношение

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\frac{h}{m_0c}\sin^2\frac{\varphi}{2} = 2\lambda_{\kappa}\sin^2\frac{\varphi}{2}, \quad (7)$$

где величина $\frac{h}{m_0c} = \lambda_{\kappa}$ названа комптоновской длиной волны, $\lambda_{\kappa} = 2,43 \cdot 10^{-12}$ м.

Полученное теоретически уравнение и экспериментальное полностью совпали.

Присутствие в рассеянном излучении также и длины волны λ означает, что рентгеновские фотоны рассеиваются на сильно связанных электронах без потери энергии и импульса. Очевидно, здесь имеет место другой тип столкновений, при котором нельзя пренебречь связью электрона в атоме.

Все изложенное в предыдущих параграфах служит доказательством того, что свет **одновременно** обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн и свойствами дискретных фотонов. Он представляет собой единство этих противоположных свойств. Однако в проявлении этих свойств имеется определенная закономерность. С уменьшением длины волны (увеличением частоты) все более отчетливо проявляются квантовые свойства. Поэтому, в дальнейшем, предстоит ответить на вопрос о сочетании и взаимозависимости волновых и корпускулярных свойств света.