

> Тема: Фотоэффект и его значение для физики

> Фотоэлектрическим эффектом или фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием света. Это явление было открыто Г. Герцем в 1887 г. Он заметил, что проскакивание искры между шариками разрядника значительно облегчается, если один из шариков осветить ультрафиолетовыми лучами.

> В 1888—1889 гг. А. Г. Столетов подверг фотоэффект систематическому исследованию с помощью установки, схема которой показана на экране. Конденсатор, образованный проволоочной сеткой и сплошной пластиной, был включен последовательно с гальванометром G в цепь батареи. Свет, проходя через сетку, падал на сплошную пластину. В результате в цепи возникал ток, регистрировавшийся гальванометром.

> Ленард и другие исследователи усовершенствовали прибор Столетова. Схема экспериментальной установки для исследования фотоэффекта изображена на экране. В экспериментах использовался стеклянный вакуумный баллон с двумя металлическими электродами, поверхность которых была тщательно очищена. К электродам прикладывалось некоторое напряжение U , полярность которого можно было изменять с помощью двойного ключа. Один из электродов (катод K) через кварцевое окошко освещался монохроматическим светом некоторой длины волны λ , и при неизменном световом потоке снималась зависимость силы фототока I от приложенного напряжения. На рис. изображены типичные кривые такой зависимости, полученные при двух значениях интенсивности светового потока, падающего на катод. Кривая 2 соответствует большей интенсивности светового потока. (К рисунку: I_{n1} и I_{n2} – токи насыщения, U_z – запирающий потенциал.)

Кривые показывают, что при достаточно больших положительных напряжениях на аноде A фототок достигает насыщения, так как все электроны, вырванные светом из катода, достигают анода. Тщательные измерения показали, что ток насыщения I_n прямо пропорционален интенсивности падающего света. > Когда напряжение на аноде отрицательно, электрическое поле между катодом и анодом тормозит электроны. Анода могут достичь только те электроны, кинетическая энергия которых превышает $|eU|$ (абсолютную величину произведения удельного заряда электрона на напряжение в сети). Если напряжение на аноде меньше, чем $-U_z$ (запирающий потенциал/напряжение), фототок прекращается. Измеряя U_z (запирающее напряжение), можно определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов с помощью формулы на экране: (формула)

К удивлению ученых, величина U_z (закрывающего потенциала) оказалась не зависящей от интенсивности падающего светового потока. Тщательные измерения показали, что запирающий потенциал линейно возрастает с увеличением частоты ν света.

> Так, были установлены следующие **законы фотоэффекта**:

> 1. Исследуя зависимость силы тока в баллоне от напряжения между электродами при постоянном световом потоке на один из них, установили первый закон фотоэффекта.

Фототок насыщения пропорционален световому потоку, падающему на металл.

Т.к. сила тока определяется величиной заряда, а световой поток - энергией светового пучка, то можно сказать, что число электронов, выбиваемых за 1 с из вещества, пропорционально интенсивности света, падающего на это вещество.

> 2. Изменяя условия освещения на этой же установке, А. Г. Столетов открыл второй закон фотоэффекта: *кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а зависит от его частоты.*

Из опыта следовало, что если частоту света увеличить, то при неизменном световом потоке запирающее напряжение увеличивается, а, следовательно, увеличивается и кинетическая энергия фотоэлектронов. Таким образом, *кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света.*

> 3. Заменяя в приборе материал фотокатода, Столетов установил третий закон фотоэффекта: *для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т. е. существует наименьшая частота ν_{min} , при которой еще возможен фотоэффект.*

При $\nu < \nu_{min}$ (частоте света меньшей, чем минимальная частота) ни при какой интенсивности волны падающего на фотокатод света фотоэффект не

произойдет. Т.к. $\lambda = \frac{c}{\nu}$ (длина волны обратно пропорциональна частоте света), то *минимальной частоте света соответствует максимальная длина волны.*

Так на рубеже XIX и XX столетий в физике возникла тупиковая ситуация: электродинамика, предсказавшая существование электромагнитных волн и великолепно работающая в диапазоне радиоволн, отказалась объяснять явление фотоэффекта.

Ведь известно, что для вырывания электрона из вещества требуется сообщить ему некоторую энергию A , называемую работой выхода электрона. В случае свободного электрона в металле это работа по преодолению поля положительных ионов кристаллической решетки, удерживающего электрон на границе металла. В случае электрона, находящегося в атоме, работа выхода есть работа по разрыву связи электрона с ядром.

В переменном электрическом поле световой волны электрон начинает совершать колебания. А если энергия колебаний превысит работу выхода, то электрон будет вырван из вещества. Однако в рамках таких представлений невозможно понять второй и третий законы фотоэффекта.

> Выход из этого тупика был найден Альбертом Эйнштейном в 1905 году. Он нашел простое уравнение, описывающее фотоэффект. Все три закона фотоэффекта оказались следствиями уравнения Эйнштейна.

Главная заслуга Эйнштейна состояла в отказе от попыток истолковать фотоэффект с позиций классической электродинамики. Эйнштейн привлек к делу смелую гипотезу о квантах, высказанную Максом Планком пятью годами ранее.

> Гипотеза Планка говорила о дискретности излучения и поглощения электромагнитных волн, то есть о прерывистом характере взаимодействия света с веществом. При этом Планк считал, что распространение света — это непрерывный процесс, происходящий в полном соответствии с законами классической электродинамики.

> Эйнштейн пошел еще дальше: он предположил, что свет в принципе обладает прерывистой структурой: не только излучение и поглощение, но также и распространение света происходит отдельными порциями квантами, обладающими энергией $E = h \nu$.

Планк рассматривал свою гипотезу лишь как математический трюк и не решился опровергнуть электродинамику применительно к микромиру. Физической реальностью кванты стали благодаря Эйнштейну.

> Кванты электромагнитного излучения (в частности, кванты света) стали впоследствии называться фотонами. Таким образом, свет состоит из особых частиц фотонов, движущихся в вакууме со скоростью c . Каждый фотон монохроматического света, имеющего частоту ν , несет энергию $h\nu$.

Фотоны могут обмениваться энергией и импульсом с частицами вещества; в таком случае > мы говорим о столкновении фотона и частицы. В частности, происходит столкновение фотонов с электронами металла катода.

> Поглощение света — это поглощение фотонов, то есть неупругое столкновение фотонов с частицами (атомами, электронами). Поглощаясь при столкновении с электроном, фотон передает ему свою энергию. В результате электрон получает кинетическую энергию мгновенно, а не постепенно, и именно этим объясняется безынерционность фотоэффекта.

> Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта есть не что иное, как закон сохранения энергии. На что идет энергия фотона при его неупругом столкновении с электроном? Она расходуется на совершение работы выхода A по извлечению электрона из вещества и на придание электрону кинетической энергии.

Итак, Эйнштейн получил уравнение фотоэффекта:

$$h\nu = A + mv^2/2 \quad (4)$$

Слагаемое $mv^2/2$ оказывается максимальной кинетической энергией фотоэлектронов.

[Электрон в металле может быть свободным и связанным. Свободные электроны «гуляют» по всему металлу, связанные электроны «сидят» внутри своих атомов. Кроме того, электрон может находиться как вблизи поверхности металла, так и в его глубине.]

Ясно, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона получится в том случае, когда фотон попадет на свободный электрон в поверхностном слое металла тогда для выбивания электрона достаточно одной лишь работы выхода.

Во всех других случаях придется затрачивать дополнительную энергию на вырывание связанного электрона из атома или на «протаскивание» глубинного электрона к поверхности. Эти лишние затраты приведут к тому, что кинетическая энергия вылетевшего электрона окажется меньше.]

> Замечательное по простоте и физической ясности уравнение (4) содержит в себе всю теорию фотоэффекта:

> 1. Число выбиваемых электронов пропорционально числу поглощенных фотонов. С увеличением интенсивности света количество фотонов, падающих на катод за секунду, возрастает. Стало быть, пропорционально возрастает число поглощенных фотонов и, соответственно, число выбитых за секунду электронов.

> 2. Выразим из формулы (4) кинетическую энергию: $mv^2/2 = h\nu - A$ (она равна разности энергии кванта и энергии выхода)

Действительно, кинетическая энергия выбитых электронов линейно растет с частотой и не зависит от интенсивности света.

> 3. Для того, чтобы начался фотоэффект, энергии фотона должно хватить как минимум на совершение работы выхода: $h\nu > A$. Наименьшая частота ν_0 ,

определяемая ν_0 равенством $h \nu_0 = A$, как раз и будет красной границей фотоэффекта. Как видим, красная граница фотоэффекта равна $\nu_0 = A/h$ определяется только работой выхода, т. е. зависит лишь от вещества облучаемой поверхности катода. Следовательно, интенсивность света роли не играет; главное хватает ли отдельному фотону энергии, чтобы выбить электрон.

Уравнение Эйнштейна (4) дает возможность экспериментального нахождения постоянной Планка, в точности совпадающее с всем известным табличным значением. Такое совпадение результатов двух независимых экспериментов на основе спектров теплового излучения и уравнения Эйнштейна для фотоэффекта означало, что обнаружены совершенно новые «правила игры», по которым происходит взаимодействие света и вещества.

> Таким образом, казавшееся устоявшимся волновое описание света оказалось неполным, оказалось, что свет проявляет не только волновые, но и корпускулярные свойства. Такое явление называется корпускулярно-волновой дуализм (> или квантово-волновой дуализм) — свойство природы, состоящее в том, что материальные микроскопические объекты могут при одних условиях проявлять свойства классических волн, а при других — свойства классических частиц.

> Свет можно трактовать как поток корпускул (фотонов), которые во многих физических эффектах проявляют свойства классических электромагнитных волн. Свет демонстрирует свойства волны в явлениях дифракции и интерференции при масштабах, сравнимых с длиной световой волны. Например, даже одиночные фотоны, проходящие через двойную щель, создают на экране интерференционную картину, определяемую уравнениями Максвелла.

Тем не менее, эксперимент показывает, что фотон не есть короткий импульс электромагнитного излучения, например, он не может быть разделён на несколько пучков оптическими делителями лучей. Корпускулярные свойства света проявляются в закономерностях равновесного теплового излучения, при фотоэффекте. Фотон ведёт себя и как частица, которая излучается или поглощается целиком объектами, размеры которых много меньше его длины волны (например, атомными ядрами), или вообще могут считаться точечными (например, электрон).

Чем меньше длина волны электромагнитного излучения, тем больше энергия и импульс фотонов и тем труднее обнаружить волновые свойства этого излучения.

Так явление фотоэффекта положило начало новой теории квантовой механики.