

Фотоэффект

Темы кодификатора ЕГЭ: гипотеза М. Планка о квантах, фотоэффект, опыты А. Г. Столетова, уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.

Фотоэффект — это выбивание электронов из вещества падающим светом. Явление фотоэффекта было открыто Генрихом Герцем в 1887 году в ходе его знаменитых экспериментов по излучению электромагнитных волн.

Напомним, что Герц использовал специальный разрядник (вibrator Герца) — разрезанный пополам стержень с парой металлических шариков на концах разреза. На стержень подавалось высокое напряжение, и в промежутке между шариками проскакивала искра. Так вот, Герц обнаружил, что при облучении отрицательно заряженного шарика ультрафиолетовым светом проскакивание искры облегчалось.

Герц, однако, был поглощён исследованием электромагнитных волн и не принял данный факт во внимание. Год спустя фотоэффект был независимо открыт русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым. Тщательные экспериментальные исследования, проведённые Столетовым в течение двух лет, позволили сформулировать основные законы фотоэффекта.

Опыты Столетова

В своих знаменитых экспериментах Столетов использовал фотоэлемент¹ собственной конструкции. Его схема изображена на рис. 1.

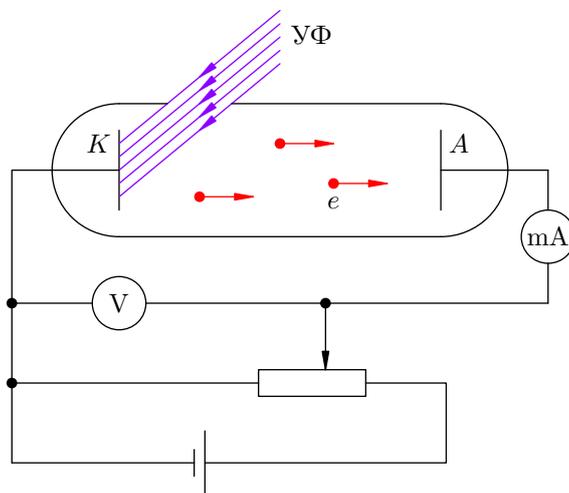


Рис. 1. Фотоэлемент Столетова

В стеклянную колбу, из которой выкачан воздух (чтобы не мешать лететь электронам), введены два электрода: цинковый катод K и анод A . На катод и анод подаётся напряжение, величину U которого можно менять с помощью потенциометра и измерять вольтметром V .

Сейчас на катод подан «минус», а на анод — «плюс», но можно сделать и наоборот (и эта перемена знака — существенная часть опытов Столетова). Напряжению на электродах приписывается тот знак, который подан на анод². В данном случае, например, напряжение U положительно.

¹ *Фотоэлементом* называется любое устройство, позволяющее наблюдать фотоэффект.

² Поэтому поданное на электроды напряжение U часто называют *анодным напряжением*.

Катод освещается ультрафиолетовыми лучами УФ через специальное кварцевое окошко, сделанное в колбе (стекло поглощает ультрафиолет, а кварц пропускает). Ультрафиолетовое излучение выбивает с катода электроны e , которые разгоняются напряжением U и летят на анод. Включённый в цепь миллиамперметр mA регистрирует электрический ток. Этот ток называется *фототоком*, а выбитые электроны, его создающие, называются *фотоэлектронами*.

В опытах Столетова можно независимо варьировать три величины: анодное напряжение, интенсивность света и его частоту.

Зависимость фототока от напряжения

Меняя величину и знак анодного напряжения, можно проследить, как меняется фототок. График этой зависимости, называемый *характеристикой фотоэлемента*, представлен на рис. 2.

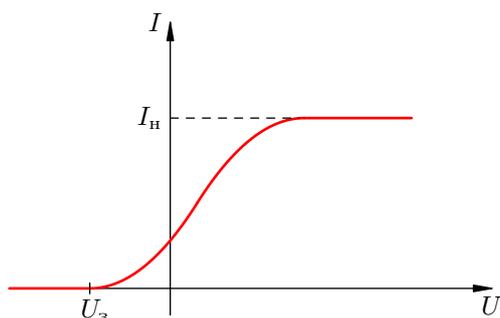


Рис. 2. Характеристика фотоэлемента

Давайте обсудим ход полученной кривой. Прежде всего заметим, что электроны вылетают из катода с различными скоростями и в разных направлениях; максимальную скорость, которую имеют фотоэлектроны в условиях опыта, обозначим v .

Если напряжение U отрицательно и велико по модулю, то фототок отсутствует. Это легко понять: электрическое поле, действующее на электроны со стороны катода и анода, является тормозящим (на катоде «плюс», на аноде «минус») и обладает столь большой величиной, что электроны не в состоянии долететь до анода. Начального запаса кинетической энергии не хватает — электроны теряют свою скорость на подступах к аноду и разворачиваются обратно на катод. Максимальная кинетическая энергия вылетевших электронов оказывается меньше, чем модуль работы поля при перемещении электрона с катода на анод:

$$\frac{mv^2}{2} < eU.$$

Здесь $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг — масса электрона, $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — его заряд.

Будем постепенно увеличивать напряжение, т. е. двигаться слева направо вдоль оси U из далёких отрицательных значений.

Поначалу тока по-прежнему нет, но точка разворота электронов становится всё ближе к аноду. Наконец, при достижении напряжения U_3 , которое называется *задерживающим напряжением*, электроны разворачиваются назад в момент достижения анода (иначе говоря, электроны прибывают на анод с нулевой скоростью). Имеем:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3. \tag{1}$$

Таким образом, *величина задерживающего напряжения позволяет определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов.*

При небольшом превышении задерживающего напряжения появляется слабый фототок. Его формируют электроны, вылетевшие с максимальной кинетической энергией почти точно вдоль оси колбы (т. е. почти перпендикулярно катоду): теперь электронам хватает этой энергии, чтобы добраться до анода с ненулевой скоростью и замкнуть цепь. Остальные электроны, которые имеют меньшие скорости или полетели в сторону от анода, на анод не попадают.

При повышении напряжения фототок увеличивается. Анода достигает большее количество электронов, вылетающих из катода под всё большими углами к оси колбы. Обратите внимание, что фототок присутствует при нулевом напряжении!

Когда напряжение выходит в область положительных значений, фототок продолжает возрастать. Оно и понятно: электрическое поле теперь разгоняет электроны, поэтому всё большее их число получают шанс оказаться на аноде. Однако достигают анода пока ещё не все фотоэлектроны. Например, электрон, вылетевший с максимальной скоростью перпендикулярно оси колбы (т. е. вдоль катода), хоть и развернётся полем в нужном направлении, но не настолько сильно, чтобы попасть на анод.

Наконец, при достаточно больших положительных значениях напряжения ток достигает своей предельной величины I_n , называемой *током насыщения*, и дальше возрастать перестаёт. Почему? Дело в том, что напряжение, ускоряющее электроны, становится настолько велико, что анод захватывает вообще все электроны, выбитые из катода — в каком бы направлении и с какими бы скоростями они не начинали движение. Стало быть, дальнейших возможностей увеличиваться у фототока попросту нет — ресурс, так сказать, исчерпан.

Законы фотоэффекта

Величина I_n тока насыщения — это, по существу, количество электронов, выбиваемых из катода за одну секунду. Будем менять интенсивность света, не трогая частоту. Опыт показывает, что ток насыщения меняется пропорционально интенсивности света.

Первый закон фотоэффекта. *Число электронов, выбиваемых из катода за секунду, пропорционально интенсивности падающего на катод излучения (при его неизменной частоте).*

Ничего неожиданного в этом нет: чем больше энергии несёт излучение, тем ощутимее наблюдаемый результат. Загадки начинаются дальше.

А именно, будем изучать зависимость максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты и интенсивности падающего света. Сделать это несложно: ведь в силу формулы (1) нахождение максимальной кинетической энергии выбитых электронов фактически сводится к измерению задерживающего напряжения.

Сначала меняем частоту излучения ν при фиксированной интенсивности. Получается такой график (рис. 3):

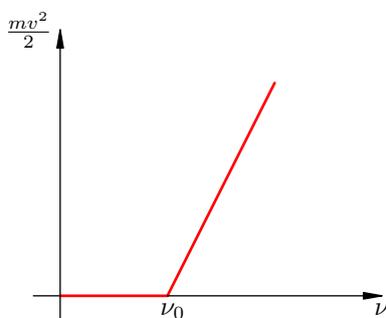


Рис. 3. Зависимость энергии фотоэлектронов от частоты света

Как видим, существует некоторая частота ν_0 , называемая *красной границей фотоэффекта*, разделяющая две принципиально разные области графика. Если $\nu < \nu_0$, то фотоэффекта нет.

Если же $\nu > \nu_0$, то максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно растёт с частотой.

Теперь, наоборот, фиксируем частоту и меняем интенсивность света. Если при этом $\nu < \nu_0$, то фотоэффект не возникает, какова бы ни была интенсивность! Не менее удивительный факт обнаруживается и при $\nu > \nu_0$: максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов от интенсивности света не зависит.

Все эти факты нашли отражение во втором и третьем законах фотоэффекта.

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

Третий закон фотоэффекта. *Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта — наименьшая частота света ν_0 , при которой фотоэффект ещё возможен. При $\nu < \nu_0$ фотоэффект не наблюдается ни при какой интенсивности света.*

Трудности классического объяснения фотоэффекта

Как можно было бы объяснить фотоэффект с точки зрения классической электродинамики и волновых представлений о свете?

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 решётки, 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. И если энергия колебаний превысит работу выхода, то электрон будет вырван из вещества.

Однако в рамках таких представлений невозможно понять второй и третий законы фотоэффекта. Действительно, почему кинетическая энергия выбитых электронов не зависит от интенсивности излучения? Ведь чем больше интенсивность, тем больше напряжённость электрического поля в электромагнитной волне, тем больше сила, действующая на электрон, тем больше энергия его колебаний и с тем большей кинетической энергией электрон вылетит из катода. Логично? Логично. Но эксперимент показывает иное.

Далее, откуда берётся красная граница фотоэффекта? Чем «провинились» низкие частоты? Казалось бы, с ростом интенсивности света растёт и сила, действующая на электроны; поэтому даже при низкой частоте света электрон рано или поздно будет вырван из вещества — когда интенсивность достигнет достаточно большого значения. Однако красная граница ставит жёсткий запрет на вылет электронов при низких частотах падающего излучения.

Кроме того, неясна *безынерционность* фотоэффекта. Именно, при освещении катода излучением сколь угодно слабой интенсивности (с частотой выше красной границы) фотоэффект начинается *мгновенно* — в момент включения освещения. Между тем, казалось бы, электронам требуется некоторое время для «расшатывания» связей, удерживающих их в веществе, и это время «раскачки» должно быть тем больше, чем слабее падающий свет. Аналогия такая: чем слабее вы толкаете качели, тем дольше придётся их раскачивать до заданной амплитуды. Выглядит опять-таки логично, но опыт — единственный критерий истины в физике! — этим доводам противоречит.

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.

Выход из этого тупика был найден Альбертом Эйнштейном в 1905 году. Он нашёл 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 привлёк к делу смелую гипотезу о квантах, высказанную Максом Планком пятью годами ранее.

Гипотеза Планка о квантах

Классическая электродинамика отказалась работать не только в области фотоэффекта. Она также дала серьёзный сбой, когда её попытались использовать для описания излучения нагретого тела (так называемого теплового излучения).

Суть проблемы состояла в том, что простая и естественная электродинамическая модель теплового излучения приводила к бессмысленному выводу: любое нагретое тело, непрерывно излучая, должно постепенно потерять всю свою энергию и остыть до абсолютного нуля. Как мы прекрасно знаем, ничего подобного не наблюдается.

В ходе решения этой проблемы Макс Планк высказал свою знаменитую гипотезу.

Гипотеза о квантах. *Электромагнитная энергия излучается и поглощается не непрерывно, а отдельными неделимыми порциями — квантами. Энергия кванта пропорциональна частоте излучения:*

$$E = h\nu. \quad (2)$$

Соотношение (2) называется *формулой Планка*, а коэффициент пропорциональности h — *постоянной Планка*.

Принятие этой гипотезы позволило Планку построить теорию теплового излучения, прекрасно согласующуюся с экспериментом. Располагая известными из опыта спектрами теплового излучения, Планк вычислил значение своей постоянной:

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (3)$$

Успешность гипотезы Планка наводила на мысль, что законы классической физики неприменимы к малым частицам вроде атомов или электронов, а также к явлениям взаимодействия света и вещества. Подтверждением данной мысли как раз и послужило явление фотоэффекта.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

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 пошёл ещё 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 , несёт энергию $h\nu$.

Фотоны могут обмениваться энергией и импульсом³ с частицами вещества; в таком случае мы говорим о *столкновении* фотона и частицы. В частности, происходит столкновение фотонов с электронами металла катода.

³Об импульсе фотона речь пойдёт в следующем листке.

Поглощение света — это поглощение фотонов, то есть *неупругое* столкновение фотонов с частицами (атомами, электронами). Поглощаясь при столкновении с электроном, фотон передаёт 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 идёт энергия фотона $h\nu$ при его неупругом столкновении с электроном? Она расходуется на совершение работы выхода A по извлечению электрона из вещества и на придание электрону кинетической энергии $mv^2/2$:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \quad (4)$$

Слагаемое $mv^2/2$ оказывается *максимальной* кинетической энергией фотоэлектронов. Почему максимальной? Этот вопрос требует небольшого пояснения.

Электроны в металле могут быть свободными и связанными. 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 попадёт на свободный электрон в поверхностном слое металла — тогда для выбивания электрона достаточно одной лишь работы выхода.

Во всех других случаях придётся 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. Давайте посмотрим, какое объяснение получают законы фотоэффекта с точки зрения уравнения Эйнштейна.

1. Число выбиваемых электронов пропорционально числу поглощённых фотонов. С увеличением интенсивности света количество фотонов, падающих на катод за секунду, возрастает. Стало быть, пропорционально возрастает число поглощённых фотонов и, соответственно, число выбитых за секунду электронов.
2. Выразим из формулы (4) кинетическую энергию:

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - A.$$

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

Зависимость кинетической энергии от частоты имеет вид уравнения прямой, проходящей через точку $(A/h, 0)$. Этим полностью объясняется ход графика на рис. 3.

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

$$h\nu_0 = A,$$

как раз и будет красной границей фотоэффекта. Как видим, красная граница фотоэффекта $\nu_0 = A/h$ определяется только работой выхода, т. е. зависит лишь от вещества облучаемой поверхности катода.

Если $\nu < \nu_0$, то фотоэффекта не будет — сколько бы фотонов за секунду не падало на катод. Следовательно, интенсивность света роли не играет; главное — хватает ли отдельному фотону энергии, чтобы выбить электрон.

Уравнение Эйнштейна (4) даёт возможность экспериментального нахождения постоянной Планка. Для этого надо предварительно определить частоту излучения и работу выхода материала катода, а также измерить кинетическую энергию фотоэлектронов.

В ходе таких опытов было получено значение h , в точности совпадающее с (3). 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. В этой области классическая физика в лице механики Ньютона и электродинамики Максвелла уступает место *квантовой физике* — теории микромира, построение которой продолжается и сегодня.