

## СТОЛЕТОВ И ФОТОЭФФЕКТ

(напечатано в журнале "[Инженер](#)" №2, 2009)



Александр Григорьевич  
Столетов (1839-1896)

120 лет назад произошло важное для науки и техники событие. Летом 1888 г. русский физик-экспериментатор А.Г. Столетов исследовал явление фотоэлектрического эффекта, установил его природу и главные закономерности. Явление не только кардинально повлияло на развитие физики, но и повлекло массу открытий, изобретений. Все теле- и видео-камеры, цифровые фотоаппараты, фотоэлементы, солнечные батареи и прочие устройства, преобразующие свет в электрические сигналы и наоборот, основаны на фотоэффекте. Без него не мыслима современная техника. Казалось бы, столь важное явление должно быть подробно изучено и объяснено. Но несмотря на 120-летнюю историю исследований фотоэффект так и не нашёл адекватного исчерпывающего объяснения, тая уйм загадок. О них и поговорим.

Суть фотоэффекта, как открыл Столетов, состоит в испускании металлом под действием света отрицательно заряженных частиц, оказавшихся на поверку электронами. Первый закон фотоэффекта, открытый Столетовым, гласит: интенсивность тока электронов (фототока) из металла пропорциональна интенсивности освещения. Из этого, полагали, естественно заключить, что именно свет даёт энергию фотоэлектронам, заставляя их вылетать из металла: чем больше света – тем больше электронов покидает металл. Но Столетов обнаружил удивительную вещь: электроны начинали выходить из металла мгновенно, едва включали освещение [1]. Как показали расчёты, свет просто не успел бы передать электронам требуемую для выхода энергию [2]. Другой загадкой был открытый Ф. Ленардом закон, по которому скорость, энергия  $E$  фотоэлектронов зависит не от интенсивности света, а лишь от его частоты  $f$ .

Вместе эти два факта – безынерционность фототока и независимость энергии электронов от яркости – означали, что вовсе не свет даёт энергию электронам. И вот Макс Планк предположил, что фотоэлектроны получают энергию от самого металла, а свет лишь включает спусковой механизм фотоэффекта, играя роль искры, вызывающей взрыв бочонка с порохом, выстрел кремневого ружья – атома металла, стреляющего пулями-электронами [3]. Чем больше света – запальных искр, тем чаще раздаются выстрелы – металл чаще стреляет электронами. Но эту идею Планка забыли и приняли другую его гипотезу, которую сам он не рассматривал всерьёз, – гипотезу квантов, по которой свет состоит из малых порций, сгустков энергии  $hf$  (квантов, фотонов), которые разом отдают электронам свою энергию. Квантовая гипотеза объясняет безынерционность фотоэффекта и зависимость  $E=hf$ , но не объясняет других свойств фотоэффекта и не вяжется с волновой, электромагнитной природой света.

Рассмотрим, например, открытую Столетовым усталость фотоэффекта – уменьшение фототока с течением времени при постоянном уровне освещения [1]. Объяснить это можно, лишь признав, что источник энергии фотоэлектронов в металле. С течением времени этот источник истощается, как нашёл Столетов, тем быстрее, чем сильнее фототок. Квантовая теория объяснить этот эффект не может. Другой проблемный для теории квант эффект, тоже открытый Столетовым, – это температурная зависимость фототока [1]. Оказалось, при постоянной освещённости фототок заметно увеличивается с ростом температуры металла, причём

задолго до того, как проявится термоэлектронная эмиссия. Если источник энергии фотоэлектронов не в свете, а в металле, то зависимость эта вполне понятна: чем выше температура металла, его энергия, тем больше электронов достаточной энергии накапливает металл.

Механизм выброса металлом электронов был рассмотрен ранее [3, 4]. Видимо, свет воздействует не на свободные электроны металла, как считалось, а на захваченные атомами и вращающиеся в их магнитном поле (рис. 1). Такие электроны уже обладают необходимой для вылета кинетической энергией. Падающий свет лишь изменяет их траектории так, что они покидают магнитные ловушки атомов, сохранив исходный запас энергии (в отличие от электрического удержания электронов, магнитное не меняет их энергии). Вскоре на их место приходят другие электроны, набравшие энергию в ходе теплового движения и случайных столкновений. Чем сильнее нагрет металл, тем больше таких электронов, обладающих нужной энергией и захваченных атомами. Отсюда понятна температурная зависимость фототока.

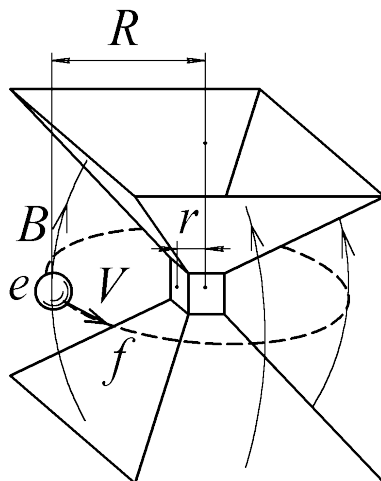


Рис. 1. Движение внешнего электрона в магнитном поле  $B$  атома и критические радиусы орбиты.

Атом играет роль магнитной ловушки электронов, захватывающей и длительно удерживающей их на орбите. Когда падающий свет – электромагнитное поле, меняющееся с частотой  $f$ , попадает в резонанс с частотой обращения электрона, то заставляет его сойти с устойчивой орбиты и покинуть атом, а затем металл (рис. 2). Кстати, для внутреннего фотоэффекта давно поняли, что свет воздействует не на свободные, а на связанные в атомах электроны, высвобождая их (это объясняет усталость фотоэлементов). Если искромётная гипотеза Планка верна, то и для внешнего фотоэффекта, где электроны покидают металл, свет воздействует лишь на пойманные атомами электроны. Именно атомы будут ружьём, пращей, баллистой, стреляющей электронами, тогда как свету отведена скромная роль спускового механизма этих метательных орудий. Итак, нет особой разницы меж внутренним и внешним фотоэффектом: и там и там свет вырывает электроны из атомов. Просто в первом случае они остаются в образце, а во втором выходят наружу. Вообще никто ещё не обнаружил передачи светом энергии свободному электрону. Свободный электрон, как признают сторонники квантовой теории, в принципе не может поглотить энергию  $hf$  у света [2]. Недаром фотоэффект и комптон-эффект наблюдают всегда только в веществе, у электронов, связанных с атомами.

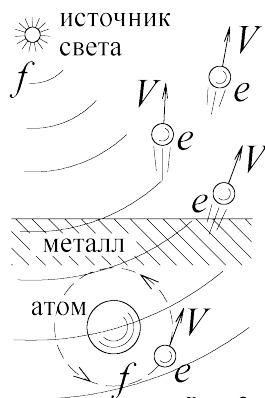


Рис. 2. Природа фотоэффекта.

Рассмотрим механизм фотоэффекта – как он идёт на атомном уровне. Понять его можно лишь на базе магнитной модели атома Ритца [4, 5]. Ритц показал, что электроны в атоме занимают возле ядра устойчивые положения, откуда следует стабильность атома (невозможная в динамических, планетарных моделях). Если электроны и движутся вокруг ядра, то лишь под действием магнитных, а не электрических сил. При этом вращающийся электрон, теряя энергию на излучение, будет не падать на ядро, а отдаляться от него – в магнитном поле вся энергия электрона кинетическая, и она спадает с удалением. Когда захваченные атомом внешние электроны отрываются, на смену им приходят новые. Магнитное поле атома создают элементарные магнитные диполи – электроны и позитроны, выстроенные в правильном порядке. В итоге ядро, остов атома напоминает песочные часы – четырёхгранную бипирамиду (рис. 1). Электрон движется в её средней плоскости и его кинетическая энергия  $E$  связана с частотой  $f$  обращения электрона и генерируемого им излучения законом  $E=hf$ , где  $h$  – постоянная Планка [4, 5]. Вот почему свет частоты  $f$ , попав в металл в резонанс с обращением отдельных электронов, срывает их с орбиты, и те вылетают с сохранением своей энергии  $E=hf$  (рис. 2). При этом, раз электроны внешние, избыточные, а поле магнитное, им не приходится затрачивать энергию на отрыв от атома – электрической силы со стороны атома нет.

Заметим, что и Планк, объяснив закон теплового излучения посредством гипотезы квантов, говорил исходно лишь о связи  $E=hf$  энергии осцилляторов (электронов в атоме) с частотой их колебаний  $f$ . А раз именно такую связь даёт бипирамидальная модель атома, из неё сразу следует закон излучения Планка. Лишь позднее классическую идею Планка извратили так, будто энергия квантуется: свет излучается квантами, фотонами. Судьба идей Планка напоминает историю открытий Ритца. Их выводами воспользовались адепты неклассической физики, проигнорировав классические идеи, в рамках которых выводы были получены.

Рассмотренный механизм образования фотоэлектронов приводит к выводу, что фотоэффект можно наблюдать лишь в некотором диапазоне частот. Раз энергия электрона  $E=MV^2/2=hf$ , а его скорость связана с радиусом орбиты  $R$  зависимостью  $V=2\pi Rf$ , то  $f=h/2\pi^2 R^2 M$ . Но радиус орбиты электрона  $R$  не может быть ни слишком велик, ни слишком мал, а значит и диапазон частот излучения, выбивающего электроны, ограничен сверху и снизу. Электрон не должен находиться слишком близко к ядру, где кулоновское притяжение ядра преобладает над магнитной силой. Внешний электрон обязан располагаться за сферой внутренних, узловых электронов, экранирующих заряд ядра. Это даёт синюю границу фотоэффекта. С другой стороны, радиус орбиты не может быть больше размеров атома: вне атомного остова магнитное поле резко спадает, и атом не может удержать там электроны на орбите. Так что и для внутреннего фотоэффекта, где электрон остаётся в образце и ему не надо совершать работу выхода, должна быть красная граница фотоэффекта: свет с частотой меньшей  $f=h/2\pi^2 R^2 M$  неэффективен ( $R$  – радиус атома). И такая красная граница обнаружена.

Интересно рассчитать эти границы, зная минимальный  $r$  и максимальный  $R$  радиусы орбиты электрона (рис. 1). Минимальный радиус должен быть порядка тысяч радиусов ядра: электроны вряд ли могут располагаться ближе  $r \approx 10^{-12}$  м. Отсюда максимальная частота  $f=h/2\pi^2 r^2 M \approx 10^{19}$  Гц. То есть излучение с частотой много большей  $10^{19}$  Гц уже не сможет вызывать фотоэффект – это жёсткие рентгеновские лучи и мягкие гамма-лучи. Максимальный радиус орбиты составляет порядка радиуса атома  $R \approx 10^{-10}$  м. Откуда красная граница фотоэффекта лежит в области частот  $f_{кр}=h/2\pi^2 R^2 M \approx 10^{15}$  Гц, но это есть видимый свет. И тут интересно заметить, что во внешнем фотоэффекте красная граница как раз соответствует видимому свету. Считают, что это связано с наличием работы выхода – минимальной энергией  $A$ , которую должен затратить электрон, дабы покинуть металл. А наименьшая частота света (красная граница), выбивающая электрон  $f_{кр}=A/h$ . Но не исключено, что красная граница и работа выхода связаны со свойствами самих атомов, а не металла. Тому есть подтверждения.

металл	$\lambda_{\text{изм}}, \text{нм}$	$R, \text{\AA}$	$\lambda_{\text{рас}}, \text{нм}$
Ag	261	1,75	250
Fe	262	1,72	241
Au	265	1,79	261
Hg	274	1,76	252
Ta	305	2,09	355
Li	500	2,05	342
Na	540	2,23	405
K	550	2,77	625

Таблица 1. Измеренная красная граница металлов и рассчитанная  $\lambda_{\text{рас}}=c/f_{\text{кр}}$  по  $R$

Так, самую длинноволновую красную границу имеют щелочные металлы, что естественно, поскольку у них наибольшие атомные радиусы  $R$ . У этих металлов красная граница расположена в диапазоне видимого света, а предельная длина волны  $\lambda=c/f_{\text{кр}}$  растёт с ростом атомного радиуса. У металлов же с меньшими атомными радиусами, красная граница расположена в области ультрафиолета (таблица 1). Выходит, и красная граница, и сама работа выхода заданы свойствами атомов, а не металла в целом. И это естественно, ведь металл – это по сути одна гигантская молекула – много атомов, слившихся воедино: их электроны обобщены. А работа выхода – это энергия ионизации такой молекулы, пропорциональная энергии ионизации её атомов. И точно, у металлов с наименьшей энергией ионизации  $E_{\text{и}}$  – у щелочных металлов – минимальна и работа выхода  $A$ , и эти энергии растут с уменьшением атомного радиуса (таблица 2). Почему-то этот факт, загадочный с точки зрения квантовой теории, игнорируют, хоть и отмечают, что красная граница тем дальше сдвинута в сторону длинных волн, чем электроположительней атомы металла – чем легче они отдают свои электроны [6].

металл	$A, \text{эВ}$	$E_{\text{и}}, \text{эВ}$	$R, \text{\AA}$
Cs	1,89	3,88	3,34
Ba	2,29	5,19	2,78
Al	3,74	5,96	1,82
Fe	4,36	7,83	1,72
Mo	4,37	7,65	2,01
Cu	4,47	7,72	1,57
W	4,50	7,98	2,02
Cr	4,51	6,74	1,85
Ni	4,84	7,61	1,62
Pt	5,29	8,96	1,83

Таблица 2. Работы выхода  $A$  и потенциалы ионизации металлов

Другая важная разновидность фотоэффекта – нелинейный фотоэффект, в котором мощное лазерное излучение частоты  $f$  выбивает электроны с энергией уже не  $hf$ , а удвоенной и кратной энергии:  $E=nhf$ , где  $n$  – целое. Это принято объяснять тем, что в лазерном излучении плотность потока фотонов столь высока, что электрон порой поглощает сразу несколько фотонов, забирая их энергию. Но эффект легко объясним и в рамках волновой оптики. Металл под действием лазерного излучения генерирует за счёт нелинейных эффектов излучение удвоенной и других кратных частот. Вторичное излучение и выбивает электроны из металла. В отличие от принятого многофотонного объяснения это позволяет также понять, почему нелинейный фотоэффект вызывает только нормальная к металлу компонента поля волны [6].

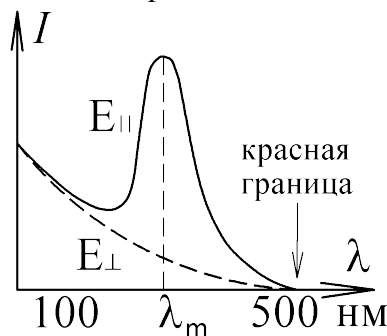


Рис. 3. Зависимость фототока  $I$  от длины волны падающего света в селективном эффекте для двух направлений поляризации [6].

Ещё одна загадочная и до сих пор не объяснённая особенность фотоэффекта – селективный (избирательный) фотоэффект. Суть его в том, что вблизи некоторых частот фототок сильно возрастает, как при резонансе (рис. 3). Эффект опять же вызывает лишь составляющая поля нормальная к поверхности металла. Значит, снова причину эффекта надо искать в металле, а не в фотонах. Понять природу эффекта легко, если заметить, что он обнаружен в области ультрафиолета. Но как раз в ультрафиолете металлы обретают прозрачность [7]. То есть ультрафиолетовые лучи некоторого диапазона способны вырывать электроны не только с поверхности металла, но также из глубины, проникая в его толщу. Вот почему на этих частотах фототок заметно возрастает. Во-первых, меньшая часть света отражается, проникая вглубь. А во-вторых, свет воздействует на большее число атомов, готовых к выбросу электрона, и потому эффективность воздействия света на вещество повышена. Итак, пик фототока наблюдается в окне прозрачности металла для света. Как показывает таблица 3, частота  $f=c/\lambda_m$ , отвечающая этому пику, нарастает с уменьшением размера атома  $R$ . Поэтому пик может быть обусловлен и тем, что в атомах есть орбиты, где электронов особенно много, причём в силу подобия атомов радиус этих орбит растёт с увеличением размера атома.

металл	$\lambda_m$ , нм	$R$ , А	$E_{и}$ , эВ
Al	215	1,11	5,98
Mg	250	1,72	7,64
Li	280	2,05	5,39
Na	340	2,23	5,14
Ba	400	2,78	5,81
K	435	2,77	4,33
Rb	480	2,98	4,18
Cs	510	3,34	3,89

Таблица 3. Длина волны максимального фототока в селективном фотоэффекте

Осталось объяснить зависимость селективного фотоэффекта от поляризации излучения. Так, при падении луча перпендикулярно границе металла селективный фотоэффект отсутствует, подобно нелинейному. Зато при косом падении луча он максимален. Если селективный эффект вызван компонентой излучения, проникающей в глубь металла, то объяснение очевидно. Из оптики [6] известно, что излучение разной поляризации по-разному проникает в преломляющую среду (рис. 4). Лучше всего проходит излучение с вектором поляризации, лежащим в плоскости падения (параллельная поляризация  $E_{||}$ ), то есть как раз излучение с составляющей электрического поля нормальной к границе среды. А излучение с вектором поляризации перпендикулярным плоскости падения (перпендикулярная поляризация  $E_{\perp}$ ) не имеет нормальной к границе составляющей поля и проникает в среду заметно слабее, эффективно отражаясь. А при угле падения равном углу Брюстера излучение с продольной поляризацией полностью проходит в среду (рис. 5). Различие проницаемости среды для света выражено тем сильнее, чем выше показатель преломления среды  $n$ . Для ультрафиолетовых лучей металл можно условно считать прозрачной средой, но с большим  $n$  (строго это делают в металлооптике). Отсюда высокая отражательная способность металлов (коэффициент отражения  $R$  растёт с ростом  $n$ ) и отсюда же ясно, почему свет с вектором поляризации перпендикулярным поверхности почти не проникает в толщу металла и не даёт селективного фотоэффекта. Зато, как видно из графика (рис. 5), свет с продольной поляризацией проникает и создаёт фототок тем эффективней, чем больше угол падения  $\varphi$  и нормальная компонента поля. При большом  $n$  угол Брюстера, при котором всё излучение  $E_{||}$  проходит в металл, близок к  $90^\circ$ .

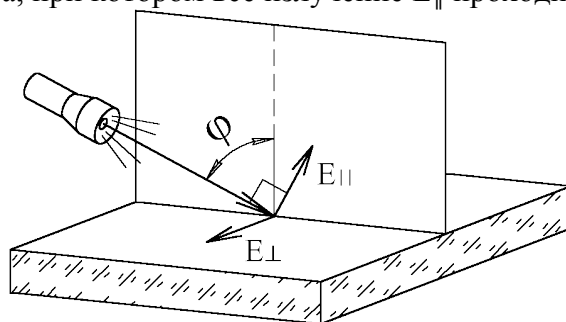


Рис. 4. Падение на границу двух сред света с продольной и поперечной относительно плоскости падения поляризациями.



То же справедливо для нелинейного фотоэффекта, где важна лишь нормальная к поверхности составляющая поля. Раз преобразование излучения во вторую гармонику – обычный нелинейный волновой эффект, протекающий в веществе (любое вещество в сильных лазерных полях становится нелинейной средой), то для этого излучение должно прежде проникнуть в толщу среды. А это, как видели, возможно лишь для излучения с нормальной компонентой поля. Прозрачность металла – вещь относительная. В сильных лазерных полях за счёт эффекта просветления среды металл можно считать прозрачным. Именно это позволило создать полупроводниковые лазеры, хотя полупроводники непрозрачны и сходны по свойствам с металлами, что, полагали, делает их непригодными в качестве активной среды лазера.

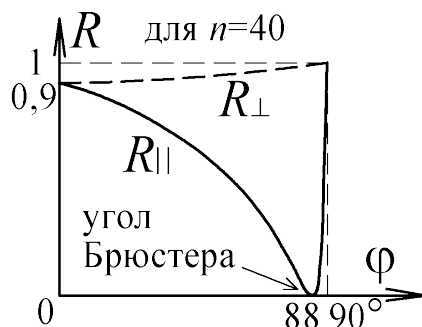


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения  $R$  от угла падения  $\varphi$  для двух типов поляризации [6].

Последняя разновидность фотоэффекта – обратный фотоэффект: генерация металлом излучения при облучении его электронами. Электрон при захвате атомом начинает излучать на частоте своего вращения. Ещё раз отметим, что захват и выброс электрона атомом происходит без изменения энергии (без затрат и выделения энергии ионизации), поскольку захват производит магнитное поле атома. Тогда как потенциальное электрическое поле атомного ядра в принципе не может захватить электрон. Поэтому в фотоэффекте электроны лишь малую долю энергии получают от света – основная часть энергии есть у них изначально. И не исключено, что однажды опыт покажет: энергия электронов, покинувших металл, порой превосходит энергию выбившего их света. Энергия света идёт лишь на изменение орбиты электрона и отрыв его от атома при сходе с устойчивой орбиты. В фотоэлементах (солнечных батареях) эта энергия освобождения электронов и преобразуется в электрическую.

Итак, волновой подход не уступает квантовому, позволяя наглядно объяснить гораздо больше эффектов, прежде казавшихся совершенно загадочными. Волновая теория более удобна и для объяснения комптон-эффекта и рождения электрон-позитронных пар под действием гамма-излучения [3]. Почему же не откажутся от квантового объяснения со всей его несуразностью? Первая причина в отсутствии альтернативных подходов (путь, открытый Планком, давно забыт). Вторая причина в упорном нежелании академических кругов подвергать сомнению основы квантовой механики, ведь фотоэффект – её фундамент. Поэтому представители официальной науки всеми правдами и неправдами скрывают альтернативные пути и проблемы квантовой теории фотоэффекта. Это замалчивание, скрытое противостояние классической и неклассической физики восходит корнями к началу XX века, к тому же Столетову, с внезапной смертью которого связана тёмная история, каких немало в науке.

Столетов был сторонником классического подхода в физике и стоял на страже здравого смысла в науке, за что и пострадал [8]. Дело в том, что другой физик, Б. Голицын, задолго до Луи де Бройля выдвинул идею корпускулярно-волнового дуализма, в том числе в отношении света. Столетов выступил с резкой критикой этой идеи и добился того, что её признали ошибочной. После это ставили в вину Столетову: не окажи он своим авторитетом такого влияния, идея корпускулярно-волнового дуализма прижилась бы много раньше и принадлежала бы России. Якобы Столетов сам загубил идею, объяснявшую исследованный им фотоэффект. Но на деле Столетов, как любой экспериментатор, глубоко чувствовал истинную природу явлений, интуитивно понимая, что идея корпускулярно-волнового дуализма абсурдна.

Трагичен конец этой истории. Голицын, используя своё высокое положение, в ответ на критику Столетова добился, чтобы у того стали возникать служебные неприятности [1, 8]. А Столетов, будучи человеком принципиальным, не мог поступиться своими научными убе-

ждениями. Всё кончилось тяжёлым сердечным приступом и скорой смертью Столетова. Эта история мало освещалась. И до сих пор такие тёмные дела продолжают замалчивать, помогая некой скрытой силе творить беспредел в науке и проводить в жизнь абсурдные неклассические идеи, сметая с пути всех, кто им сопротивляется. Лишь немногие учёные-борцы, вроде Столетова, осмеливаются вопреки вышестоящим чинам публично выступить против абсурда, обнажая его глупость, как в сказке про голого короля. Уже за одно это такие учёные достойны уважения. Их усилиями свет однажды вновь воцарится в учении о свете и фотоэффекте.

С. Семиков

Источники:

1. [Болховитинов В. Столетов А.Г. М.: МГ, 1951.](#)
2. Сивухин Д.В. Атомная и ядерная физика. Ч.1. М.: Наука, 1986.
3. [Свет – частица ли? // Инженер, №6, 2006.](#)
4. [Как устроен атомный излучатель? // Инженер, №10, 2006.](#)
5. [От Атома до Ядра // Инженер, №12, 2007.](#)
6. [Ландсберг Г.С. Оптика, М.: Наука, 1976.](#)
7. Займан Дж. Принципы теории твёрдого тела. М.: Мир, 1974.
8. [Барашенков В.С. Вселенная в электроне. М., 1988.](#)

Дата установки: 09.02.2009

[\[вернуться к содержанию сайта\]](#)