

А. Г. Столетов

1839—1896

О фотоэффекте

Фотоэлектрический эффект был одним из первых физических явлений, который был объяснен на основе представления о квантах света. Интересно, что он был обнаружен Г. Герцем в 1887 г. при проведении опытов, которые в конечном счете подтвердили предсказание электродинамики Максвелла, базирующейся на представлении о непрерывности характеристик поля. Герц обнаружил, что при освещении разрядника светом искры в нем возникал более сильный разряд. Исследованием этого эффекта занялись физики разных стран (среди них А. Риги в Италии, Е. Биша, Р. Блондло во Франции, В. Гальвакс, Г. Эберт, Э. Видеман в Германии и др.). В России этими исследованиями занялся А. Г. Столетов, обнаруживший вскоре несколько важных закономерностей фотоэффекта.

Александр Григорьевич Столетов родился 10 августа 1839 г. во Владимире в купеческой семье, в которой много внимания уделяли образованию детей. Окончив гимназию в родном городе, Столетов поступил в Московский университет, с которым впоследствии была связана вся его научная и педагогическая деятельность. Студент, аспирант, профессор математической, а затем и экспериментальной физики, создатель первой в России университетской научно-исследовательской лаборатории, признанный глава русских физиков — таков путь, пройденный Столетовым в науке. После окончания университета он совершенствует свое образование в Берлинском университете у Г. Магнуса, а затем в университете Гейдельберга у Р. Кирхгофа. И в дальнейшем ученый широко общается с выдающимися физиками Европы, участвует в работе международных конгрессов и конференций как представитель русской физической науки.

Известность получила защищенная в 1872 г. докторская диссертация А. Г. Столетова «Исследование о функции намагничения мягкого железа», экспериментальная часть которой была выполнена ученым в лаборатории Кирхгофа. Поставив задачу исследовать зависимость коэффициента восприимчивости (Столетов называл его «функцией намагничивания») от внешнего

магнитного поля, он разработал новый метод измерения магнитных свойств вещества на образцах, имеющих форму кольца. Этот метод, названный баллистическим, получил большое распространение в практике магнитных измерений. Таким образом, Столетов развил работы в этой области, начатые еще Э. Х. Ленцем и Б. С. Якоби.

Получили известность исследования Столетова несамостоятельного газового разряда, в процессе которых он установил, что отношение напряженности электрического поля к давлению газа при максимальном токе есть величина постоянная (она названа константой Столетова).

Столетов одним из первых отметил важность проведения экспериментов, подтверждающих справедливость электромагнитной теории света, и предложил новый метод определения отношения электростатических и магнитных единиц, позволявший получить значение скорости света. О своем методе, названном им «методом абсолютного конденсатора», он сделал сообщение на заседании Французского физического общества в Париже во время проведения первого международного конгресса электриков.

Столетов с энтузиазмом воспринял известие о знаменитых опытах Герца по получению и исследованию свойств электромагнитных волн, в ходе которых был обнаружен фотоэффект. Первые опыты по изучению этого явления ученый начал 20 февраля 1888 г. Вскоре к нему пришел успех, и уже в 1889 г. он публикует свою фундаментальную работу «Актино-электрические исследования» (так Столетов называл фотоэлектрический эффект). Следует отметить, что свои опыты Столетов проводил, не зная о существовании электронов, и поэтому был вынужден ограничиться чисто феноменологическим описанием закономерностей фотоэффекта. Лишь позднее (1899—1900) было доказано, что он заключается в испускании электронов с поверхности металлов под действием падающего света. Объяснение закономерностей, обнаруженных Столетовым, было дано после выдвижения А. Эйнштейном идеи о квантах света (1905). А. Г. Столетов умер 14 мая 1896 г.

Актино-электрические исследования

Повторяя в начале 1888 г. интересные опыты гг. Герца, Э. Видемана и Эберта, Гальвакса относительно действия лучей на электрические разряды высокого напряжения, я вздумал испытать, получится ли подобное действие при электричестве слабых потенциалов. Кроме прямого ответа на заданный вопрос такое видоизменение опытов представляло, на мой взгляд, двойкий интерес: с одной стороны, оно позволило бы ярче выставить на вид загадочное действие лучей, не смешивая его с обыкновенным

рассеиванием электрических зарядов (которое в случае слабых потенциалов бывает вообще ничтожно); с другой стороны, явилась бы возможность подвергнуть явление более точному измерительному изучению, чем это имело место в опытах названных ученых. Методы измерений вообще довольно несовершенны, когда речь идет о высоких потенциалах электрических машин и лейденских банок, и измерительные снаряды такого рода встречаются не везде, между тем как чувствительный гальванометр и обыкновенный квадрант-электромметр имеются во всяком физическом институте и употребление их удобно и надежно.

Моя попытка имела успех выше ожидания. Первые мои опыты начаты около 20 февраля 1888 г. и продолжались непрерывно, насколько позволяли другие занятия, по 21 июня 1888 г. В течение этого времени мне удалось, полагаю, осветить некоторые любопытные вопросы относительно «актиноэлектрических» действий*. Некоторые дополнительные наблюдения произведены во второй половине 1888 г. и в текущем году, и я еще не считаю моего исследования законченным. <...>

1. Основной опыт, который после некоторых неудач, зависевших от выбора гальванометра, совершенно убедительно удался 26 февраля [ст. ст.] 1888 г., состоял в следующем.

Два металлических диска («арматуры», «электроды») в 22 см были установлены вертикально и друг другу параллельно (рис. 113) перед электрическим фонарем Дюбоска, из которого вынуты все стекла. В фонаре имелась лампа с вольтовой дугой А (регулятор Фуко — Дюбоска), питаемая динамомашинной (обыкновенно около 70 В, 12 А). Один из дисков С, ближайший к фонарю, сделан из тонкой металлической сетки (встречаемой в продаже), латунной или железной, иногда гальванопластически покрытой другим металлом, которая была натянута в круглом кольце; другой диск — сплошной (металлическая пластинка).

Диски соединены между собой проволокой, в которую введены гальваническая батарея В и чувствительный астатический гальванометр Томсона G с большим сопротивлением (5212 Ом), который наблюдался по английской методе (с лампой и скалой). Чувствительность гальванометра без верхнего астазирующего магнита была такова, что одно деление соответствовало $6,7 \cdot 10^{-10}$ А; при астазирующем же магните наивысшая чувствительность, какой я пользовался (время качания около 17 с), давала 1 дел. $-2,7 \cdot 10^{-11}$ А. Батареи употреблялись различные (Вольты, Даниэля, Беетца, Гасснера, Л. Кларка) и с различным числом элементов (от 1 до 200); иногда, как увидим ниже, батарея исключалась.

Таким образом, мои два диска представляли род воздушного конденсатора, заряжаемого сравнительно невысокой электродви-

* Этот термин казался мне наиболее естественным для обозначения тех явлений, о которых идет речь; по моему почину он принят и некоторыми другими учеными, например Биша и Блондло, Боргманом и др..

жушей силой. Благодаря свойству передней, сетчатой, арматуры задняя арматура могла быть освещена лучами вольтовой дуги с внутренней стороны, т. е. с той, где преимущественно накапливается электрический заряд. Другая арматура (сетка) освещалась лишь с невыгодной (слабо заряженной) стороны прямыми лучами, с внутренней же стороны — лишь отраженными от сплошного диска. Такая комбинация казалась мне наиболее удобной, чтобы обнаружить разряжающее действие лучей, что и оправдалось вполне. Размеры дисков были рассчитаны так, чтобы при расстоянии их от вольтовой дуги около 20 см (т. е. довольно малом, но не дающем еще слишком быстрого и большого нагревания) арматуры освещались на всем протяжении лучами, выходящими из отверстия фонаря (10 см диаметра).

Этот «сетчатый конденсатор» составляет главную и существенную принадлежность почти всех моих опытов. Уже в течение работы я узнал, что г-н Риги употребляет такое же приспособление для опытов, аналогичных с моими, но произвольных при помощи *электрометра*; думаю, что при моей (гальванометрической) методе оно имеет более существенное значение.

Я назвал пару дисков *конденсатором*. Мы можем, с другой стороны, назвать их парой *электродов*, погруженных в воздух, который при известных условиях освещения должен был обнаружить действительную или кажущуюся электропроводность — пропускать электрический ток, как бы замыкая собой «цепь» (разорванную этим воздушным слоем, пока нет действия лучей). В последующем я называю диски то арматурами, то электродами.

Уже предварительные опыты с другим гальванометром, старой системы (Дюбуа — Реймона), убедили меня, что не только батарея в 100 элементов ($Zn|Ag|Cu$), но и гораздо меньшая дает во время освещения дисков несомненный ток в гальванометре, если только цельный (задний) диск соединен с ее отрицательным полюсом, а сетчатый (передний) — с положительным. Слово *ток* употребляю в самом общем смысле, не решая пока, какого рода процесс здесь происходит — кондуктивный, электролитический или конвективный. С гальванометром Томсона явление стало еще ярче и могло быть прослежено даже при электродвижущих силах, составляющих небольшую долю 1 В — (до $1/20$ и даже до $1/100$). Как увидим ниже, малые электродвижущие силы дают даже при сближенных электродах сравнительно более сильный ток; другими словами, кажущееся сопротивление освещенного конденсатора с тонким воздушным слоем становится тем меньше, чем меньше разность потенциалов двух арматур (впоследствии я подробнее формулирую это замечание).

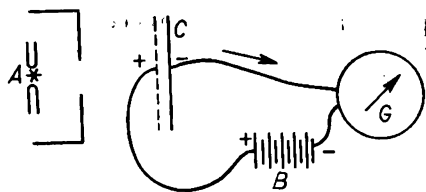


Рис. 113

Со сравнительно высокими потенциалами (100—200 элементов) ток был замечен даже при расстоянии между арматурами свыше 10 см.

Если задний (изнутри освещаемый) диск конденсатора служит отрицательным полюсом батареи, а передний (сетка) — положительным, в цепи идет электрический ток всякий раз, когда лучи вольтовой дуги беспрепятственно падают на арматуру.

2. Если переместить полюсы батареи, т. е. сделать цельный диск положительным, а сетчатый — отрицательным, то обыкновенно получается некоторый ток (в обратную сторону); но он сравнительно слаб, величина его зависит от свойства *сетки* и при известной подготовке сетки может быть уменьшена до нуля. Очевидно, что и здесь играет роль исключительно освещение *отрицательного* электрода — освещение *невыгодное* (прямые лучи падают лишь на наружную поверхность сетки, внутренняя освещена отраженными от цельного диска лучами), но все-таки существующее. Если сетка только что вытравлена азотной кислотой и совершенно суха, этот обратный ток еще довольно значителен; если сетка окислена, загрязнена, покрыта лаком — он становится ничтожным; если сетка после очистки кислотой погружена была в воду, так что вся ее поверхность влажна и петли застланы водяной пленкой, обратный ток пропадает совершенно, хотя *прямой* ток (при сплошном диске отрицательном и сетке положительной) несколько не изменился после такой обработки сетки. Объяснение этих последних фактов откроется из последующего.

Ввиду всего этого я с самого начала моих исследований категорически настаивал* на совершенной униполярности актиноэлектрического действия, т. е. на нечувствительности положительных зарядов к лучам. <...>

Уже прежние наблюдатели заметили** громадное влияние *чистки* на чувствительность металлической поверхности; то же, всегда без исключения, получалось и у меня. Для чистки я употреблял обыкновенно «венскую известь». Даже мало окисляющиеся металлы, например Ni, Ag, Pt, недавно (например, накануне) очищенные и на взгляд сохранившиеся в полной чистоте, становятся в $1\frac{1}{2}$, в 2 раза чувствительнее тотчас после новой чистки; эта пропорция становится еще больше для залежавшихся поверхностей, для легко окисляющихся металлов (Zn): в этих условиях чувствительность может упасть весьма низко с течением времени. По-видимому, тончайший слой окиси (или же слой адсорбированного газа?) играет роль более или менее прозрачного (для активных лучей) вещества, вроде влаги, растворов солей и т. п. С другой стороны, латунный круг, будучи покрыт черной окисью меди, выиграл в чувствительности***. По-

* В первой и второй заметках.

** Hallwachs. Wied. Ann., XXXIII, 30.

*** В новой своей статье (Wied. Ann, XXXVII; 666) Гальвакс рекомендует вместо чистки прокалывание и замечает, что образующийся при этом слой окиси не мешает чувствительности. Я не делал таких опытов.

крытие копотью может усилить чувствительность старой, давно нечищенной металлической поверхности, но далеко не в той мере, как чистка (венской известью). О большой чувствительности анилиновых красок (и в сухом виде) я уже сказал выше.

Нужно заметить, что свежая чистка, всегда усиливая чувствительность металла, вместе с тем придает ей менее стойкий характер; только что вычищенный круг быстрее *утомляется*, особенно под действием лучей, т. е. быстрее теряет чувствительность. Поэтому при опытах, требующих постоянства эффекта в течение некоторого времени, я предпочитаю не употреблять только что очищенного диска, а делать чистку за несколько часов, еще лучше накануне. <...>

6. Единственным источником лучей, пригодным для моих опытов, могла служить *вольтова дуга*, и с помощью ее проведены все мои исследования. Другие источники (пламя бунзеновой горелки, горящий магний, индуктивная искра) давали действие, но весьма слабое, солнечный же свет — никакого. <...>

8. Пропорциональность актиноэлектрических действий в двух совершенно различных и различно заряженных конденсаторах имеет и другое важное значение. Чтобы объяснить себе эту пропорциональность, необходимо допустить, что при равных прочих условиях *действие* (сила тока) *пропорционально напряженности освещения* или, лучше сказать, количеству активных лучей.

Чтобы проверить этот вывод другим путем, я употреблял способ прерывистого освещения. Большой картонный круг с семью окошками по секторам (причем окошки и промежутки все одинаковой ширины) помещался вертикально между фонарем и конденсатором и приводился во вращение с различными скоростями, начиная от весьма медленной (1 оборот в 1 с, причем гальванометр показывал еще постоянное отклонение) до самой большой, какую удобно было получить (11 оборотов в 1 с). Попеременно делались наблюдения актиноэлектрического тока — при покое (постоянном освещении) и при вращении с определенной скоростью; оказалось, что в последнем случае ток весьма точно равен половине полного. Так, в одном ряде наблюдений с возрастанием скорости получились отношения 0,501, 0,493, 0,503, в другом — 0,511, 0,498, 0,501. (Большого согласия нельзя и ожидать, тем более что особого контрольного аппарата не было, а просто чередовались наблюдения при покое и при вращении.) Значит, действительно эффект пропорционален энергии активных лучей.

Этот опыт с прерывистым действием доказывает еще и нечто: доказывает, что лучи производят свое полное действие даже в том случае, когда падают на диск в течение малой доли секунды (около $1/150$ с при моей наибольшей скорости вращения). Но такой опыт не решает еще вопроса о том, состоит ли это действие из ряда отдельных электрических толчков, современных с освещением и разделенных промежутками электрического покоя, или

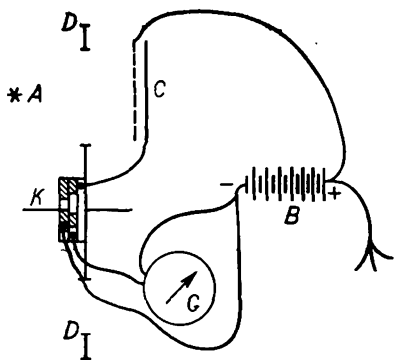


Рис. 114

же происходит более или менее непрерывный, быть может, даже постоянный ток, сила которого соответствует средней силе освещения. (...)

Нижеследующая придуманная мной метода представила немало затруднений, но в конце концов приводит, полагаю, к тому выводу, что время, в течение которого актиноэлектрический ток достигает своей окончательной величины, весьма ничтожно, другими словами, действие лучей можно считать, практически говоря, мгновенным.

На оси картонного круга DD с восемью вырезами по секторам, подобного вышеупомянутому, был насажен особый прерыватель или коммутатор K [рис. 114]. Он состоял из эбонитового кружка с восемью металлическими, никелированными накладками по окружности, к которым прилепали металлические, тоже никелированные кисточки; две из них соединены с отрицательным полюсом батареи, притом одна через гальванометр, другая — особой проволокой, и так, что когда одна кисточка лежит на металле, другая прикасается к эбонитовому промежутку; третья кисточка постоянно упиралась в металл прерывателя и соединялась с диском, а положительный полюс батареи — с сеткой конденсатора C (и с землей). Таким образом, при вращении картона с прерывателем актиноэлектрическая цепь замыкается попеременно то через гальванометр, то мимо него.

При вращении картона диски конденсатора C претерпевают по очереди различные фазы освещения, которые будем обозначать терминами астрономии. Картон и конденсатор стояли в таких расстояниях от лампы, что *полное затмение* последнего продолжалось одно мгновение; в этот момент тень непрозрачного сектора своими боковыми границами (радиусами) как раз касалась окружности отрицательного диска; мгновенно же совершалось и полное освещение (*полнолуние*). Благодаря коммутатору, вращающемуся вместе с картоном, гальванометр собирает только часть актиноэлектрических токов (другая часть проходит через побочное сопротивление); но эта часть уже не половина полного тока (т. е. того, какой соответствовал бы непрерывному полнолунию), а меньше $1/2$, и притом различна, смотря по тому, в какие фазы совершается коммутация.

Допустим, что коммутатор установлен на оси вращения таким образом, что включение гальванометра в цепь происходит в момент *первой четверти* [рис. 115, *a*], выключение — в момент *последней четверти* [рис. 115, *c*]. (Подобное сопротивление выключается непосредственно перед включением гальванометра

и включается вслед за выключением последнего.) Гальванометр будет давать ток, соответствующий сумме разрядов, совершающихся в промежутке времени от первой до последней четверти [рис. 115, б]; этот ток, как показывает вычисление,

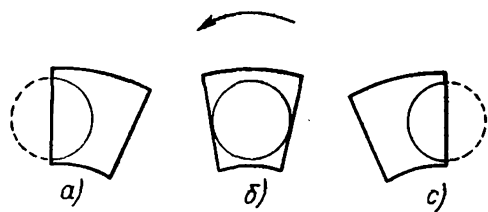


Рис. 115

равен 0,394 полного тока (maximum). На опыте естественно ожидать несколько большего числа вследствие того, что разряженный диск остается (хотя краткое время) изолированным и в это время несколько изменяет свой потенциал, который затем пополняется. Сдвинув коммутатор настолько, чтобы моменты коммутации совпадали с моментами полнолуния и новолуния, теоретически получим 0,250 полного тока. Сдвинув его еще так, чтобы включение гальванометра совершалось в момент последней четверти, получим 0,106 (minimum).

Но этот расчет должен оправдываться лишь в том случае, если сила тока в каждый момент в точности соответствует наличию освещению; если это не так, теоретические числа получатся на опыте лишь при достаточно медленном вращении, а при возрастающих скоростях должны постепенно меняться в указанных пределах (между 0,106 и 0,394). Пусть, например, коммутатор установлен на maximum (0,394); если ток *опаздывает* и в каждый момент сила его соответствует не современной фазе освещения, а несколько более ранней, мы получим в гальванометре менее чем 0,394 полного тока; с увеличением скорости вращения пропорция будет понижаться до 0,106, потом опять возрастает и т. д. Запаздывание тока отзовется на наблюдениях так же, как отозвалось бы постепенное поворачивание коммутатора на оси — из наиболее *выгодного* (максимального) расположения в менее и менее выгодное и т. д. Если, например, при всех доступных скоростях пропорция тока в гальванометре останется одна и та же, это будет значить, что запаздывание тока незаметно, что он, говоря практически, устанавливается мгновенно и в каждый момент соответствует существующей силе освещения. (...)

13. Итак, окончательный результат этих измерительных попыток представляется в следующем виде.

Электрический ток, который является между арматурами конденсатора вследствие действия лучей на отрицательную арматуру, или же ток из батареи к арматурам, восстанавливающий между ними разность потенциалов, которую стремится понизить освещение, определяется *плотностью* заряда на поверхностях арматур; другими словами, величиной *электрической силы* при этих поверхностях. С возрастанием плотности σ ток i сперва растет быстрее, чем σ , потом все медленнее, стремясь, так сказать, к не-

которому насыщению (которое однако же никогда при опытах не достигалось вполне). <...>

15. Во всем предыдущем изложении мы принимали, что электродвижущая сила, или разность потенциалов между арматурами конденсатора, определяется исключительно той батареей, которая его заряжает. Из того факта, что ток является даже при $1/100$ В и что, очевидно, только нечувствительность гальванометра мешает усмотреть его при еще меньших E , следует заключить, что никакой заметной поляризации в нашем снаряде не происходит, что его электроды (если обозначить их этим именем) суть электроды неполяризующиеся. С другой стороны, мы видели (14), что действие лучей не убавляет заметным образом разности потенциалов арматур, которая остается равной E .

Но разность потенциалов в воздушном конденсаторе в точности определяется электродвижущей силой заряжающей батареи лишь при том условии, чтобы ее арматуры были из одинакового металла; иначе эта разность была бы равна $E \pm M/M'$, где M/M' — электрическая разность двух металлов. <...>

17. Не касаясь в этой статье опытов, произведенных мной пока еще в предварительном виде, над актиноэлектрическими разрядами в различных газах и парах и под различными давлениями, постараюсь вкратце сопоставить результаты, найденные для воздуха при обыкновенном давлении.

1. Лучи вольтовой дуги, падая на поверхность отрицательно заряженного тела, уносят с него заряд. Смотря по тому, пополняется ли заряд и насколько быстро, это удаление заряда может сопровождаться заметным падением потенциала или нет.

2. Это действие лучей есть строго униполярное; положительный заряд лучами не уносится.

3. По всей вероятности, кажущееся заряджение нейтральных тел лучами объясняется той же причиной.

4. Разряжающим действием обладают, если не исключительно, то с громадным превосходством перед прочими, лучи самой высокой преломляемости, недостающие в солнечном спектре ($\lambda < 295 \cdot 10^{-6}$ мм). Чем спектр обильнее такими лучами, тем сильнее действие.

5. Для разряда лучами необходимо, чтобы лучи поглощались поверхностью тела. Чем больше поглощение активных лучей, тем поверхность чувствительнее к их разряжающему действию.

6. Такой чувствительностью, без значительных различий, обладают все металлы, но особенно высока она у некоторых красящих веществ (анилиновых красок). Вода, хорошо пропускающая активные лучи, лишена чувствительности.

7. Разряжающее действие лучей обнаруживается даже при весьма кратковременном освещении, причем между моментом освещения и моментом соответственного разряда не протекает заметного времени.

8. Разряжающее действие, *ceteris paribus*¹, пропорционально энергии активных лучей, падающих на разряженную поверхность.

9. Действие обнаруживается даже при ничтожных отрицательных плотностях заряда; причина его зависит от этой плотности; с возрастанием плотности до некоторого предела оно растет быстрее, чем плотность, а потом медленнее и медленнее.

10. Две пластинки разнородных в ряду Вольты металлов, помещенные в воздухе, представляют род гальванического элемента, как скоро электроотрицательная пластинка освещена активными лучами.

11. Каков бы ни был механизм актиноэлектрического разряда, мы вправе рассматривать его как некоторый ток электричества, причем воздух (сам ли по себе или благодаря присутствию в нем посторонних частиц) играет роль дурного проводника. Кажущееся сопротивление этому току не подчиняется закону Ома, но в определенных условиях имеет определенную величину.

12. Актиноэлектрическое действие усиливается с повышением температуры. <...>

Комментарий

Отрывки из работы «Актиноэлектрические исследования» публикуются по изданию: Столетов А. Г. Собрание сочинений, т. I. М. — Л., 1939.

¹ При прочих равных условиях (лат.).

Литература

- [1] Столетов А. Г. Собрание сочинений. В 3 т. М. — Л., 1939—1947.
[2] Соминский М. С. Александр Григорьевич Столетов. Л., 1970.
[3] Тепляков Г. М., Кудрявцев П. С. А. Г. Столетов М., 1966.

Голин Г. М., Филонович С. Р.

Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX в.): Справ. пособие. — М.: Высш. шк., 1989. — 576 с.: ил. ISBN 5-06-000058-3