

## ЭЛЕКТРОН И СВЕТОВОЙ КВАНТ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ <sup>1)</sup>.

*Р. А. Милликэн.*

Тот факт, что естествознание движется вперед на двух ногах — теории и эксперименте, — лучше всего можно иллюстрировать на примере двух областей, в разработке которых я принимал известное участие, за что вы почтили меня присуждением Нобелевской премии.

Иной раз то одна, то другая нога выдвигается вперед; но длительный прогресс возможен только тогда, когда обе они в ходу: путем ли установления теории и последующей проверки ее, или путем открытия новых экспериментальных соотношений и подтягивания затем теоретической ноги, которая при этом отстает, и так далее до бесконечности.

Ваш протокол гласит, что премия присуждается „за работы по элементарному количеству электричества и фотоэлектричеству“. В обеих этих областях моя работа была работой чистого экспериментатора, чья благороднейшая задача состоит в постановке возможно безупречных *experimenta crucis* для того, чтобы проверить правильность теорий, выставленных другими исследователями.

Допущение электрических частиц или атомов имеет уже 170-летний возраст и принадлежит Вениамину Франклину, который в 1750 году писал: „Электрическая материя состоит из чрезвычайно тонких частиц, так как она может проникать сквозь обычную материю, даже наиболее плотную, с такой легкостью, что последняя не оказывает заметного сопротивления“.

Эти теоретические представления были развиты в отдельных частях Вильгельмом Вебером <sup>2)</sup> в работах 1871 года. Числовая величина элементарной электрической единицы была в известных пределах оценена Джонстоном Стонеем <sup>3)</sup> в 1881 году, а в 1891 году этот физик дал элементарному количеству электричества название „электрон“.

<sup>1)</sup> Нобелевская речь. *Zeitschr. für physikalische Chemie*, 116, p. 65, 1925.

<sup>2)</sup> *Werke*, IV, p. 281.

<sup>3)</sup> *Phil. Mag.*, 11, 384, 1881.

В 1897 году выдвинулась вперед экспериментальная нога: Дж. Дж. Томсон и Зееман нашли так называемый удельный заряд двумя совершенно различными методами. Эти и аналогичные опыты в течение немногих лет доставили теории электронов почти всеобщее признание среди физиков.

Несмотря на это, еще в течение по крайней мере двух десятилетий даже среди людей науки существовали скептики, которые держались того мнения, что кажущийся единообразный характер электричества есть лишь статистическое явление. Что же касается образованных неспециалистов, то среди них еще и ныне распространено большое заблуждение относительно значения наших исчерпывающих доказательств существования электрона. Один выдающийся литератор говорил недавно об электро-не как о „последней естественно-исторической гипотезе, которая, в свою очередь, уступит место абракадабре завтрашнего дня“.

Поэтому, быть может, будет целесообразно попытаться сегодня осветить в главнейших штрихах, насколько возможно точно, современное экспериментальное положение вопроса и сделать попытку провести резкое разграничение между теорией и некоторыми вновь установленными фактами.

В качестве наиболее прямого и однозначного доказательства существования электрона, повидимому, общепринято рассматривать один опыт, который я, удобства ради, буду называть опытом с масляными капельками. Но прежде чем я перейду к обсуждению значения этого успеха, я попрошу вас выслушать ответ экспериментатора на основной и часто предлагающийся вопрос: что такое электричество? Ответ этот наивен, но вместе с тем прост и определен. Экспериментатор констатирует прежде всего, что о последней сущности электричества он не знает ничего.

Он обращается затем к некоторым простым и известным опытам и дает некоторые определения, которые представляют собою лишь описания опытов, и потому не заключают в себе ничего гипотетического.

Прежде всего он отмечает тот факт, что бузинный шарик или кусочек бумаги после прикосновения стеклянной палочки, предварительно натертой шелком, приобретает новые и поразительные свойства. Шарик или кусочек бумаги, с значительной и легко измеримой силой удаляются от палочки. Экспериментатор описывает этот факт и одновременно прибавляет, что ничего, кроме существования этой силы, он больше не знает; это описание он выполняет таким образом, что вводит новое слово и говорит, что шарик приведен в состояние положительной электризации, или проще, что шарик получает положительный электрический заряд. Затем он определяет размеры этого заряда по величине наблюдаемой силы.

Подобным же образом экспериментатор находит, что другой шарик, после соприкосновения с эбонитовой палочкой, предварительно натертой кошачьим мехом, притягивается первым шариком, и описывает этот опыт, говоря, что последний шарик получил заряд отрицательного электричества. Если теперь удастся обнаружить, что бузинный шарик после соприкосновения с каким-либо телом или каким-либо иным путем приводится в такое состояние, в результате которого он обнаруживает описанные свойства, то он по определению приобретает заряд положительного или отрицательного электричества. Все наше мышление об электричестве исходит от этих простых опытов и этих двух определений.

Для того, чтобы иметь возможность вывести совершенно однозначное заключение о правильности или неправильности гипотезы Франклина, ясно было, что нужно: 1) уменьшить заряд на бузинном шарике до наименьшей возможной величины, 2) изменять этот заряд наивозможно малыми ступенями и 3) убедиться в том, что силы, которые действуют на шарик на известном расстоянии от стеклянной палочки (т.-е. в постоянном поле), обнаруживают какую-либо тенденцию увеличиваться или уменьшаться равномерными ступенями.

Успех опыта, который впервые был поставлен в 1909 году, зависел исключительно от схемы аппарата, т.-е. от взаимного соотношения его частей.

Самый шарик, который должен был получать наименьший возможный заряд, естественно, должен был быть мельчайшим шарообразным тельцем, масса которого при этом должна была оставаться постоянной; ибо непрерывно изменяющаяся гравитационная сила по своему действию на движение заряженного тела была бы неотличима от непрерывно изменяющегося электрического заряда.

Равным образом нельзя было пользоваться неоднородным или нешарообразным телом, ибо сила, действующая на шарик, должна была измеряться по скорости, которую она ему сообщала, а эту силу можно вычислить по скорости только тогда, когда поверхность шарообразна, а плотность абсолютно постоянна. Поэтому взамен бузинных шариков была взята одна масляная капелька, диаметром приблизительно в 0,001 мм, которая получалась в обыкновенном пульверизаторе и помещалась в атмосфере, совершенно освобожденной от конвекционных потоков соответствующими термостатическими приспособлениями. Стеклянная палочка, которая создавала постоянное электрическое поле, была, разумеется, заменена пластинками *C* и *D* воздушного конденсатора (рис. 1); одна пластинка была соединена с положительным, другая с отрицательным полюсом батареи через переключатель так, чтобы можно было, по желанию, включать или выключать поле.

Для того, чтобы можно было очень точно измерять силу, действующую на масляную капельку, необходимо было иметь возможность

измерять скорость на пути приблизительно в 1 см. Это одно из важнейших требований, предъявляемых к аппаратуре; недооценка его внесла ошибку в измерения некоторых позднейших наблюдателей. Этот путь в 1 см и постоянство поля определяли приблизительные размеры пластинок, диаметр которых в действительности равнялся 22 см при расстоянии между ними в 16 мм.

Равным образом и напряжение поля — приблизительно 6 000 вольт на см — было существенно и оно представляло собою требование, которое было ново для работ подобного рода. Это напряжение поля представляло собой фактор, который превращал возможный промах

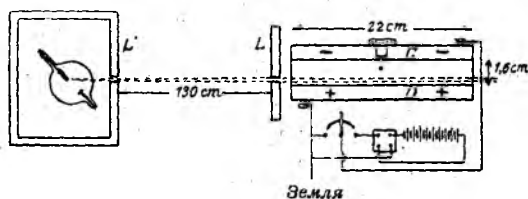


Рис. I Распыленная масляная капля продувается над пластинкой *C*. Она падает через отверстие в *C* в пространство между *C* и *D*, где она движется вверх или вниз, вследствие того, что электрическое поле между *C* и *D* включается или выключается. Ее заряд можно изменять, ионизируя воздух рентгеновскими лучами, которые проходят через свинцовые диафрагмы *L'* и *L*.

в успех. На самом деле природа оказалась здесь чрезвычайно любезной, ибо она предоставила известную, хотя и узкую область напряжений поля, внутри которой были возможны подобные опыты. Капли должны быть настолько велики, чтобы так называемым броуновским движением можно было почти пренебречь; они должны быть круглы и однородны, они должны быть легкими и не должны испаряться; расстояние должно быть достаточно велико, чтобы можно было точно определять промежутки времени при движении капель, а электрическое поле должно быть настолько сильным, чтобы преодолевать силу тяжести, когда капля, заряженная одним или двумя электронами, под влиянием поля, перемещается вверх. Едва ли какое-либо другое сочетание размеров, напряжений поля и природы материалов, могло бы дать полученные результаты. Если бы заряд электрона составлял 0,1 своей действительной величины, или так называемый искровой потенциал в воздухе составлял только 0,1 истинного, то сообщаемые здесь экспериментальные факты никогда нельзя было установить.

Наблюдения, которые дали недвусмысленный ответ на вопрос об атомистической структуре электричества, происходили следующим образом. Капля заряжалась большей частью вследствие трения, связанного с распылением. Заряженная капля медленно падала через маленькое отверстие в середине пластинки *C* в пространство между *C* и *D*. Затем измерялась скорость ее падения под действием силы тяжести при выключенном электрическом поле и скорость ее поднятия против силы тяжести при включенном электрическом поле, и измерения повторялись после того как заряд капельки изменялся несколькими различными приемами. Это изменение заряда достигалось, например,

в успех. На самом деле природа оказалась здесь чрезвычайно любезной, ибо она предоставила известную, хотя и узкую область напряжений поля, внутри которой были возможны подобные опыты. Капли должны быть настолько велики, чтобы так называемым броуновским движением можно было почти пренебречь; они должны быть круглы и одно-

путем ионизации воздуха непосредственно под каплей  $\alpha$ -,  $\beta$ - или  $\gamma$ -лучами радия, освещением самой капли ультрафиолетовым светом, освещением рентгеновыми лучами либо самой капли, либо воздуха под ней и т. д. Общеизвестные ныне результаты этого изменения зарядов сопоставлены в нижеследующей таблице:

Время падения на 1,303 см в поле силы тяжести в сек.	Время подъема на 1,303 см в электрическом поле в сек.	Среднее время подъема в электрическом поле в сек.	Делители скорости в электрическом поле.	Электрон, выраженный через скорость.
120.8	26.2			
121.0	11.9			
121.2	16.5			
121.1	16.3	67.73	1	3.007
120.2	26.4	26.40	2	3.009
119.8	67.4	16.50	3	2.993
120.1	26.6	11.90	4	3.008
—	16.6			
120.2	16.6			
—	16.4			
120.2	68.8			
119.9	26.4			
Средняя скорость падения в поле силы тяжести 120.35				

1. Можно было совершенно разрядить капельку, так что в пределах ошибок наблюдения — малых долей процента — один сантиметр в поле силы тяжести, при включенной между  $C$  и  $D$  разности потенциалов в 10 000 вольт, капелька проходила в то же самое время, что и без поля.

2. Ей могла быть сообщена определенная скорость в электрическом поле (в нашем специальном случае 67,7 секунд), которая, по желанию, могла быть воспроизведена и которая была наименьшей скоростью, сообщаемой данным полем капле. Это изменение скорости, которое было обусловлено захватыванием одного электрона, вовсе не было маленьким, так, чтобы его трудно было наблюдать и измерять. Напротив, оно часто было больше, нежели скорость, которую сообщала сила тяжести, и было связано, как в приведенном случае, с изменением направления, так что оно было совершенно неоспоримым.

3. Скорости, большие в два, три, четыре, пять и т. д. раз (всегда в пределах ошибок наблюдения — не свыше одного процента) могли

быть сообщены капельке, но скорости, равные дробным долям наименьшей, не встречались никогда.

Кто видел этот опыт, — а сотни исследователей его наблюдали, — тот в буквальном смысле этого слова видел электрон. Ибо он измерял (через посредство скорости) наименьшую электрическую силу, которую данное электрическое поле вообще может оказывать на бузинный шарик, — тот самый шарик, по движению которого он определял самое электричество. Далее, он нашел, что то нечто, которое он условился назвать электричеством, может быть сообщено его шарiku или удалено с этого шарика лишь в таких количествах, что эта движущая сила либо падает до нуля, либо увеличивается на определенные целые кратные наименьшей наблюдаемой силы.

Если бы кто-либо увидел футбольный мяч, о котором другой ему бы сказал, что это и есть электрон, то он был бы гораздо менее уверен в том, что это соответствует действительности, нежели если бы он познакомился с описанным опытом. С помощью этого опыта наблюдатель может — как это показывает таблица — считать число электронов данного малого заряда с совершенно такой же уверенностью, с какой он считает свои пальцы. Следует добавить, что когда он насчитает в своем заряде до 200 электронов, ошибки наблюдения не позволят ему различить между 200 и 201; так что заключение, что большие электрические заряды построены так же, как заряды, которые он может считать, представляет собою, разумеется, обобщение, которое очевидно, вполне правдоподобно.

Но самый электрон, который наблюдатель измерил, как это показывает случай приведенный в таблице, не представляет собою чего-либо сомнительного или гипотетического. Это есть новый экспериментальный факт, который наше поколение впервые увидело, но который отныне может видеть всякий, кто желает.

Измерение электрона в абсолютных электростатических единицах, а не через скорость, как это дано выше, включает наблюдения описанного характера на тысячах капелек различной величины, из различных веществ, окруженных различными газами, при давлениях, варьиравших в широких пределах от атмосферного давления до 1,5 мм ртутного столба.

Это измерение потребовало ряда лет для того, чтобы найти точное значение внутреннего трения газа и чтобы установить, как должен быть модифицирован закон Стокса для того, чтобы представлять собою закон падения частицы через газ при любом давлении. Все это интересует нас здесь потому, что отсюда видно, как все без исключения наблюдения во всех газах и со всеми веществами приводят к одной и той же абсолютной величине электрона, которая является точкой

пересечения всех прямых на оси  $e^2$  нашего рис. 2<sup>1)</sup>. Эта точка пересечения показывает прямо числовую величину электрона:

$$e = 4,774 (\pm 0,005) \times 10^{-10} \text{ CGSE}$$

После десятилетней работы других лабораторий, в которых проверены методы и результаты, полученные в связи с изучением масляных капелек, в настоящее время достигнуто практически общее согласие относительно их правильности, несмотря на то, что эти методы и результаты предварительно были прогнаны сквозь строй жесткой критики.

Таким образом электроны как положительные, так и отрицательные представляют собою лишь наблюдаемые электрические силовые центры, подобно заряженным бузинным шарикам, изучение которых дало наше первоначальное определение

электрического заряда, с той разницей, что электроны по своему заряду неизменны, в то время как заряды бузинных шариков изменяются, так как эти заряды состоят из различного числа электронов. Далее, Роуланд уже давно показал, что электрические токи

представляют собою просто электрические заряды в движении. Поэтому доказательство того, что электрические заряды состоят из определенного числа дискретных электрических частиц, электронов, включает в себе также доказательство и того, что электрические токи представляют собою не что иное, как потоки огромного количества электронов, несущиеся в проводнике.

О размерах электронов мы, собственно говоря, ничего не знаем, так что для практических целей электроны того и другого знака можно рассматривать как точечные заряды, хотя хорошо известно, что положительный электрон имеет массу в 1,845 раз бóльшую, нежели отрицательный. Почему это так,—никто не знает. Это есть дальнейший экспериментальный факт.

Хорошо известно, что мы теперь можем точно подсчитать число положительных и отрицательных электронов в каждом атоме; что все положительные электроны мы представляем себе находящимися в ядре; что отрицательные электроны мы частью распределяем во внешних

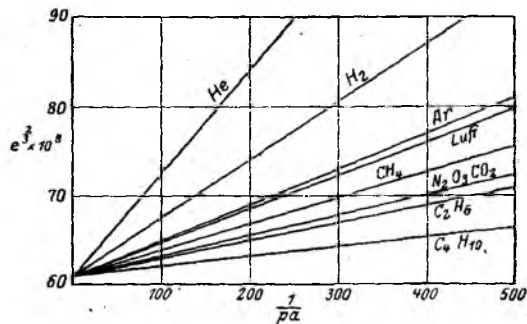


Рис. 2. Все эти прямые сходятся в одной и той же точке пересечения на вертикальной оси, давая тем самым превосходное доказательство того, что в построении всех атомов принимает участие один и тот же электрон.

<sup>1)</sup> Заимствована из работы моего ассистента Ишида (Yoshio Ishida), повторявшего мои наблюдения в различных газах. Аналогичные наблюдения на капельках из различных веществ см. мою книгу: „The Electron“ 2 Ed. Chicago. 1924.

частях, частью находим связанными в ядре; что число внешних отрицательных электронов изменяется равномерными ступенями от единицы у водорода до 92 у урана, и что число отрицательных электронов в ядре определяется разностью между атомным весом и атомным номером.

Обнаружим ли мы когда-нибудь, что положительный или отрицательный электрон делим? Этого также никто не знает; но мы можем сделать некоторые заключения на основании истории химического атома. О нем иной раз необдуманно говорят, что он взорван; но, конечно, всякий естествоиспытатель знает, что атом не потерял ни иоты своей прежней реальности и своей прежней жизнеспособности. С экспериментальной точки зрения, атом химика полностью заключается в законах постоянных пропорций и кратных отношений. Для тех целей, для которых представление об атоме применялось первоначально, именно для понимания химических соединений, он и сейчас представляет собою ту самую последнюю единицу, какую он был и раньше.

Равным образом не представляется вероятным, чтобы в области, в которой электрон был найден в качестве единицы, именно в проблемах связанных со строением атома, когда-нибудь пришлось воспользоваться другой единицей. Новые факты, которые открыло наше поколение, представляют собою прочное наследство для потомков. Если электрон когда-нибудь будет подразделен, то это, вероятно, случится тогда, когда человечество с новыми средствами, которые так же непохожи на рентгеновские лучи и радиоактивность, как последние не сравнимы с обычными химическими силами,— когда человечество с этими новыми средствами откроет такую область, где электрон сможет быть разрушен. При этом, однако, он не потеряет своего характера структурной единицы, который он обнаруживает в тех соотношениях, в каких мы его исследовали донныне.

Вторая область, в которой я, согласно вашему протоколу, попытался сделать дальнейший шаг вперед и помочь экспериментальной ноге подтянуться вслед за теоретической, есть область эфирных волн. В этой области я пытался уже с 1904 года найти однозначное доказательство для представлений Томсона-Планка-Эйнштейна о локализованной лучистой энергии.

Это представление в своей наиболее общей форме было использовано в 1903 году Дж. Дж. Томсоном<sup>1)</sup> для объяснения двух вновь открытых экспериментальных фактов. А именно:

1. Что рентгеновские лучи проходят сквозь все атомы освещаемой ими части пространства, за исключением ничтожно малой части— приблизительно 1 на 1000 миллиардов, не отдавая при этом своей энергии; однако, то здесь, то там попадает атом, из которого они выбрасывают электрон с огромною скоростью.

<sup>1)</sup> Sillimans Lectures of Yale University, 1903.



2. Что ультрафиолетовый свет обладает открытой в 1902 году Лена́рдом<sup>1)</sup> изумительной способностью вырывать электроны из поверхности металла с энергией, которая остается одинаковой, независимо от того, велико или мало расстояние источника света, т.-е. независимо от интенсивности падающего света.

Это полукорпускулярное представление Томсона о локализованной лучистой энергии в 1905 году было принято Эйнштейном<sup>2)</sup>. Последний, исходя из этого представления и в связи с существованием квантов, открытых Планком в результате анализа излучения черного тела, получил уравнение, которое, по мнению Эйнштейна, должно управлять обменом энергии между эфирными волнами и электронами. Это уравнение гласит:

$$\frac{1}{2} m v^2 = h \nu - p.$$

Здесь левая сторона представляет собою энергию летящего электрона, первый член правой части — квант энергии Планка<sup>3)</sup> для света данной частоты, и последний член — работу, необходимую для удаления электрона из металла.

Все усилия первоначально были направлены на точное экспериментальное измерение энергии вылетающих электронов, то в функции температуры, то в функции длины волны, то в функции природы материала (роль контактного потенциала).

После десяти лет проб, изменений, изучения, а также и некоторых ошибок, работа 1914 года, вопреки моим собственным ожиданиям, дала первое прямое экспериментальное доказательство строгой справедливости уравнения Эйнштейна внутри тесных пределов ошибок наблюдения<sup>4)</sup>. Отсюда же получилось и первое фотоэлектрическое определение постоянной Планка  $h$ . Достигнутая точность была около 0,5% и в то время была наилучшей. Рис. 3 дает схему использованной аппаратуры. Рисунки 4 и 5 изображают результаты точнейшего исследования на определенном металле (натрий) и показывают полную однозначность результата. — И эта работа, подобно работе об электро́не, выдержала жестокую критику, ибо до 1916 года не только оживленно

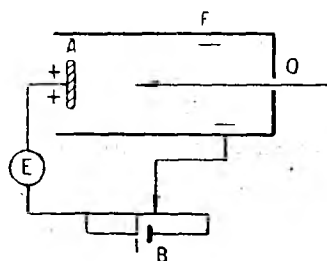


Рис. 3. Монохроматический свет падает через отверстие  $O$  на металл  $A$ , из которого вырывает электроны. Кинетическая энергия, с которой эти электроны покидают  $A$ , измеряется положительной разностью потенциалов, которую нужно наложить между  $A$  и  $F$  для того, чтобы ни один электрон не достиг  $F$ . Проходящий электронный ток отсчитывается по показаниям  $E$ .

<sup>1)</sup> Ann. d. Phys., 8, 149, 1902.

<sup>2)</sup> Ann. d. Phys., 17, 132, 1905; 20, 199, 1906.

<sup>3)</sup> Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 2, 202, 237, 1900.

<sup>4)</sup> Phys. Rev., 4, 73, 1914; 6, 55, 1916; 7, 362, 1916.

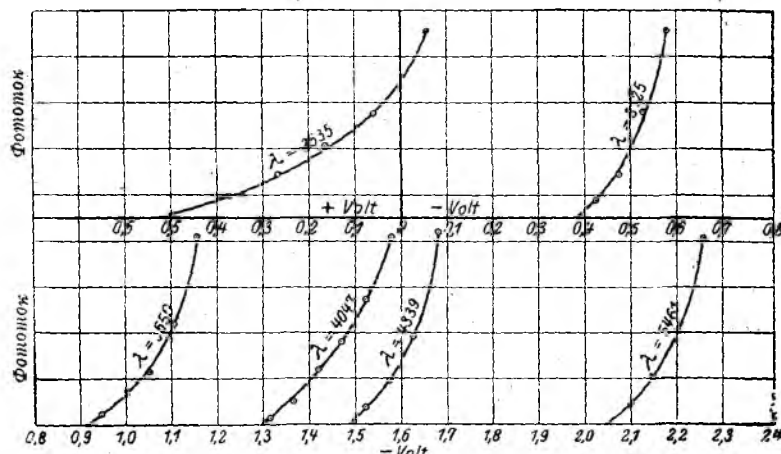


Рис. 4. Рисунок показывает, на сколько явно энергия фотоэлектронов, испускаемых  $\lambda$  (см. рис. 3), уменьшается в то время как длина волны возрастает пятью ступенями (или частота соответственно уменьшается). Эти ступени соответствуют спектральным линиям ртутного спектра от крайней ультрафиолетовой линии  $\lambda = 2535$  до яркой зеленой линии  $\lambda = 5461$ . Уменьшение энергии сказывается в том, что точки пересечения кривых фототока сдвигаются все дальше вправо. (Нижняя часть диаграммы представляет собою правый конец верхней части; они напечатаны друг под другом исключительно для удобства.)

обсуждался вопрос о том, существует ли вообще предельная скорость испускания, но и некоторые другие наблюдатели, которые допускали

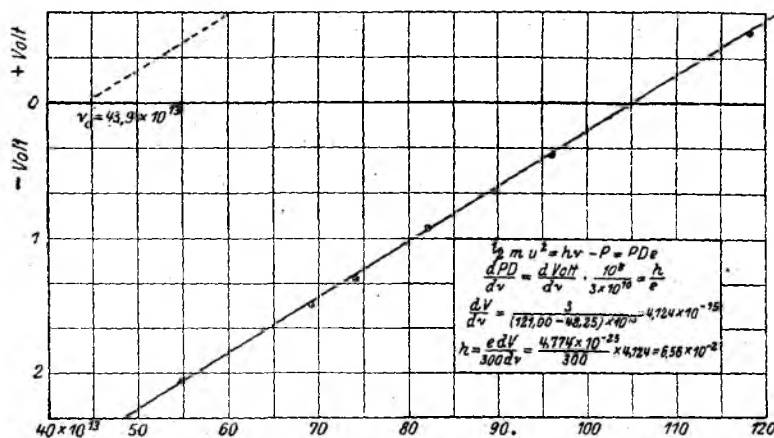


Рис. 5. Рисунок показывает не только то, что между энергией электрона (точки пересечения рис. 4) и действующей частотой света существует линейное соотношение, но в правом нижнем углу также показано, что числовая величина отношения равна  $6,56 \cdot 10^{-27}$ , что хорошо согласуется с другими определениями постоянной Планка  $h$ . Это было первое прямое определение этой основной константы.

что существует линейное соотношение между энергией и частотой, не находили универсальную постоянную  $h$  в качестве фактора. Однако сейчас не будет преувеличением сказать, что действительно исчер-

ывающее доказательство строгой справедливости уравнения Эйнштейна и его весьма широкой применимости, которое теперь уже получено в тесных пределах ошибок опыта, экспериментами многих наблюдателей, несколькими методами, в различнейших лабораториях,— что это доказательство, быть может, представляет собою самое выдающееся и самое изумительно завоевание экспериментальной физики последних десяти лет.

История этого замечательного успеха вкратце такова. Один или два года спустя после окончания вышеописанных фотоэлектрических исследований, Дьюэн<sup>1)</sup> и его сотрудники нашли однозначное доказательство соотношения, которое представляет собою обращение соотношения Эйнштейна. Они бомбардировали металлический диск электронами известной и постоянной энергии и нашли, что предельная частота возбуждаемых волн эфира (в большинстве случаев рентгеновские лучи) весьма точно определяется уравнением

$$\frac{1}{2} m v^2 = h\nu.$$

Д. Л. Вебстер<sup>2)</sup> показал затем, что характеристические рентгеновские частоты атома возбуждаются как раз при тех разностях потенциалов, при которых энергия электронного тока, бомбардирующего атомы, достигает величины, определяемой соотношением  $h\nu = \frac{1}{2} m v^2$ , где  $\nu$  теперь есть частота так называемого края абсорбционной полосы.

С другой стороны, де-Бройль<sup>3)</sup> во Франции и Эллис<sup>4)</sup> в Англии с большой точностью измеряли скорость электронов, вырываемых излучением высокой частоты из различных атомов и из различных энергетических уровней одного и того же атома, и подтвердили таким образом в этой области высоких частот строгую применимость того же уравнения Эйнштейна  $\frac{1}{2} m v^2 = h\nu - p$ , справедливость которого для ультрафиолетовых и видимых лучей нашел я.

Параллельно с этим развитием шла обширная разработка области так называемых ионизационных и резонансных потенциалов. И здесь также было использовано и подтверждено то соотношение между частотой и энергией электрона, которое утверждается уравнением Эйнштейна и обращение которого составляет краеугольный камень теории спектральных линий Бора. Все эти работы об ионизационных

<sup>1)</sup> Phys. Rev., 6, 66, 1915; Proc. Nat. Acad., 2, 90, 1916; Phys. Rev., 7, p. 1916; 9, 568, 1917; 10, 642, 1917.

<sup>2)</sup> Proc. Nat. Acad. 3, 181, 1917; 6, 26, 39, 1920.

<sup>3)</sup> Доклад на 3-м конгрессе Сольвэя.

<sup>4)</sup> Proc. Roy. Soc. 99, 261, 1921.

потенциалах ведут начало от основных опытов Франка и Герца <sup>1)</sup>, однако, с 1916 г. эта область исследуется весьма ревностно также и в Америке, в особенности Футом и Молером, Вудом, Дэвисом и Гаучером (Davis and Goucher), Мак-Леннаном и другими <sup>2)</sup>.

Я полагаю, что в виду всех этих методов и исследований общая справедливость уравнения Эйнштейна теперь повсюду подтверждена и потому реальность световых квантов Эйнштейна можно считать экспериментально подтвержденной. Уже это вместе с теми следствиями, которые отсюда вытекают; представляет собою успех исключительной важности. Он сообщает нынешней физике величайшую привлекательность. Факты теории относительности по сравнению с этим представляются маловажными. Из каких бы представлений ни было получено фотоэлектрическое уравнение Эйнштейна, тот факт, что эфирные волны могут поглощаться электронами в атомах и что эти электроны выбрасываются с начальной энергией  $h\nu$  ( $\nu$  — частота падающих эфирных волн), и обратный факт, что когда электроны известной энергии  $\frac{1}{2}mv^2$  обстреливают атомы, они возбуждают эфирные волны, частота которых может быть как раз вычислена из рассмотренного соотношения, — эти факты представляют собою новое экспериментальное открытие того же значения для физики, как и открытие атомистической структуры самого электричества. Если определить световой квант, как последнее передаваемое и в этом смысле единичное количество энергии  $h\nu$ , то существование светового кванта есть доказанный экспериментальный факт. Однако представление о пространственно ограниченном световом кванте, исходя из которого Эйнштейн получил свое уравнение, еще долго не могло считаться доказанным, так как до сих пор нельзя было согласовать его с многочисленными хорошо подтвержденными явлениями интерференции. Кроется ли механизм взаимодействия между эфирными волнами и электронами в неизвестных состояниях и законах внутри атома или его следует искать в корпускулярных по существу воззрениях Томсона-Планка-Эйнштейна, это — одна из волнующих неразрешенных проблем современной физики.

В 1921 г. я сделал еще один шаг по направлению к решению этой проблемы <sup>3)</sup>, показавши, что при фотоэлектрическом процессе световая энергия  $h\nu$  воспринимается не только атомными электронами, но также и свободными электронами (т.-е. электронами проводимости) металла. Тем самым механизм поглощения повидимому, целиком, удалялся из атома, а способность сообщать свободным или связанным электронам энергию  $h\nu$  следовало приписать свойству самого света.

<sup>1)</sup> Verh. d. D. Phys. Ges. 15 и 16; 1914.

<sup>2)</sup> Report Photoelectric. Con. National Research Council 1921; также Foot and Mohler. The Origin of Spectra.

<sup>3)</sup> Phys. Rev. 18, 236, 1921.

Однако, год спустя превосходное открытие Клейна и Росселанда <sup>1)</sup> сделало такое заключение излишним. Клейн и Росселанд показали, что — как это впервые подчеркнул П. Эпштейн, — существует промежуточный процесс, а именно, — соударение второго рода, при помощи которого энергия от источника может быть передана без потерь электрону проводимости непрямым путем, так что необходимость прямой передачи энергии отпадает. Отсюда следует, что процесс поглощения может быть атомным процессом, а поглощенная энергия только впоследствии, путем удара второго рода, будет передана свободному электрону. Таким образом, это важное открытие оставило наше знание о пространственно-ограниченных световых квантах в прежнем состоянии.

Однако совсем недавно, молодой американский физик Артур Комптон <sup>2)</sup>, пользуясь представлением о дискретных световых квантах, указал на явление, которое по меньшей мере свидетельствует о плодотворности гипотезы Эйнштейна. Комптон сделал еще шаг вперед по сравнению с Эйнштей-

ном и допустил не только существование световых квантов, но и предположил, что при столкновении между световым квантом и свободным электроном остаются справедливыми законы сохранения энергии и количества движения. Эти допущения позволили ему точно вычислить, насколько уменьшается частота тех эфирных волн, которые сталкиваются со свободными электронами. Ибо он мог рассчитать количество энергии, которое отдает электрону при соударении эфирная волна, отсюда уже потеря энергии волны, т.-е. уменьшение  $h\nu$ , получается непосредственно. Экспериментально он нашел, что при рассеянии мономатических рентгеновских лучей молибдена углем получается уменьшение частоты, приблизительно совпадающее с вычисленным. Впоследствии Росс <sup>3)</sup> подтвердил этот результат фотографическим путем.

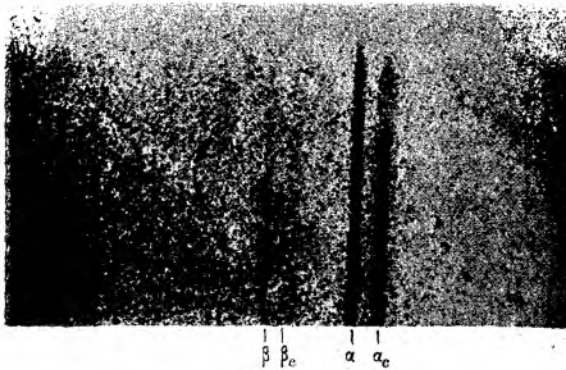


Рис. 6. Эффект Комптона. Этот снимок был сделан Беккером, Смизсом и Уотсоном в апреле 1924 г. На нем видны рентгеновы линии  $\alpha$  и  $\beta$ , а также линии  $\alpha_c$  и  $\beta_c$ , соответственно смещенные в красную сторону. Эти последние возникают вследствие столкновения кванта  $\alpha$ - и  $\beta$ -линий с электронами алюминия. Это важное явление было качественно предсказано А. Комптоном на основании простого допущения, что обычные законы удара справедливы при соударении светового кванта Эйнштейна с электроном. Здесь перед нами новейший успех теории Эйнштейна.

<sup>1)</sup> Zeitschr. für Physik. 1922.

<sup>2)</sup> Phys. Rev. 21, 483, 1923; 22, 409, 1923.

<sup>3)</sup> Proc. Nat. Acad. 9, 246, 1923.

Так как Дьюэн и его сотрудники не могли найти и следов эффекта Комптона, то совсем недавно Беккер, Уотсон и Смизс<sup>1)</sup> проделали опыты, аналогичные опыту Росса. Они воспользовались алюминием в качестве рассеивающего вещества, и на фотографической пластинке, на которой был снят рентгеновский спектр при большой дисперсии, они обнаружили, что каждая из линий так называемого  $\alpha$ -дублета молибдена заметным образом раздвоена, при чем спутники смещены в сторону длинных волн. Здесь можно было измерить величину смещения с точностью до 1%, и в этих тесных пределах она оказалась совпадающей с величиной предсказанной уравнением Комптона. На рис. 6 приведена одна из этих новых фотографий, где видно, что  $\alpha$ - и  $\beta$ -линии молибдена смещены в сторону более длинных волн  $\alpha_c$  и  $\beta_c$ , вследствие рассеяния алюминием. Таким образом, можно смело сказать, что здесь перед нами исключительный успех не только уравнения Эйнштейна, но также и воззрений Эйнштейна. Однако до тех пор, пока не удастся объяснить с помощью этих воззрений интерференцию и другие явления, находящиеся с ними в противоречии, следует воздержаться от окончательного признания истинности этих воззрений. Возможно, что в результате последних попыток Дьюэна, Комптона, Эпштейна и Эренфеста удастся даже интерференцию включить в круг явлений, объясняемых пространственно-ограниченными световыми квантами. Но пока еще — путь темен.

---

<sup>1)</sup> Proc. Phys. Soc., April 1924 и Phys. Rev. Juni 1924.