

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Сто лет квантам света

В.П. Милантьев

Описывается история возникновения гипотезы Эйнштейна о световых квантах. Рассматривается трудный многолетний путь развития этой гипотезы, которая получила полное признание после открытия фотона.

PACS numbers: 01.65.+g, 12.20.-m, 14.70.Bh

Содержание

1. Введение (1233).
 2. Как возникла гипотеза о квантах света? (1234).
 3. Применения гипотезы световых квантов (1236).
 4. Гипотетический квант света становится фотоном (1240).
- Список литературы (1242).

1. Введение

1905 г. был одним из самых плодотворных в творчестве Альберта Эйнштейна (*A. Einstein*, 1879–1955). Среди различных идей, высказанных им в то время, была идея о существовании квантов света. Довольно долгое время она считалась если не сумасшедшей, то фантастической, не заслуживающей внимания серьезных физиков, таких как Макс Планк (*M. Planck*, 1858–1947), Нильс Бор (*N. Bohr*, 1885–1962), Хендрик Лоренц (*H. Lorentz*, 1853–1928) и др. Несмотря на блестящее объяснение Эйнштейном на основе гипотезы о световых квантах явления фотоэффекта и экспериментальное подтверждение основного уравнения фотоэффекта, эта гипотеза отвергалась многими физиками как противоречащая известным законам электродинамики. Лишь в опытах Артура Комптона (*A. Compton*, 1892–1962) в 1922–1923 гг. были даны убедительные доказательства существования квантов света, названных впоследствии фотонами. В настоящей статье рассматривается история возникновения гипотезы о световых квантах, ее развития и признания после блестящих экспериментов Комптона. История дальнейших открытий многих замечательных свойств фотонов и связанных с ними физических явлений и современных областей физики, таких как

квантовая электродинамика, квантовая оптика, фотоника и т.д. составляет предмет отдельного рассмотрения.

Квантовая эра в физике началась после того, как 14 декабря 1900 г. М. Планк впервые сообщил о введенных им *элементах энергии и кванте действия* [1]. Этот день справедливо считается *днем рождения квантовой теории*. Несколько позднее Планк изложил свои идеи в статье "О законе распределения энергии в нормальном спектре" [2], в которой показал, что "*элемент энергии*" излучения равен $\varepsilon = h\nu$, т.е. энергия излучения переносится квантами — дискретными порциями $h\nu$. Это был революционный шаг в развитии физики. Идея о квантах энергии противоречила и механике, и электродинамике, но иного выхода Планк не видел.

Было два возможных варианта объяснения механизма распространения "элементов энергии": 1) после излучения элементы энергии сохраняют свою индивидуальность при распространении, 2) каждый излучаемый элемент рассеивается в пространстве по мере удаления от источника. Первый вариант не совместим с классической оптикой, которая основана на волновом характере распространения электромагнитного излучения. Планк, воспитанный в духе старой, доброй классической физики, несмотря на революционность своего открытия, был ревностным ее хранителем и, как многие в то время, не мог смириться с тем, что хорошо проверенная на опыте волновая теория имеет ограниченную область применимости. Поэтому вначале Планк считал, что процессы испускания и поглощения происходят дискретными порциями, а само излучение является непрерывным.

Острая дискуссия по проблемам квантов и излучения развернулась на I-м Сольвеевском конгрессе, который происходил в Брюсселе в октябре 1911 г. В этом конгрессе участвовали все выдающиеся физики того времени. В своем докладе [3] Планк представил соображения о возможности совместить волновые и квантовые стороны излучения. Он, в частности, показал, как необходимо изменить классическую статистическую механику, чтобы получить не вытекающий из нее закон Рэлея–Джинса, а открытый им квантовый закон излучения. Вильгельм Вин (*W. Wien*, 1864–1928), один из авторов законов теплового излучения, высказал мысль [3, с. 725], что если испускание происходит квантами, то

В.П. Милантьев. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Российский университет Дружбы народов", 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая 6, Российская Федерация
Тел. (095) 955-08-13
Факс (095) 952-11-86
E-mail: vmilantiev@sci.pfu.edu.ru

Статья поступила 10 июня 2005 г.

это поставит нас "в противоречие с уравнениями Максвелла, даже если бы мы согласились применять их только вне электрона", и заключил: "Следовательно, надо было бы отказаться от уравнений Максвелла во внутриатомных явлениях". Планк же считал [3, с. 730], что нет необходимости изменять уравнения Максвелла для вакуума: "... я утверждаю строгую действительность дифференциальных уравнений Максвелла–Герца в пустом пространстве, которые, само собой разумеется, исключают существование дискретных квантов энергии в вакууме".

Планк еще долго пытался с помощью различных гипотез объяснить распространение излучения на основе волновых представлений, и лишь под напором экспериментальных фактов был вынужден оставить свои попытки. Позднее, в Нобелевской речи 2 июля 1920 г., оценивая свою работу в этом направлении, Планк сказал: "Когда я оглядываюсь на времена 20-летней давности, времена, когда впервые из ряда опытных фактов начали вырисовываться понятия и величина физического кванта действия, и на долгий извилистый путь, приведший в конце концов к ее открытию, то все это кажется мне теперь новой иллюстрацией к давно сказанным словам Гёте, что человек заблуждается, покуда у него есть стремления" [3, с. 603].

В противоположность Планку Эйнштейн сразу осознал революционный характер введенной Планком квантовой идеи и развил ее дальше. Оценивая значение открытия Планка, Эйнштейн писал: "...закон излучения Планка дал первое точное определение абсолютных величин атомов, независимо от других предположений. Более того, он убедительно показал, что, кроме атомистической структуры материи, существует своего рода атомистическая структура энергии, управляемая универсальной постоянной, введенной Планком. Это открытие стало основой для всех исследований в физике XX века и с того времени почти полностью обусловило ее развитие. Без этого открытия было бы невозможно установить настоящую теорию молекул и атомов и энергетических процессов, управляющих их превращениями. Более того, оно разрушило остов классической механики и электродинамики и поставило перед наукой задачу: найти новую познавательную основу для всей физики" [4].

2. Как возникла гипотеза о квантах света?

В 1905 г. Эйнштейн в своей работе "Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света" [5] высказал мысль о том, что "элементы энергии" обладают особой индивидуальностью, и ввел гипотезу световых квантов. Во введении этой статьи Эйнштейн писал: "... несмотря на полное подтверждение экспериментом теории дифракции, отражения, преломления, дисперсии и так далее, может оказаться, что теория света, оперирующая непрерывными пространственными функциями, приведет к противоречию с опытом, когда ее будут применять к явлениям возникновения и превращения света. Я и в самом деле думаю, что опыты, касающиеся излучения черного тела, фотолуминесценции, возникновения катодных лучей при освещении ультрафиолетовыми лучами и других групп явлений, связанных с возникновением и превращением света, лучше объясняются предположением, что энергия света распределяется по пространству дискретно... Энергия пучка

света, вышедшего из некоторой точки, не распределяется непрерывно во все возрастающем объеме, а складывается из конечного числа локализованных в пространстве неделимых квантов энергии, поглощаемых или возникающих только целиком... Изложенные выше рассуждения, по моему мнению, отнюдь не опровергают теорию излучения Планка; напротив, они, по-видимому, показывают, что Планк в своей теории излучения ввел в физику новый гипотетический элемент — гипотезу световых квантов".

Чтобы прийти к такому выводу, Эйнштейн рассмотрел энтропию S черного излучения, занимающего объем V :

$$S = V \int_0^{\infty} \varphi_v(\rho_v) dv,$$

где $\varphi_v dv$ — энтропия, $\rho_v dv$ — энергия в единице объема излучения в интервале частот $(v, v + dv)$. Для определенности Эйнштейн предположил, что излучение удовлетворяет известному закону Вина $\rho_v = av^3 \exp(-bv/T)$, где a и b — эмпирические постоянные.

Поскольку энтропия черного излучения максимальна при заданной энергии (и постоянном объеме), то

$$\delta \int_0^{\infty} \varphi_v(\rho_v) dv = 0$$

при условии, что

$$\delta \int_0^{\infty} \rho_v dv = 0.$$

Вводя неопределенный множитель Лагранжа λ , эти соотношения можно записать в виде

$$\int_0^{\infty} \left(\frac{\partial \varphi_v}{\partial \rho_v} - \lambda \right) \delta \rho_v dv = 0.$$

Поскольку $\delta \rho_v$ произвольно, то отсюда следует, что производная $\partial \varphi_v / \partial \rho_v = \lambda$ не зависит от частоты. Далее Эйнштейн вычислил приращение энтропии dS при постоянном объеме, когда температура обратимым образом изменилась на dT :

$$\begin{aligned} dS &= V \int_0^{\infty} \left(\frac{\partial \varphi_v}{\partial \rho_v} d\rho_v \right) dv = \\ &= \frac{\partial \varphi_v}{\partial \rho_v} d \left(V \int_0^{\infty} \rho_v dv \right) = \frac{\partial \varphi_v}{\partial \rho_v} dE, \end{aligned}$$

где

$$E = V \int_0^{\infty} \rho_v dv.$$

Так как процесс является обратимым и объем постоянен, то $dE = TdS$. Отсюда и из предыдущего равенства следует $\partial \varphi_v / \partial \rho_v = 1/T$. Определяя $1/T$ из закона Вина, можно получить соотношение

$$\frac{\partial \varphi_v}{\partial \rho_v} = -\frac{1}{bv} \ln \frac{\rho_v}{av^3}.$$

Отсюда после интегрирования с учетом условия $\varphi_v = 0$ при $\rho_v = 0$ следует

$$\varphi_v(\rho_v) = -\frac{\rho_v}{bv} \left(\ln \frac{\rho_v}{av^3} - 1 \right).$$

Энергия излучения E_v в единичном интервале частоты в объеме V равна $E_v = V\rho_v$. Энтропия этого излучения определяется формулой

$$S_v = V\varphi_v(\rho_v) = -\frac{E_v}{bv} \left(\ln \frac{E_v}{aVv^3} - 1 \right).$$

Энтропия равновесного излучения той же энергии в другом объеме V_0 равна

$$S_v^0 = V_0\varphi_v(\rho_v) = -\frac{E_v}{bv} \left(\ln \frac{E_v}{aV_0v^3} - 1 \right).$$

Таким образом, разность энтропий равна

$$S_v - S_v^0 = k \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)^{E_v/hv}.$$

Здесь постоянная b согласно Планку заменена отношением h/k , где h — постоянная Планка, k — постоянная Больцмана. По Больцману разность энтропий состояний 1 и 2 пропорциональна натуральному логарифму отношения числа комплексов этих состояний, т.е. логарифму относительной вероятности состояния 1 к состоянию 2. Из последнего соотношения вытекает, что эта вероятность равна $(V/V_0)^{E_v/hv}$.

Далее Эйнштейн рассмотрел идеальный газ, состоящий из N молекул в объеме V_0 . Нетрудно определить вероятность того, что все эти N молекул в некоторый момент времени случайно соберутся в объеме $V < V_0$. В силу независимости движения молекул эта вероятность равна $(V/V_0)^N$.

Сравнивая оба полученных выражения для вероятностей, Эйнштейн пришел к выводу: "*Монохроматическое излучение малой плотности (в пределах области применимости закона излучения Вина) в смысле теории теплоты ведет себя так, как будто оно состоит из независимых друг от друга квантов энергии величиной hv* ". И далее: "*Напрашивается вопрос, не является ли закон возникновения и превращения света таким, как будто свет состоит из подобных же квантов энергии?.. Мы должны предположить, что однородный свет состоит из зерен энергии — «световых квантов», т.е. небольших порций энергии, несущихся в пустом пространстве со скоростью света*" [5]. Такие представления совершенно несовместимы с электродинамикой Максвелла. Это, естественно, отмечал сам Эйнштейн: "*...планковским квантам приходится приписывать своего рода непосредственную реальность, следовательно, в отношении энергии излучение должно обладать своего рода молекулярной структурой, что, конечно, противоречит теории Максвелла*" [5].

Из высказанной Эйнштейном гипотезы о квантах света естественно возникла новая проблема — проблема корпускулярно-волнового дуализма. В 1909 г. в работе "К современному состоянию проблемы излучения" [6, с. 164] Эйнштейн впервые указал на двойственную природу света. Он вычислил флуктуации энергии равновесного излучения, находящегося в объеме V при температуре T . Если E — мгновенное значение энергии излучения в интервале частот $(\nu, \nu + d\nu)$, то для средней квадратичной флуктуации энергии $(\Delta E)^2$ Эйнштейн получил формулу

$$\overline{(\Delta E)^2} = hv\bar{E} + \frac{c^3}{8\pi\nu^2 V dv} \bar{E}^2.$$

Второй член в правой части, как показал Эйнштейн, обусловлен интерференцией парциальных волн в полном соответствии с максвелловской теорией света. Первый же член совершенно необъясним с этой точки зрения, но становится вполне понятным, если принять гипотезу световых квантов. Тогда кванты так же, как и частицы или молекулы идеального газа, должны подчиняться статистическим законам молекулярно-кинетической теории. В этом случае вычисленное значение флуктуации энергии полностью соответствует первому члену. Таким образом, проведенный расчет впервые указывал на корпускулярно-волновой дуализм света. (С докладом на эту тему Эйнштейн выступал на упоминавшемся Сольвеевском конгрессе в 1911 г.) Наличие двух членов разной природы в формуле для флуктуаций энергии излучения фактически явилось следствием формулы Планка. Первоначальный вывод знаменитой формулы Планка с помощью интерполяции уже содержал в себе объединение корпускулярных и волновых представлений о свете. Это прекрасно осознавал Эйнштейн. Действительно, Планк показал, что вторая производная энтропии по энергии осциллятора $\partial^2 S/\partial U^2$ определяется разными формулами: $\partial^2 S/\partial U^2 = \text{const}/U$ при использовании закона излучения Вина (корпускулярные представления о свете) и $\partial^2 S/\partial U^2 = \text{const}/U^2$ при использовании формулы Рэлея – Джинса (волновые представления). Гениальная догадка Планка заключалась в том, что он объединил оба эти выражения с помощью интерполяционной формулы

$$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \frac{a}{U(b+U)},$$

которая и привела к формуле Планка [1, 7]. В статье [6, с. 164] Эйнштейн писал: "*Я стремился здесь только показать, насколько фундаментальны корни тех трудностей, в которые вовлекает нас формула излучения, даже если мы будем смотреть на нее, как на нечто заданное эмпирически*".

Глубоко анализируя последующий уточненный вывод формулы Планка [1], Эйнштейн подверг этот вывод критике [8], показав его непоследовательность, поскольку Планк одновременно принимал и отвергал классическую электродинамику. В самом деле, Планк, с одной стороны, использовал формулу для спектральной плотности излучения

$$\rho_v(T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} u(\nu, T),$$

полученную им строго на основе классической электродинамики, где считается, что энергия осциллятора изменяется непрерывно. С другой стороны, при статистическом рассмотрении взаимодействия между осцилляторами с разными собственными частотами Планк пришел к формуле

$$u = \frac{hv}{\exp(hv/kT) - 1},$$

при выводе которой та же энергия осциллятора рассматривалась как дискретная величина, принимающая лишь значения, кратные hv . Не отрицая справедливости самой формулы Планка, Эйнштейн усматривал в непоследова-

тельности ее вывода стимул для дальнейшего развития теории излучения. Глубокий анализ этой проблемы и привел Эйнштейна к гипотезе о световых квантах.

Против гипотезы Эйнштейна в 1911 г. решительно выступил Планк: *"Когда думаешь о полном опытным подтверждении, которое получила электродинамика Максвелла при исследовании даже самых сложных явлений интерференции, когда думаешь о необычайных трудностях, с которыми придется столкнуться всем теориям при объяснении электрических и магнитных явлений, если они откажутся от этой электродинамики, инстинктивно испытываешь неприязнь ко всякой попытке поколебать ее фундамент. По этой причине мы и далее оставим в стороне гипотезу «световых квантов», тем более, что эта гипотеза находится еще в зародышевом состоянии. Будем считать, что все явления, происходящие в пустоте, в точности соответствуют уравнениям Максвелла и не имеют никакого отношения к постоянной h "* [9] (см. также [3, с. 282]). Такого же мнения в то время придерживался и Нильс Бор: *"Хотя эта точка зрения имеет большое значение для понимания некоторых классов явлений, например, фотоэффекта, с позиций квантовой теории обсуждаемая гипотеза не может все же рассматриваться как удовлетворительное решение. Как известно, именно эта гипотеза приводит к непреодолимым трудностям при объяснении явлений интерференции, представляющих основное средство при исследовании свойств излучения. Во всяком случае, можно утверждать, что лежащее в основе гипотезы световых квантов положение принципиально исключает возможность осмысления понятия частоты ν , играющей главную роль в этой теории. Поэтому гипотеза световых квантов непригодна для того, чтобы дать общую картину процессов, которая могла бы включать всю совокупность явлений, рассматриваемых при применениях квантовой теории"* [10, с. 518]. Бор упорно не соглашался с гипотезой световых квантов, отстаивая исключительно волновые представления: *"...несмотря на эвристическую ценность, гипотеза световых квантов, будучи совершенно несовместимой с так называемыми явлениями интерференции, не может помочь и в выяснении вопроса о природе излучения"* [10, с. 423]. Говорят, что, получив письмо Эйнштейна, который разъяснял смысл квантов света, Бор насмешливо ответил, что даже если бы Эйнштейн прислал радиogramму с сообщением, что отныне он владеет окончательным доказательством реальности световых частиц, то даже тогда эта *"радиogramма дошла бы до меня только по радио, благодаря волнам"* [11].

В дальнейшем, однако, гипотеза Эйнштейна о световых квантах стала рассматриваться как одно из важнейших его достижений. Об этом писал Бор в 1955 г.: *"Широта научного кругозора Эйнштейна и прямота его ума наиболее ярко проявились в том, что в те самые годы, когда он дал широчайшее обобщение классической физике, он четко осознавал тот факт, что открытие Планком универсального кванта действия накладывает определенные ограничения на такой подход. Удивительная интуиция Эйнштейна привела его к представлению о фотонах как носителях энергии и импульса в индивидуальных процессах излучения. Тем самым он нашел отправную точку для создания последовательных квантово-теоретических методов, которые позволили объяснить огромное количество экспериментальных данных, относящихся к свойствам материи, и, более того, привели к необходи-*

мости пересмотра наших основополагающих понятий" [10, с. 479].

3. Применения гипотезы световых квантов

Эйнштейн не ограничился только формулировкой гипотезы световых квантов. Идею о световых квантах он применил прежде всего для объяснения фотоэлектрического эффекта.

Этот эффект в 1887 г. случайно открыл Генрих Герц (*H. Hertz*, 1857–1894) при исследовании распространения электромагнитных волн от излучающего резонатора к приемнику. Чтобы лучше видеть проскакивающую искру в излучателе, Герц закрыл приемник экраном, и тогда обнаружилось, что искра проскакивает при меньшем напряжении между электродами. Как оказалось, причиной этого явилось облучение экрана светом электрической дуги. В то время Герц был всецело увлечен доказательством существования электромагнитных волн, предсказанных Максвеллом. Поэтому обнаруженный эффект, по иронии судьбы ставший отрицанием волновой природы света, Герца не заинтересовал. Годом позже фотоэлектрический эффект (или просто фотоэффект) переоткрыли Гальвакс (*W. Hallwachs*, 1859–1922), Риги (*A. Righi*, 1850–1921) и А.Г. Столетов (1839–1896). Гальвакс показал, что под воздействием ультрафиолетового излучения металлическая пластинка заряжается положительно. Риги, впервые наблюдавший фотоэффект в диэлектриках (эбонит, сера), предложил термин "фотоэлемент". Первый фотоэлемент создал и применил на практике Столетов. Он же открыл один из законов фотоэффекта — прямую пропорциональность силы фототока от интенсивности падающего света — и обнаружил фототок насыщения. В 1899 г. Дж.Дж. Томсон (*J.J. Thomson*, 1856–1940), открывший электрон в 1897 г., и Ленард (*P. Lenard*, 1862–1947) определили удельный заряд частиц, вылетающих с поверхности освещаемого тела. Этот заряд оказался таким же, как и у катодных лучей. Так было доказано, что с освещаемой поверхности вылетают электроны. В 1902 г. Ленард установил, что энергия вылетающих электронов совершенно не зависит от интенсивности падающего света и является прямо пропорциональной его частоте. Этот факт невозможно объяснить на основе классических представлений. Действительно, по классическим представлениям электрон в световом поле совершает колебания, амплитуда которых должна возрастать с увеличением интенсивности волны. Следовательно, должно возрастать число электронов, способных оторваться от поверхности тела. Этого, однако, не наблюдалось.

Используя гипотезу о световых квантах, Эйнштейн в восьмом параграфе той же статьи 1905 г. получил уравнение энергетического баланса при фотоэффекте:

$$E_{\max} = h\nu - W,$$

где E_{\max} — максимальная энергия вылетающих электронов, W — работа выхода, т.е. энергия, необходимая для удаления электрона из вещества. Из этой формулы следует, что максимальная энергия фотоэлектронов, в согласии с результатом Ленарда, линейно зависит от частоты, причем угол наклона прямой $E_{\max}(\nu)$ не зависит от состава вещества и определяется лишь постоянной Планка. Учитывая это, Эйнштейн отметил для экспериментаторов, что задерживающий потенциал должен

быть линейной функцией частоты возбуждающего света и изображаться "в декартовых координатах в виде прямой линии, наклон которой не зависит от природы исследуемого вещества". Эйнштейн писал [5]: "Насколько мне известно, наше представление о фотоэлектрических процессах не противоречит наблюдениям Ленарда. Если квант возбуждающего света отдает свою энергию независимо от всех прочих квантов, то распределение электронов по скорости... не должно зависеть от интенсивности возбуждающего света; с другой стороны, количество электронов, покидающих тело при прочих равных условиях должно быть пропорционально интенсивности возбуждающего света".

Уравнение Эйнштейна впервые было экспериментально подтверждено в опытах Хьюза (A. Hughes) и Ричардсона (O. Richardson) и Комптона (K. Compton) в 1912 г. (см. ссылки в [11, с. 46]). Наиболее убедительные по точности эксперименты (рис. 1) выполнил в 1914–1916 гг. Роберт Милликен (R. Millikan, 1868–1953) [12] (см. также [11, с. 46]). Впоследствии Милликен писал: "Я потратил 10 лет моей жизни на проверку этого эйнштейновского уравнения 1905 года, и вопреки всем моим ожиданиям я вынужден был в 1915 году безоговорочно признать, что оно экспериментально подтверждено, несмотря на его несуразность, так как казалось, что оно противоречит всему, что мы знаем об интерференции света" [13]. Это еще раз говорит о том, что в то время многие физики считали гипотезу Эйнштейна чуть ли не сумасшедшей идеей.

До работ Эйнштейна квантовая теория Планка объясняла лишь законы излучения черного тела и никак не затрагивала другие физические явления. Теория фотоэффекта Эйнштейна впервые показала универсальный характер идей Планка и его постоянной действия. В 1907 г. в статье "Теория излучения Планка и теория удельной теплоемкости" [6, с. 134] Эйнштейн распространил квантовые понятия также на молекулярно-кинетические явления. Ссылаясь на теорию Планка, согласно которой энергия может передаваться лишь порциями, кратными $h\nu$, Эйнштейн писал в указанной статье: "Однако я думаю, что мы не можем довольствоваться этим результатом. В самом деле, напрашивается вопрос: если элементарные образования, существование которых предполагалось в теории обмена энергией между излучением и веществом, мы не можем понимать в смысле современной молекулярно-кинетической теории теплоты, то не следует ли нам тогда видоизменить теорию и для других периодически колеблющихся образований, рассматриваемых молекулярной теорией теплоты? Ответ, по-моему, сомнений не вызывает. Если теория излучения Планка содержит в себе зерно истины, то мы должны ожидать, что и в других областях теории теплоты найдутся противоречия между современной молекулярно-кинетической теорией теплоты и опытом, устраняемые предложенным здесь путем". Эйнштейн имел в виду существовавшие в то время трудности, связанные с удельной теплоемкостью. В течение длительного времени считался справедливым закон, который открыли в 1819 г. Пьер Дюлонг (P.L. Dulong, 1785–1838) и Алексис Пти (A.T. Petit, 1791–1820). Согласно этому закону, количество тепла, необходимое для того, чтобы температура одной грамм-молекулы любого элемента в твердом состоянии повысилась на 1°C , составляет около 6 кал. Объяснение закона Дюлонга и

Пти основывалось на классической теореме о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Однако проведенные после 1872 г. измерения удельной теплоемкости в очень твердых кристаллах, например алмазе, при достаточно низких температурах показали, что удельная теплоемкость с понижением температуры уменьшается. Эти отклонения от закона Дюлонга и Пти долгое время не удавалось объяснить. Эйнштейн, который первым осознал, что объяснение следует искать с помощью квантовых идей Планка, предположил, что квантование — это общее свойство колебательного движения. Тогда, как и электромагнитное излучение в пустоте, колебания атомов (и ионов) в кристаллах по идее Эйнштейна также должны квантоваться: "До сих пор считали, что движение молекул подчиняется таким же законам, каким подчиняется движение тел нашего повседневного опыта... теперь же приходится сделать предположение, что для колеблющихся с определенной частотой ионов, участвующих в обмене энергией между веществом и излучением, множество состояний, которые могут принимать эти ионы, меньше, чем для тел повседневного опыта. Мы должны при этом предполагать механизм передачи энергии таким, что энергия элементарного образования может принимать только значения $0, h\nu, 2h\nu$ и так далее" [6, с. 134]. Эйнштейн установил, что если в кристалле есть колебание с частотой, такой, что соответствующий квант энергии $h\nu$ намного превосходит энергию теплового возбуждения, то при данной температуре такое колебание не может возбуждаться. Тепловое движение распределится не по всем колебаниям кристалла, а только по их низкочастотной части. В этой области каждое колебание получает столько энергии, сколько полагается по теореме о равномерном распределении энергии, а весь кристалл как целое получает энергии меньше. Этим и объясняются отклонения от закона Дюлонга и Пти.

В своих расчетах Эйнштейн пренебрегал взаимодействием между атомами вещества, предполагая, что все атомы твердого тела при заданной температуре осциллируют с одной и той же частотой. Используя формулу Планка, Эйнштейн нашел выражение для энергии l моля, из которого следовала формула для удельной теплоемкости l моля:

$$c = 3R \left(\frac{h\nu}{kT} \right)^2 \exp \left(\frac{h\nu}{kT} \right) \left[\exp \left(\frac{h\nu}{kT} \right) - 1 \right]^{-2}.$$

Эта формула довольно хорошо согласовывалась с экспериментальными данными. Расхождение результатов при очень низких температурах Эйнштейн в 1911 г. объяснил тем, что он использовал предположение об одинаковой частоте колебаний всех атомов. В дальнейшем теорию теплоемкости твердых тел Эйнштейна уточнили Питер Дебай (P. Debye, 1884–1966), Макс Борн (M. Born, 1882–1970) и Теодор Карман (T. Karman, 1881–1969). Эта теория была блестяще подтверждена экспериментами.

Успех теории теплоемкости Эйнштейна имел в то время огромное значение не только потому, что теория устранила одно из противоречий в физике, но и потому, что она укрепила веру некоторых сомневающихся физиков в правильность квантовой теории. Например, Вальтер Нернст (W. Nernst, 1864–1941) в 1911 г. отметил: "В настоящее время квантовая теория по существу является только вычислительным правилом несколько

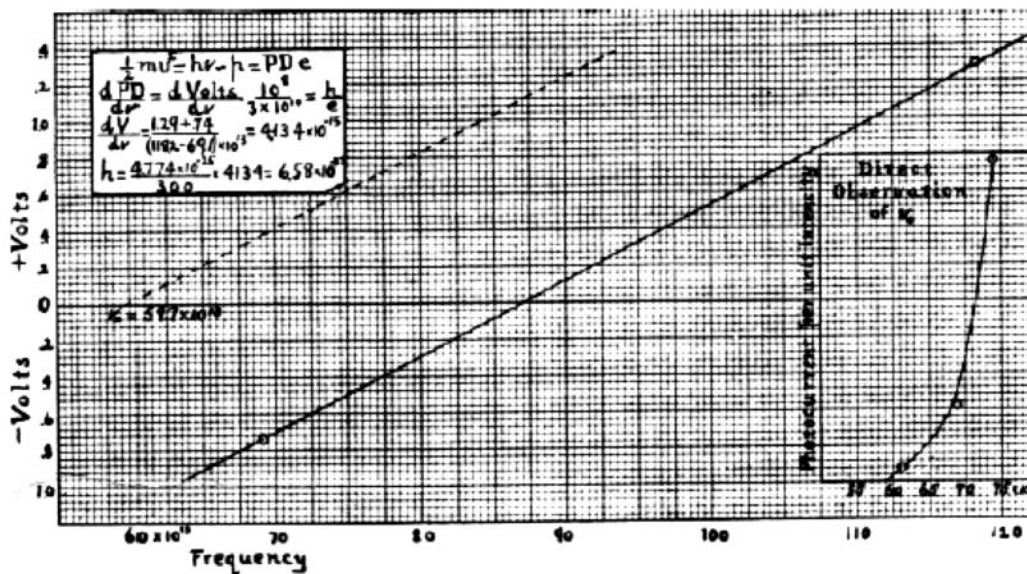


Figure 2:

$$p = h\nu_0 \quad (3)$$

Now since both the independence of photo-emission upon temperature, and also the fact that gases show the photo-effect, indicate that the electrons which are ejected by light from metals are not the free electrons of the metal, but rather electrons which are constituents of the atoms, we would naturally consider p as made up of two parts, (1) the work p_1 necessary to detach the electron from its parent atom and make it a free electron of the metal, and (2) the work p_2 necessary to detach this free, or conduction, electron from the surface of the metal.

If we consider two opposed metal surfaces, for example one of pure zinc and one of pure copper separated only by the ether, and imagine that they have been put initially into the same electrical condition, so that no electrical field exists between them, then if a wire of copper be run from the copper plate to the zinc plate, we find by experiment that upon making contact an electric field is established between the plates. We say that the P.D. which now exists has arisen because of a contact. E.M.F. at the junction of copper and zinc which causes an electrical flow from copper to zinc until equilibrium is set up, and we measure this contact E.M.F. by the observed P.D. which it creates, taken of course with the opposite sign. By definition then the contact E.M.F. is the amount of work which, before any electrical field exists, would be required to transfer one unit of free positive electricity

странной, если не сказать гротескной, природы; но работы Планка, в том, что касается излучения, и работы Эйнштейна, что касается молекулярной механики, показали такую ее плодотворность ... что наука

обязана отнести к ней со всей серьезностью и подвергнуть ее тщательному изучению" [11, с. 68].

Эйнштейн, вероятно, первым понял, что гипотеза световых квантов фактически неявно содержалась во

втором квантовом постулате теории атома Бора [14]. Развивая идеи Бора и используя гипотезу световых квантов, Эйнштейн в 1916 г. исследовал условия равновесия между молекулярным газом и излучением [6, с. 386, 393]. Он впервые ввел вероятностные представления в теорию излучения атомов и молекул с помощью коэффициентов Эйнштейна, определяющих вероятности квантовых переходов, и дал четкое определение возможных переходов между квантовыми состояниями.

Эйнштейн рассмотрел вероятность спонтанного перехода в единицу времени A_{mn} из состояния m в состояние n (при $E_m > E_n$). Величина A_{mn} имеет смысл среднего числа актов излучения в единицу времени, приходящихся на один атом, $A_{mn} = 1/\tau_m$, где τ_m — время жизни атома в возбужденном состоянии. Эйнштейн ввел коэффициент A_{mn} , считая, что молекула может перейти из одного энергетического состояния в другое, более низкое состояние "без побуждения со стороны внешних причин". Коэффициент A_{mn} впоследствии стали называть вероятностью спонтанного излучения. Используя принцип соответствия, Бор связал коэффициент A_{mn} с коэффициентами Фурье-разложения дипольного момента D_{mn} :

$$A_{mn} \leftrightarrow \frac{(2\pi)^4 \nu^3}{3c^3 h} |D_{mn}|^2.$$

Если атом, находящийся в состоянии E_n , помещен во внешнее электромагнитное поле с частотой ω , то он поглощает энергию поля при совпадении этой частоты с частотой перехода $\omega_{mn} = (E_m - E_n)/\hbar$. В результате атом переходит в возбужденное состояние E_m . Пусть ρ_ω — спектральная плотность энергии электромагнитного излучения. Вводится величина $W_{nm} = B_{nm} \rho_\omega$, которой придается смысл вероятности поглощения излучения атомом в единицу времени. Наряду с процессом поглощения, в результате которого происходит переход $n \rightarrow m$, Эйнштейн предусмотрел возможность существования обратного процесса — вынужденного, стимулированного, или индуцированного испускания. Этот процесс происходит при переходе $m \rightarrow n$ под воздействием внешнего электромагнитного поля, частота которого равна частоте перехода и характеризуется величиной $W_{mn} = B_{mn} \rho_\omega$, которая имеет смысл вероятности индуцированного излучения в единицу времени. Коэффициенты A_{mn} , B_{mn} , B_{nm} и называются коэффициентами Эйнштейна. Они связаны друг с другом соотношениями:

$$g_n B_{nm} = g_m B_{mn}, \quad A_{mn} = \frac{2\hbar\omega_{mn}^3}{\pi c^3} \frac{g_n}{g_m} B_{nm}.$$

Коэффициент g_n (или g_m) называется статистическим весом, или кратностью вырождения n -го (или m -го) состояния.

Представления Эйнштейна о спонтанных и вынужденных переходах, связанных с испусканием и поглощением излучения, оказались чрезвычайно важными для дальнейшего развития теории излучения. Эти представления впоследствии стали основой для создания лазеров и лазеров.

Используя представления о переходах в состоянии равновесия атомов с излучением, Эйнштейн дал изящный вывод формулы Планка для спектральной плотности излучения ρ_ν . Так еще раз была подтверждена квантовая гипотеза Планка.

Чрезвычайно важным в статье Эйнштейна [6, с. 386, 393] было также рассмотрение импульса, который пере-

дается атому (или молекуле) при излучении или поглощении света. Эйнштейн писал: "...самым важным, на мой взгляд, является вывод, касающийся импульса, который передается молекуле при спонтанном и индуцированном излучениях... Если пучок воздействует на встретившуюся ему молекулу так, что она посредством элементарного процесса получает или отдает в форме излучения некоторое количество энергии $h\nu$ (индуцированное излучение), то молекула всегда будет получать и импульс $h\nu/c$: при поглощении энергии — в направлении распространения пучка, а при испускании — в противоположном направлении... Если молекула теряет энергию без внешнего возбуждения (спонтанное излучение), то этот процесс также является направленным. Спонтанного излучения в виде сферических волн не существует. В элементарном процессе спонтанного излучения молекула получает импульс отдачи, величина которого равна $h\nu/c$, а направление определяется, согласно современному состоянию теории, лишь «случайностью»". Высоко оценивая результаты этой работы, Бор много лет спустя писал [10, с. 402]: "Эйнштейн весьма выразительно подчеркнул фундаментальный характер статистического описания тем, что указал на аналогию между предположением о существовании спонтанных излучательных переходов и хорошо известными законами, управляющими превращениями радиоактивных веществ... Эйнштейн еще более заострил дилемму, указав, что если его рассуждения справедливы, то всякий процесс излучения должен иметь определенное направление. Последнее нужно понимать в том смысле, что не только атом, поглощающий квант света, получает от фотона количество движения, направление которого соответствует направлению распространения фотона, но что и излучающий атом получает импульс в противоположном направлении, причем это имеет место, несмотря на то, что по волновой картине не может быть и речи о предпочтительном направлении в акте излучения".

Однако гипотеза световых квантов Эйнштейна несмотря на успешные опыты Милликена и др. не вызывала доверия у физиков того времени. Характерен такой эпизод. Выдвигая Эйнштейна в члены Прусской академии наук в 1913 г., Планк, Нернст, Рубенс (*H. Rubens*, 1865–1922) и Варбург (*E. Warburg*, 1846–1931) в заключение своей рекомендации писали: "В целом можно сказать, что вряд ли найдется какая-нибудь из важных проблем современной физики, в решение которой Эйнштейн не внес бы замечательного вклада. То, что он иногда не попадает в цель, как, например, в случае гипотезы световых квантов, нельзя считать отрицательным аргументом, поскольку невозможно выдвинуть новую идею, даже в наиболее точной науке, без некоторой доли риска" [11, с. 54].

А известный физик Чарлз Баркла (*Ch. Barkla*, 1877–1944), получая в 1918 г. Нобелевскую премию за исследования свойств рентгеновского излучения, сказал, что из его опытов с рентгеновскими лучами следует, что излучение и поглощение непрерывны и что только атомы в некоторых исключительных случаях испускают свет квантами. Многие физики того времени считали, что кванты света не представляют никакой физической реальности, а являются лишь удачным эвристическим способом определения некоего количества энергии, связанного, возможно, с какой-то особенностью электромагнитного поля, т.е. квант света рассматривался лишь

как некая мера, а не как своеобразная корпускула. И в 1921 г. Нобелевский комитет сформулировал присуждение премии Эйнштейну "за вклад в теоретическую физику, и особенно за открытие закона фотоэффекта", при этом даже не было упомянуто ни об открытии квантов света, ни о создании теории относительности.

Тем не менее по мере того, как все новые и новые явления находили свое объяснение лишь в рамках квантовых представлений, происходило медленное и постепенное признание физической реальности квантов. Отрицательное отношение физиков к гипотезе световых квантов объясняется тем, что эта гипотеза возвращала корпускулярные представления о свете. Все хорошо помнили, как после многолетних дискуссий ньютоновские корпускулярные представления были решительно отброшены, поскольку с их помощью невозможно было объяснить ни закон преломления света, ни интерференцию, ни дифракцию. Между тем световые кванты не могут иметь ничего общего с ньютоновскими корпускулами света. Квант света является особой частицей, распространяющейся со скоростью света в вакууме. Энергия кванта света равна $E = cp = hv$, при этом наряду с энергией квант света имеет также импульс, равный $p = hv/c$. Однако квант света оставался гипотетической частицей, пока его существование не было доказано в эксперименте.

4. Гипотетический квант света становится фотоном

В период с 1921 по 1924 гг. в ряде опытов было замечено, что при рассеянии рентгеновских лучей веществом возникают более "мягкие" лучи, т.е. излучение с большей длиной волны. Это противоречило теории рассеяния излучения, разработанной в 1906 г. Дж.Дж. Томсоном на основе классических представлений. Согласно этой теории электромагнитное излучение, падающее на электрон, вызывает его вынужденные колебания, которые происходят с той же частотой, что и падающее излучение. Колеблющийся электрон сам оказывается источником излучения, которое называют рассеянным излучением. Говорят, что электрон рассеивает падающее на него излучение, при этом частота рассеянного излучения должна быть такой же, как и частота падающего излучения.

Артур Комптон решил найти объяснение опытным фактам по рассеянию рентгеновского излучения. Все попытки понять их на основе классических представлений оказались безуспешными. Тогда в 1923 г., основываясь на гипотезе Эйнштейна о световых квантах, Комптон задался вопросом: "Что должно произойти, если каждый квант энергии рентгеновских лучей сконцентрирован в одной частице и действует как целое на отдельный электрон?" [15].

Надо сказать, что идея о корпускулярных свойствах рентгеновского излучения не была неожиданной для некоторых экспериментаторов. Так, еще в 1911 г. У. Брэгг (*W. Bragg*) и Г. Портер (*H. Porter*) утверждали: "Энергетические соображения непосредственно привели нас к предположению, что рентгеновские и гамма-лучи корпускулярны по природе, поскольку каждый луч является отдельной сущностью, движущейся через пространство без изменения в форме и содержании энергии, совершенно как двигалась бы свободная частица" [11,

the secondary. The zero point for the spectrum of both the primary and secondary X-rays was determined by finding the position of the first order lines on both sides of the zero point.

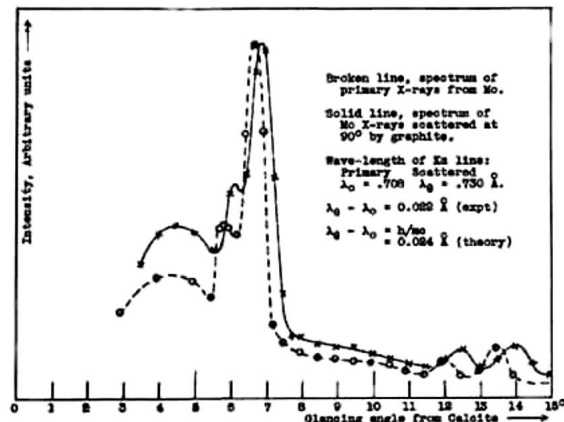


Fig. 4. Spectrum of molybdenum X-rays scattered by graphite, compared with the spectrum of the primary X-rays, showing an increase in wave-length on scattering.

It will be seen that the wave-length of the scattered rays is unquestionably greater than that of the primary rays which excite them. Thus the $K\alpha$ line from molybdenum has a wave-length 0.708 Å. The wave-length of this line in the scattered beam is found in these experiments, however, to be 0.730 Å. That is,

$$\lambda_s - \lambda_0 = 0.022 \text{ \AA} \quad (\text{experiment}).$$

But according to the present theory (Eq. 5),

$$\lambda_s - \lambda_0 = 0.0484 \sin^2 45^\circ = 0.024 \text{ \AA} \quad (\text{theory}),$$

which is a very satisfactory agreement.

The variation in wave-length of the scattered beam with the angle is illustrated in the case of γ -rays. The writer has measured¹ the mass absorption coefficient in lead of the rays scattered at different angles when various substances are traversed by the hard γ -rays from RaC. The mean results for iron, aluminium and paraffin are given in column 2 of Table I. This variation in absorption coefficient corresponds to a

¹ A. H. Compton, *Phil. Mag.* 41, 760 (1921).

Рис. 2. Фрагмент статьи Комптона [15].

с. 234, 235]. В конце 1912 г. Брэгг пророчески писал: "...проблема теперь состоит не в том, чтобы выбрать между двумя теориями рентгеновских лучей, а в том, чтобы найти... одну теорию, обладающую возможностями обеих" [11, с. 234, 235].

Комптон исследовал рассеяние жесткого рентгеновского излучения средами, состоящими из легких атомов (графит, парафин). В таких средах энергия, передаваемая атому излучением, больше энергии связи электрона в атоме. Поэтому электроны можно рассматривать как "свободные", почти не связанные с атомом. В этом случае рассеяние рентгеновского излучения средой сводится к рассеянию отдельным электроном. Опыты Комптона показали, что рассеянное излучение состоит из двух компонент, зависящих от угла рассеяния, — у одной длина волны такая же, как у падающей волны, а у другой — больше (рис. 2). Это явление называют *эффектом Комптона*. Комптон и Дебай показали, что объяснить этот эффект можно только на языке столкновения рентгеновского кванта со свободным электроном. Пользуясь законами сохранения энергии и импульса в системе электрон-фотон, Комптон нашел, что в результате столкновения с электроном длина волны рассеянного излучения отличается от длины волны падающего

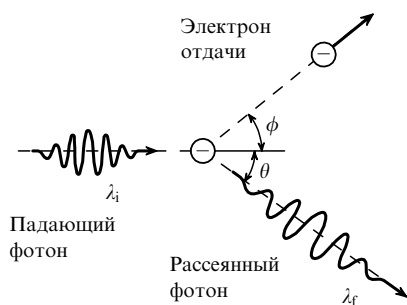


Рис. 3. Комptonовское рассеяние.

излучения на величину $\Delta\lambda \equiv \lambda_f - \lambda_i = 2\lambda_C \sin^2 \theta/2$, где θ — угол рассеянного излучения (рис. 3). Новая физическая постоянная $\lambda_C = \hbar/m_0c = 2,4 \times 10^{-10}$ см стала называться *комptonовской длиной*. Эксперименты Комптона полностью подтвердили полученную им формулу.

Подводя итог выполненным экспериментам, Комpton писал [15]: "Это замечательное согласие между нашими формулами почти не оставляет сомнений в том, что рассеяние рентгеновских лучей есть квантовое явление... В данной теории существенную роль играет предположение о том, что каждый электрон, эффективно участвующий в рассеянии, рассеивает целый квант. В ней также используется гипотеза о том, что кванты излучения приходят в определенных направлениях и в определенных направлениях рассеиваются. Эксперименты, подтверждающие теорию, весьма убедительно показывают, что квант излучения несет не только энергию, но и направленный импульс".

Эйнштейн с удовлетворением встретил сообщение об опыте Комптона: "Положительный результат опыта Комптона показывает, что излучение ведет себя так, как если бы оно состояло из дискретных корпускул не только в смысле передачи энергии, но и передачи импульса" [16]. Таким образом, Комpton экспериментально доказал существование квантов света. Значение этого открытия в физике было огромным. Как отмечал известный немецкий физик-теоретик Фридрих Хунд (F. Hund, 1896–1997), "Бор относился к гипотезе световых квантов до 1922 года сдержанно", однако: "Такая позиция неприемлемости или равнодушия физиков изменилась после открытия Комpton-эффекта" [17].

Эксперименты, подтвердившие гипотезу Эйнштейна о световых квантах, проводили в 1924 г. также российские физики А.Ф. Иоффе (1880–1960) и Н.И. Добронравов. В 1926 г. американский физико-химик Гильберт Льюис (G.N. Lewis, 1875–1946), который считал понятие "квант света" неудачным, поскольку "мы предполагаем, что он проводит лишь ничтожную долю времени своего существования как носитель энергии излучения, а все остальное время — как важный структурный элемент внутри атома", и поэтому ввел новый термин: "...я позволю себе предложить для этого гипотетического нового атома, который не является светом, но принимает существенное участие во всех процессах излучения, название фотон" [18].

Этот термин сразу же был принят физиками. Фотон стал полноправной элементарной частицей с нулевой массой, нулевым электрическим зарядом и спином, равным 1. Однако фотон — очень своеобразная частица. Он не является пространственно локализованным объек-

том, и нельзя определить его положение в пространстве. Фотон движется со скоростью света и поэтому не может находиться в состоянии покоя. Наряду с этим, как показывают многие опыты (флуктуации концентрации фотонов в световом пучке, селективный фотоэффект и др.), к отдельному фотону применимо понятие поляризации. Более того, как и для электромагнитных волн, для фотонов также наблюдается явление интерференции, причем при наличии всего лишь одного фотона [19]. Современные исследования показывают, что возможна также интерференция трех, четырех или пяти фотонов, находящихся в запутанных квантовых состояниях (*entangled states*) [20]. Длина волны де Бройля ансамбля N фотонов, находящихся в таких состояниях, равна λ/N , где λ — длина волны отдельного фотона. С помощью расщепления единичных фотонов в нелинейном кристалле были получены *бифотоны* ($N = 2$) [21]. Фотоны наряду со спиновым угловым моментом характеризуются также орбитальным угловым моментом [22]. Согласно современным экспериментам масса фотона близка к нулю с огромной точностью: $m_\gamma < 10^{-51}$ г [23]. Вместе с тем теоретики уже подготовили уравнения, обобщающие систему уравнений Максвелла на случай ненулевой массы фотона. Такие уравнения сформулировал в 1936 г. румынский физик Александр Прока (A. Proca, 1897–1955) (см. обзор [24]). В современной физике фотон играет чрезвычайно важную роль. Он служит переносчиком электромагнитных взаимодействий и является одним из "истинно фундаментальных" бозонов [25].

После опытов Комптона в 1924 г. Нильс Бор, Хендрик Крамерс (H. Kramers, 1894–1952) и Джон Слэтер (J. Slater, 1900–1976), анализируя процесс взаимодействия излучения с веществом и желая спасти волновые представления, пришли к выводу, что законы сохранения энергии и импульса должны соблюдаться в природе не в каждом элементарном акте взаимодействия, а лишь в среднем, статистически [10, с. 526]. По этой теории рассеяние излучения должно происходить непрерывно, а электроны отдачи должны испускаться совершенно случайно, причем рассеяние волн и вылет электронов отдачи между собой никак не коррелированы. Вскоре Вальтер Боте (W. Bothe, 1891–1957) и Ханс Гейгер (H. Geiger, 1882–1945) проверили эту гипотезу. Их опыты показали, что вылет примерно каждого одиннадцатого кванта излучения совпадает по времени с вылетом электрона отдачи. Тогда как чисто случайного совпадения этих двух актов следовало ожидать согласно расчетам лишь в одном из 10^5 случаев. Отсюда Боте и Гейгер заключили, что их опытные данные согласуются с результатами Комптона и противоречат гипотезе Бора, Крамерса и Слэтера. В это же время Комpton и Саймон (A.W. Simon) с помощью камеры Вильсона, которая позволяла определить и время, и направление вылета электрона отдачи, показали, что в среднем на каждый квант рассеянного излучения приходится один электрон отдачи.

В 1950 г. аналогичные эксперименты были выполнены с высокой точностью при использовании более совершенной аппаратуры. Хофштадтер и Макинтайр [26] убедительно показали, что "электроны отдачи и рассеянные фотоны появляются одновременно в пределах временного интервала менее $1,5 \times 10^{-8}$ с". Из экспериментов Кросса и Рамсея [27] следовало, что угол, под которым

электроны испускаются относительно направления вылета соответствующих рассеянных фотонов, отличается от угла, задаваемого законами сохранения, не более чем на $\pm 1^\circ$.

Другими словами, в элементарном процессе взаимодействия частиц вполне применимы законы сохранения энергии и импульса, как это и предполагал Комптон. Эйнштейн и Вольфганг Паули (*W. Pauli*, 1900–1958), свято верившие в строгое сохранение энергии и импульса, идею Бора, Крамерса и Слэтера считали чем-то вроде крамолы. По этому поводу Паули красноречиво сказал: "Я считаю величайшим счастьем то, что представление Бора, Крамерса и Слэтера было столь быстро опровергнуто благодаря превосходным экспериментам Боте и Гейгера, а также недавно опубликованным опытом Комптона. Разумеется, правильно считать, что даже если бы эти эксперименты не были поставлены, Бор перестал бы держаться за это представление. Но многие превосходные физики (как, например, Ладенбург, Ми, Борн) продолжали бы его придерживаться, и эта злосчастная статья Бора, Крамерса и Слэтера стала бы наверно тормозом прогресса теоретической физики" [13].

Бор действительно вскоре осознал свою ошибку и в июле 1925 г. написал [10, с. 560]: "Надежда получить указанным способом общую формулировку законов квантовой теории была бы лишена оснований после доказательства связи отдельных атомарных процессов. Эта связь в соответствии с квантовой теорией света Эйнштейна навязывает нам корпускулярную картину распространения света. При таком положении вещей нужно быть готовыми к тому, что желаемое обобщение классической электродинамики потребует решительной ломки понятий, лежавших до сих пор в основе описания природы". Ради справедливости надо отметить, что в "статье трех" [13, с. 526] было сказано также, что "волновой характер распространения света, с одной стороны, и его поглощение и испускание квантами, с другой стороны, являются теми экспериментальными фактами, которые следует положить в основу любой атомной теории и для которых не следует искать каких-либо объяснений".

Итак, к 1925 г. было твердо установлено, что в ряде физических явлений свет ведет себя как совокупность частиц с вполне определенными энергией и импульсом. С другой стороны, многочисленные эксперименты

XIX века по интерференции, дифракции и поляризации света столь же убедительно показали, что свет обладает волновыми свойствами. Так возникла острая проблема *корпускулярно-волнового дуализма* света, которая, казалось, загнала физику в тупик. Выход из этого тупика был найден позднее, когда была создана современная квантовая теория. Но это уже другая история, история "драмы идей", по словам Эйнштейна.

Список литературы

1. Planck M *Verhandl. Detsch. Phys. Ges.* **2** 237 (1900)
2. Planck M *Ann. Phys. (Leipzig)* **4** 553 (1901) [Планк М *Избранные труды* (М.: Наука, 1975) с. 251]
3. Планк М *Избранные труды* (М.: Наука, 1975) с. 282
4. Храмов Ю А *Физики. Биографический справочник* 2-е изд. (Под ред. А И Ахиезера) (М.: Наука, 1983) с. 216
5. Einstein A *Ann. Phys. (Leipzig)* **17** 132 (1905) [Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. III (М.: Наука, 1966) с. 92]
6. Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. III (М.: Наука, 1966) с. 164
7. Милантьев В П *Физическое образование в вузах* **8** (1) 10 (2002)
8. Einstein A *Ann. Phys. (Leipzig)* **20** 199 (1906) [Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. III (М.: Наука, 1966) с. 128]
9. Льюши М *История физики* (М.: Мир, 1970)
10. Бор Н *Избранные научные труды* Т. II (М.: Наука, 1971) с. 518
11. Джеммер М *Эволюция понятий квантовой механики* (М.: Наука, 1985) с. 187
12. Millikan R A *Phys. Rev.* **7** 18 (1916)
13. Дорфман Я Г *Всемирная история физики с начала XIX до середины XX вв.* (М.: Наука, 1979)
14. Бор Н *Избранные научные труды* Т. I (М.: Наука, 1970) с. 84; Милантьев В П *УФН* **174** 209 (2004)
15. Compton A H *Phys. Rev.* **21** 483 (1923)
16. Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 3 (М.: Наука, 1966) с. 58
17. Хунд Ф *История квантовой теории* (Киев: Наукова думка, 1980)
18. Lewis G N *Nature* **118** 874 (1926)
19. Клышко Д Н *УФН* **164** 1187 (1994)
20. Mitchell M W, Lundeen J S, Steinberg A M *Nature* **429** 161 (2004); Walther P et al. *Nature* **429** 158 (2004); Zhao Z et al. *Nature* **430** 54 (2004)
21. Edamatsu K, Shimizu R, Itoh T *Phys. Rev. Lett.* **89** 213601 (2002)
22. Leach J et al. *Phys. Rev. Lett.* **88** 257901 (2002)
23. Luo J et al. *Phys. Rev. Lett.* **90** 081801 (2003)
24. Tu L-C, Luo J, Gillies G T *Rep. Prog. Phys.* **68** 77 (2005)
25. Мухин К Н, Тихонов В Н *УФН* **171** 1201 (2001)
26. Hofstadter R, McIntyre J A *Phys. Rev.* **78** 24 (1950)
27. Cross W G, Ramsey N F *Phys. Rev.* **80** 929 (1950)

One hundred years of the photon

V.P. Milant'ev

Department of Experimental Physics, Peoples Friendship University of Russia,
ul. Miklukho-Maklaya 6, 117198 Moscow, Russian Federation
Tel. (7-095) 955-08 13. Fax (7-095) 952-11 86
E-mail: vmilantiev@sci.pfu.edu.ru

The origin of Einstein's light quantum hypothesis is described, followed by its evolution, through years of hard work, toward full recognition following the discovery of the photon.

PACS numbers: **01.65. + g**, **12.20. – m**, 14.70.Bh

Bibliography — 27 references

Received 10 June 2005

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **175** (11) 1233–1242 (2005)

Physics – Uspekhi **48** (11) (2005)