

---

---

# ЛЕКЦИЯ 1

---

## ВВЕДЕНИЕ В КВАНТОВУЮ ФИЗИКУ

XX век — век квантовой физики. Рождение квантовой физики было в 1900 году и связано с именем немецкого ученого Макса Планка. Эксперименты по излучению нагретого тела не соответствовали построенным тогда теориям. Планк за два дня придумал формулу, которая верно описывала излучение.

$$E = h\nu = \hbar\omega, \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}.$$

Но вывести эту формулу он не мог. Только когда он понял, что излучение может поглощаться или излучаться фиксированными порциями — квантами, он вывел эту формулу. То есть поглощение света — это поглощение кванта (затем они были названы фотонами).

Ньютон говорил, что не понимает, как свет может распространяться прямолинейно, если свет — это волна, а не частица. Юнг говорил, что свет — это волна, а Френель доказал, что свет распространяется прямолинейно, ведя себя как волна, но их никто не слушал, т.к. авторитет Ньютона был велик.

Герц показал, что при облучении металлических шариков светом, может произойти вылет электронов. Это внешний фотоэффект.

В 1902 году Ленард измерил интенсивность фототока от длины волны падающего света. Оказалось, что есть такая длина волны, больше которой, фотоэффект уже не возникает (см. рис. 1.1). Волновая физика не могла этого объяснить.

Эйнштейн дал этому обоснование. Для того, чтобы фотоэлектрон вылетел, нужно, чтобы:

$$\hbar\omega > W_{\text{вых}}, \quad E_{\text{кин}} = \hbar\omega - W_{\text{вых}}.$$

Но Эйнштейна никто не понял.

По сути Эйнштейн ввел, что свет — это частица, у которой есть энергия. А значит, есть и импульс.

$$E_{\text{фот}} = \hbar\omega,$$



Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

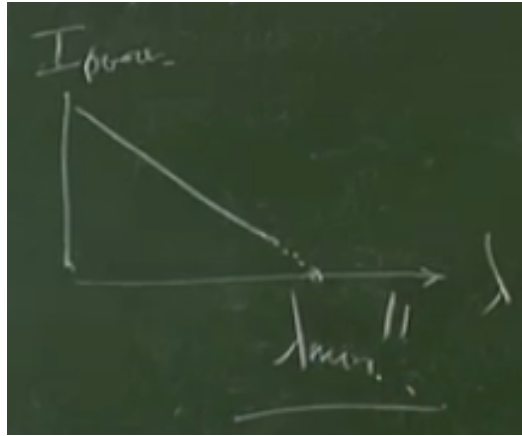


Рис. 1.1

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4.$$

— инвариант, из которого мы получим импульс.

Но масса фотона равна нулю, т. е.

$$p = \frac{E}{c} = \frac{\hbar\omega}{c} = \hbar k, \quad \text{где } k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

$$\begin{cases} E_{\text{фот}} = \hbar\omega, \\ p_{\text{фот}} = \hbar k. \end{cases}$$

Для частицы однозначно определяется траектория, импульс и энергия.

В 1926 году Комптон провел эксперимент (см. рис. 1.2). Рентгеновское излучение получалось при торможении электрона. Но помимо тормозного, в спектре есть характеристические линии высокой монохроматичности. Это излучение рассеивалось на углероде. Определить энергию можно с помощью дифракционной решетки (в случае рентгеновского излучения — это кристалл). В итоге, Комптон знал энергию падающих квантов и энергию полученных.

Должна быть линия, соответствующая упругому рассеянию, совпадающая с первоначальной. Но еще оказалась смещенная линия, энергия которой меньше (см. рис. 1.3). Причем для разных углов наблюдения рассеянного излучения сдвиг между этими компонентами различался. Комптон считал, что это как соударение бильярдных шариков.

Логично связать несмещенную компоненту с рассеянием на ядрах, а смещенную — на электронах.

Пусть фотон падает на электрон и рассеивается (см. рис. 1.4). Запишем законы сохранения для рассеяния фотона на электроне:

$$\hbar\omega + mc^2 - \hbar\omega' = E_e,$$

$$\vec{p} - \vec{p}' = \vec{p}_e.$$

Нужно вывести зависимость длины волны от угла. Домножим первое уравнение на  $\frac{1}{c}$  и возведем в квадрат. Второе уравнение тоже возведем в квадрат и вычтем. Получим

$$\frac{1}{c^2}(\hbar\omega + mc^2 - \hbar\omega')^2 - (\vec{p} - \vec{p}')^2 = \frac{E_e^2}{c^2} - p_e^2 = m^2 c^2,$$



Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)

**!** Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

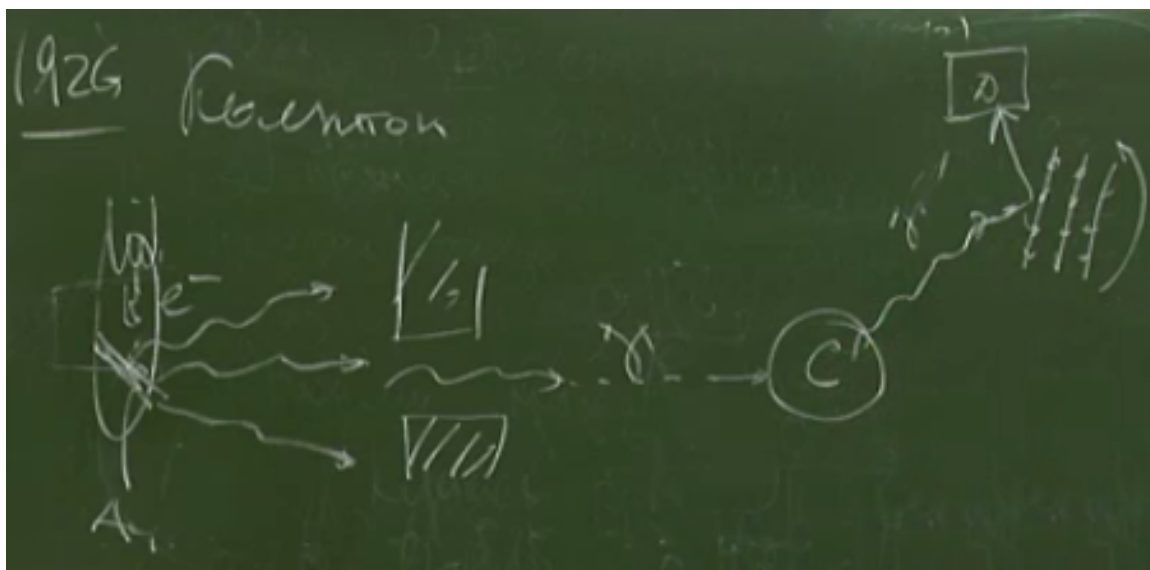


Рис. 1.2

$$m^2 c^2 = \left(\frac{\hbar\omega}{c}\right)^2 + \left(\frac{\hbar\omega'}{c}\right)^2 + m^2 c^2 + \frac{2}{c^2} (mc^2 \hbar\omega - mc^2 \hbar\omega' - \hbar\omega \hbar\omega') - p^2 - p'^2 + 2pp' \cos \vartheta.$$

После сокращений импульсов:

$$\hbar\omega' (mc^2 + \hbar) = mc^2 \hbar\omega + c^2 + \frac{\hbar\omega}{c} \frac{\hbar\omega}{c} \cos \vartheta.$$

**Формула Комптона:**

$$\omega' = \frac{\omega}{1 + \frac{\hbar\omega}{mc^2} (1 - \cos \vartheta)}.$$

Если  $\hbar\omega \ll mc^2$ , то ничего не происходит. Если переписать выражение для длин волн:

$$\lambda' = \lambda + \frac{2\pi\hbar}{mc} (1 - \cos \vartheta)$$

$$\lambda' = \lambda + \Lambda_c (1 - \cos \vartheta)$$

$$\Lambda = \frac{h}{mc} = 2 * 10^{-10} \text{ см}$$

— комптоновская длина волны.

$$\Lambda = \frac{h}{mc} = \frac{2\pi\hbar}{mc} = \frac{2\pi c}{\omega}.$$

В итоге мы столкнулись с тем, что фотон ведет себя и как волна, и как частица. Это явление получило название корпускулярно-волновой дуализм. В зависимости от того, что мы измеряем у фотона — получаем разные его свойства (частицы или волны).

Планк сказал, что с помощью фотонов происходит только испускание и поглощение света, а Эйнштейн сказал, что фотоны есть всегда, т. е.

$$E = N\hbar\omega.$$

**!** Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)

!

Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

4

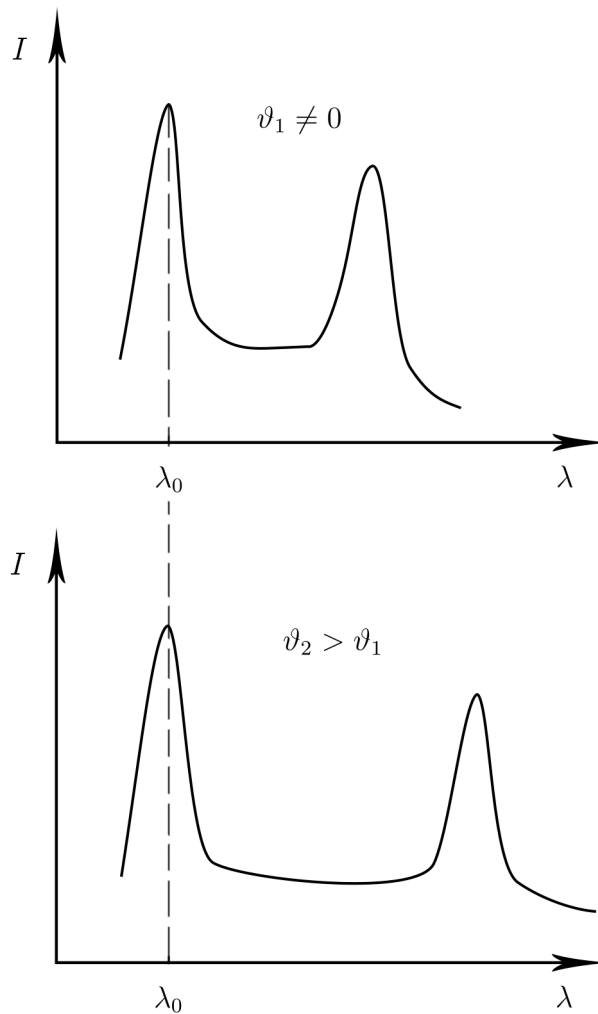


Рис. 1.3

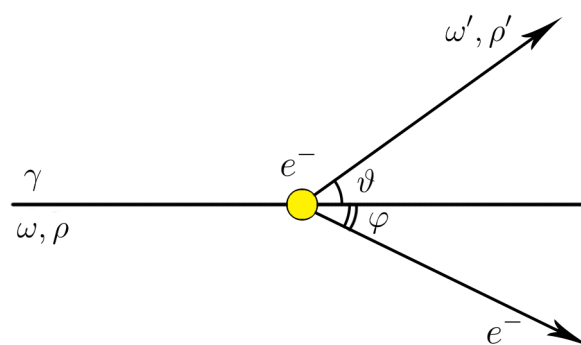


Рис. 1.4

Рассмотрим эксперимент. Имеется счетчик, в котором есть медный анод и катод (см. рис. 1.5). Работа выхода  $W_{\text{вых}} = 4,4$  эВ. На анод падает свет. Если на анод попадает ультрафиолетовый квант света или космическая частица, то счётчик срабатывает. Если зажечь свечку, то она будет испускать УФ излучение и счетчик начнет срабатывать чаще.

!

Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)

**!** Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

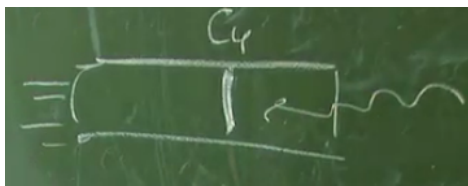


Рис. 1.5

Мы получили, что испускание квантов — это случайный процесс. Рассмотрим, как фотон взаимодействует с веществом:

$$\left. \begin{aligned} \hbar\omega + E &= \hbar\omega' + E', \\ \hbar k + p &= \hbar k' + p'. \end{aligned} \right\} \text{Квантование поля}$$

На самом деле мы столкнулись с тем, что первоначальный фотон поглотился, а вместо него родился уже другой, с другой энергией.

Проведём простой эксперимент. Имеется источник излучения и счетчик. Пороговая энергия счетчика  $E_{\text{пор}} = \frac{2}{3}\hbar\omega$ . Если поставим между ними полупрозрачное зеркало, то счетчик будет регистрировать в два раза меньше квантов, т.е. фотоны не делятся, а какие-то проходят, какие-то — нет (см. рис. 1.6).

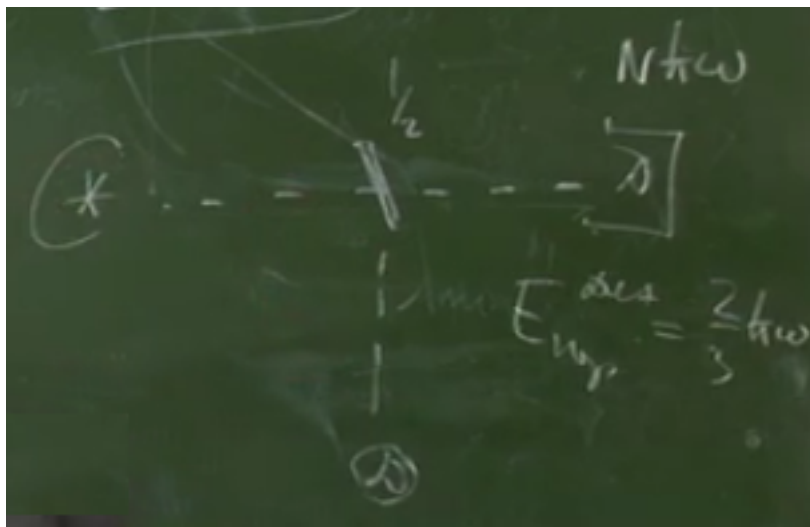


Рис. 1.6

Все процессы взаимодействия фотонов с веществом — есть процессы рождения и уничтожения квантов.

Рассмотрим процесс взаимодействия фотона и свободного, покоящегося электрона (см. рис. 1.7). Законы сохранения энергии и импульса:

$$\left. \begin{aligned} \hbar\omega &= \frac{mv^2}{2}, \\ \frac{\hbar\omega}{c} &= mv. \end{aligned} \right\} v = 2c$$

**!** Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)

**!** Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки.  
Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

6

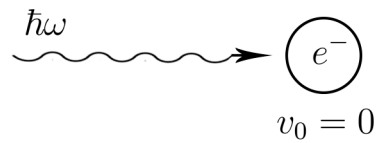


Рис. 1.7

Фотоэффект возможен за счет того, что электрон связан с кристаллом.

Поскольку  $E \propto \frac{1}{r^2}$ , то если мы увеличиваем расстояние до источника излучения, то на языке квантов, вероятность зафиксировать фотон уменьшается.

**!** Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой.  
Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на  
[pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)

7

!

*Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки.  
Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).*

В общем случае для энергии

$$\frac{1}{8\pi} \int_{V_0} (E^2 + B^2) dV = N * \hbar\omega \equiv W_{\text{регистр}},$$

то есть энергия — это число квантов, умноженное на энергию кванта.

Но распространение фотонов в пространстве подчиняется уравнениям Максвелла, поэтому они никуда не исчезают.

!

*Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой.  
Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на  
[pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)*