

Лекция 4
22 сентября 2026 года

Масса и импульс фотона. Единство корпускулярных и волновых свойств света

Используя соотношения $E^2 = m_0^2 c^4 + p_\gamma^2 c^2$, $\varepsilon_0 = m_\gamma c^2$, $m_0 = 0$, получаем выражения для **энергии**, **массы** и **импульса** фотона:

$$\varepsilon_0 = h\nu, \quad m_\gamma = \frac{h\nu}{c^2}, \quad p_\gamma = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Эти соотношения связывают квантовые (**корпускулярные**) характеристики фотона – массу, импульс и энергию – с **волновой** характеристикой света – его частотой.

Свет обладает **одновременно волновыми** свойствами, которые проявляются в закономерностях его распространения, интерференции, дифракции, поляризации, и **корпускулярными**, которые проявляются в процессах взаимодействия света с веществом (испускания, поглощения, рассеяния).



Давление света

Если фотоны обладают импульсом, то свет, падающий на тело, должен оказывать на него давление.

Пусть поток монохроматического излучения частоты ν падает перпендикулярно поверхности. Если за 1 с на 1 м^2 поверхности тела падает N фотонов, то при коэффициенте отражения ρ света от поверхности тела отразится ρN фотонов, а $(1 - \rho)N$ фотонов – поглотится. Каждый поглощённый фотон передаёт поверхности импульс p_γ , а каждый отражённый фотон – $2p_\gamma$.

Давление света на поверхность равно импульсу, который передают поверхности за 1 с N фотонов:

$$p = \frac{2h\nu}{c}\rho N + \frac{h\nu}{c}(1 - \rho)N = (1 + \rho)\frac{h\nu}{c}N.$$

Энергетическая освещённость поверхности $Nh\nu = E_e$ (энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени). Объёмная плотность энергии излучения: $w = \frac{E_e}{c}$. Отсюда: $p = \frac{E_e}{c}(1 + \rho) = w(1 + \rho)$.

Давление света

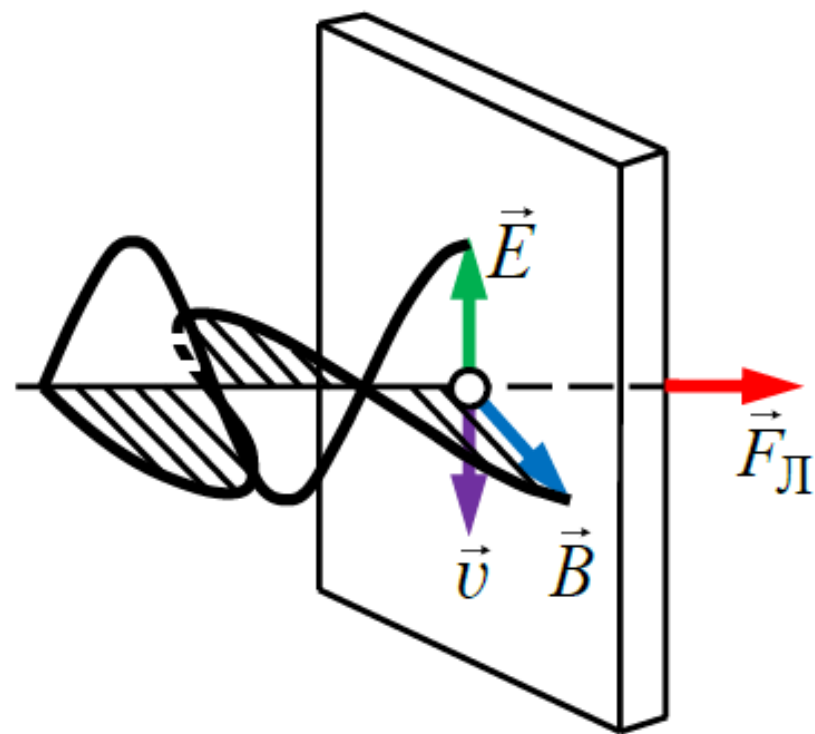
Если фотоны обладают импульсом, то свет, падающий на тело, должен оказывать на него давление.

Пусть поток монохроматического излучения частоты ν падает перпендикулярно поверхности. Если за 1 с на 1 м^2 поверхности тела падает N фотонов, то при коэффициенте отражения ρ света от поверхности тела отразится ρN фотонов, а $(1 - \rho)N$ фотонов – поглотится. Каждый поглощённый фотон передаёт поверхности импульс p_γ , а каждый отражённый фотон – $2p_\gamma$.

Давление света на поверхность равно импульсу, который передают поверхности за 1 с N фотонов:

$$p = \frac{2h\nu}{c}\rho N + \frac{h\nu}{c}(1 - \rho)N = (1 + \rho)\frac{h\nu}{c}N.$$

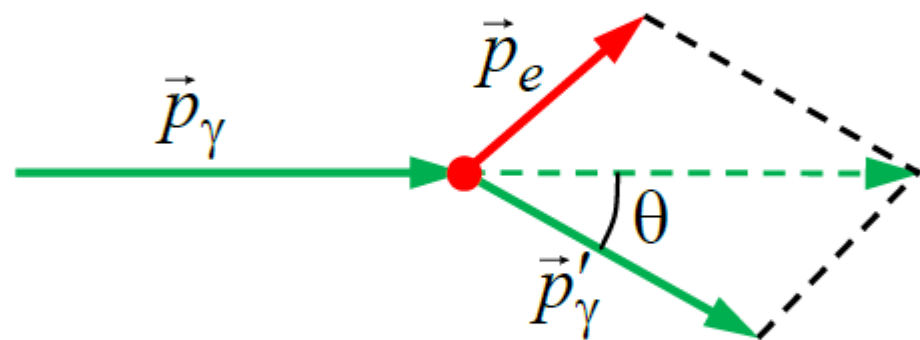
Энергетическая освещённость поверхности $Nh\nu = E_e$ (энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени). Объёмная плотность энергии излучения: $w = \frac{E_e}{c}$. Отсюда: $p = \frac{E_e}{c}(1 + \rho) = w(1 + \rho)$.



Волновая теория света на основании уравнений Максвелла приходит к такому же выражению. Давление света в волновой теории объясняется тем, что под действием электрического поля $\vec{E}$ электромагнитной волны электроны в металле будут двигаться в направлении (обозначенном $\vec{v}$ на рисунке) противоположном $\vec{E}$. Магнитное поле $\vec{B}$ электромагнитной волны действует на движущиеся электроны с силой Лоренца в направлении (по правилу левой руки) перпендикулярном поверхности металла. Таким образом, электромагнитная волна оказывает на поверхность металла давление.

Эффект Комптона

Корпускулярные свойства света отчётливо проявляются в **эффекте Комптона** – упругом рассеянии коротковолнового электромагнитного излучения (рентгеновского и γ -излучений) на свободных (или слабосвязанных) электронах вещества, **сопровожающееся увеличением длины волны**. Это увеличение $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ не зависит от длины волны λ падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только углом рассеяния θ :



$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_C \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

где λ' – длина волны рассеянного излучения, λ_C – **комптоновская длина**

волны. При рассеянии на электроне:

$$\lambda_C^e = \frac{h}{m_e c} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

Фотон (с энергией $\varepsilon_\gamma = h\nu$ и импульсом $p_\gamma = h\nu/c$), столкнувшись с электроном (энергия покоя $W_0 = m_e c^2$, m_e – масса покоя электрона), передаёт ему часть своей энергии и импульса и изменяет направление движения (рассеивается).

В процессе этого **упругого** столкновения выполняются законы сохранения энергии $W_0 + \varepsilon_\gamma = W + \varepsilon'_\gamma$ и импульса $\vec{p}_\gamma = \vec{p}_e + \vec{p}'_\gamma$, где

$W = \sqrt{p_e c^2 + m_e^2 c^4}$ – релятивистская энергия электрона после столкновения,

Таким образом: $m_e c^2 + h\nu = \sqrt{p_e c^2 + m_e^2 c^4} + h\nu'$,

$p_e^2 = p_\gamma^2 + p_\gamma'^2 - p_\gamma p_\gamma' \cos \theta = (h\nu/c)^2 + (h\nu'/c)^2 - 2(h^2/c^2) \cos \theta$. Следовательно-

но, $m_e c^2 (\nu - \nu') = h\nu\nu' \cos \theta$. С учётом $\nu = c/\lambda$, получим $\Delta\lambda = 2\lambda_C \sin^2(\theta/2)$.

Эффект Комптона *не может наблюдаться в видимой области спектра*, поскольку энергия фотона видимого света сравнима с энергией связи электрона с атомом, при этом даже внешний электрон атома нельзя считать свободным.

Эффект Комптона, излучение чёрного тела и фотоэффект служат доказательством **квантовых** (корпускулярных) представлений о свете как о потоке фотонов.

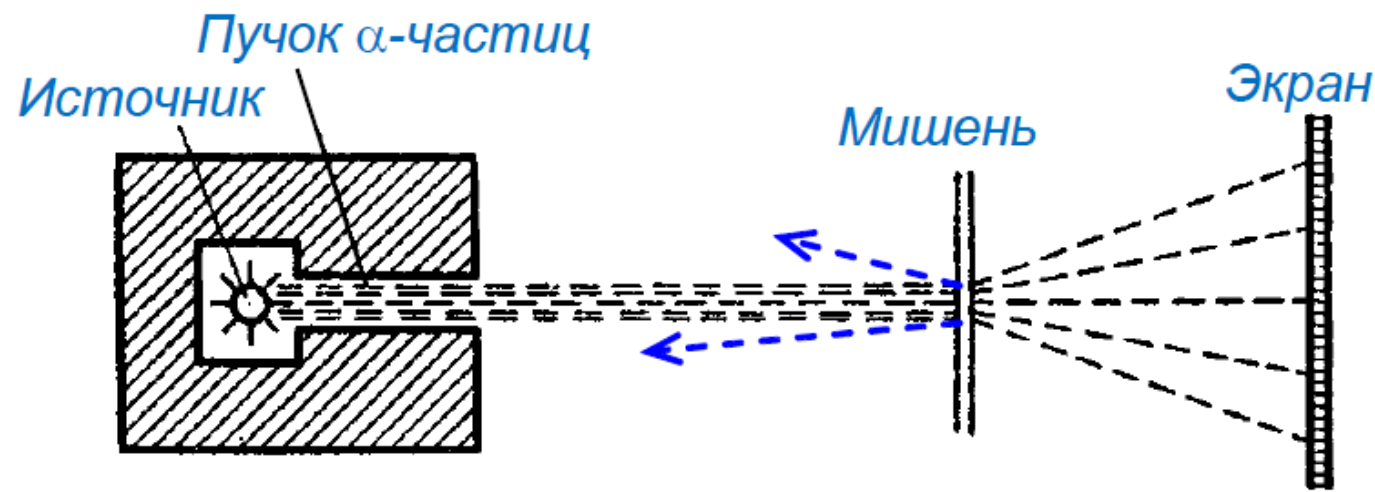
Строение атома

1. Модели атома Томсона и Резерфорда

Представление об атомах, как о *неделимых мельчайших частицах вещества* возникло ещё в античные времена.

Дж. Дж. Томсон, исследуя отклонение в электрических и магнитных полях частиц, испускаемых под действием света (фотоэффект) *открыл электрон*. Поскольку *масса электрона* оказалась в *десятки тысяч раз меньше масс атомов*, Томсон предложил **модель строения атома**, согласно которой атом представляет собой непрерывно заряженный положительным зарядом шар диаметром $\sim 10^{-10}$ м, в который "вкраплены" электроны ("как изюм в пудинг"). Гармонические колебания электронов около положений равновесия (гармонические осцилляции) являются причиной излучения (или поглощения) монохроматических волн атомами.

Однако в экспериментах **Ленарда** по рассеянию электронов и в экспериментах **Резерфорда** по рассеянию α -частиц на тонких металлических



плёнках, было показано, что почти все частицы проходили через фольгу, без рассеяния или отклоняясь на очень малые углы порядка $1-3^\circ$. И только некоторые из них (одна из 10000) отклонялись на

большие углы, порядка $135-180^\circ$. Поскольку α -частица в 7300 раз тяжелее электрона, то причиной такого рассеяния не может быть её рассеяние на электронах. Резерфорд предположил, что рассеяние α -частицы происходит на положительном заряде большой массы – "**ядре**" атома, размер которого очень мал по сравнению с объёмом атома (диаметр $\sim 10^{-14}$ м). (Например, в 1 м^3 платины "объем" ядер равен $0,3 \text{ мм}^3$.)

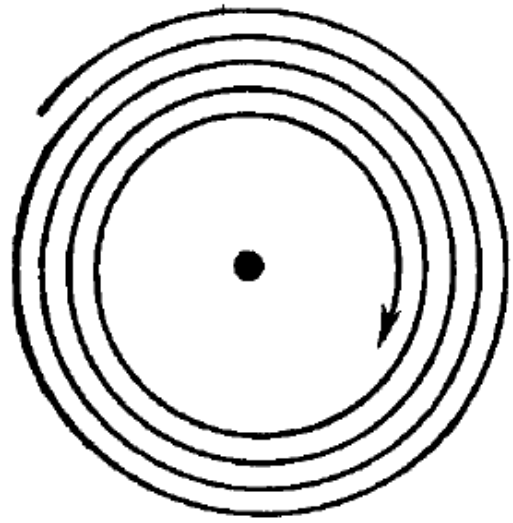
Поэтому в атоме, подавляющая часть которого состоит из пустого пространства, электроны не могут находиться в статическом равновесии. Их устойчивость может быть только динамической, как у планет в астрономии.

Резерфорд предложил **планетарную модель атома**. Согласно Резерфорду, атом представляет собой систему зарядов, в *центре* которой расположено **положительное ядро** с зарядом Ze , размером 10^{-15} – 10^{-14} м и массой, практически равной массе атома, а *вокруг ядра*, в области с линейными размерами $\sim 10^{-10}$ м, по *замкнутым орбитам* движется Z электронов, образуя **электронную оболочку атома**.

Второй закон Ньютона для электрона, движущегося по окружности под действием кулоновской силы:

$$\frac{Ze \cdot e}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_e v^2}{r},$$

где m_e и v – масса и скорость электрона на орбите радиуса r , ϵ_0 – электрическая постоянная. При $r \approx 10^{-10}$ м скорость движения электронов $v \approx 10^6$ м/с, а ускорение $v^2/r \approx 10^{22}$ м/с². Согласно классической электродинамике, ускоренно движущиеся электроны должны *излучать* электромагнитные волны и



вследствие этого непрерывно *терять* энергию. В результате электрон будет приближаться к ядру и, в конечном счёте, *упадёт на ядро*.

Кроме того, классическая планетарная модель атома *не объясняет **линейчатого спектра** атомов*.

2. Линейчатый спектр атома водорода

Экспериментальное исследование спектров излучения разреженных газов (отдельных атомов) показали, что характерный *линейчатый* спектр каждого элемента представляет собой *серии линий*, положение которых может быть описано простыми эмпирическими формулами. Так, положение линий атома водорода в видимой области спектра описываются **формулой Бальмера**:

$$\frac{1}{\lambda} = R' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \text{ или } \left(\nu = \frac{c}{\lambda} \right) \text{ для частот: } \nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 3, 4, 5, \dots),$$

где $R' = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$, $R = R' \cdot c = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ – **постоянная Ридберга**.

Позднее, в ультрафиолетовой области была обнаружена

$$\text{серия Лаймана:} \quad \nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 2, 3, 4, \dots),$$

а в инфракрасной области:

$$\text{серия Пашена:} \quad \nu = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 4, 5, 6, \dots),$$

$$\text{серия Брэкета:} \quad \nu = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 5, 6, 7, \dots),$$

$$\text{серия Пфунда:} \quad \nu = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 6, 7, 8, \dots),$$

$$\text{серия Хэмфри:} \quad \nu = R \left(\frac{1}{6^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 7, 8, 9, \dots).$$

Все эти серии могут быть описаны **обобщённой формулой Бальмера**:

$$\nu = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ определяет **серию**, а $n = m + 1, m + 2, \dots$ определяет отдельные **линии** этой серии. С увеличением n линии серии сближаются; значение $n = \infty$ определяет **границу серии**, к которой со стороны бóльших частот примыкает сплошной спектр.

Аналогичные серии были выделены в линейчатых спектрах других атомов.

3. Постулаты Бора

Для объяснения закономерностей в линейчатых спектрах Бор объединил планетарную модель атома Резерфорда с гипотезой Планка о квантовой природе света. Теория атома Бора основывается на **двух постулатах**:

(I) Первый постулат Бора (*постулат стационарных состояний*): **существуют стационарные** (не изменяющиеся со временем) **состояния атома, находясь в которых он не излучает энергии**. Стационарным состояниям атома соответствуют *стационарные орбиты*, по которым движутся электроны. Каждое стационарное состояние характеризуется **определённым** (дискретным) значением энергии. Движение электронов по стационарным орбитам *не сопровождается* излучением электромагнитных волн.

Правило квантования орбит Бора утверждает, что в стационарном состоянии атома электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь квантованные значения момента импульса, удовлетворяющие условию

$$m_e v r_n = n \hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

где m_e – масса электрона, v – его скорость на n -й орбите радиуса r_n , $\hbar = h/(2\pi)$.

(II) Второй постулат Бора (правило частот): при переходе атома из одного состояния в другое испускается или поглощается один фотон с энергией

$$h\nu = E_n - E_m,$$

равной разности энергий соответствующих стационарных состояний.

Излучение ($E_m < E_n$) происходит при переходе атома из состояния с бóльшей энергией в состояние с меньшей энергией (при переходе электрона с орбиты более удалённой от ядра на ближнюю к ядру орбиту).

Поглощение фотона ($E_m > E_n$) сопровождается переходом атома в состояние с бóльшей энергией (переход электрона на более удалённую от ядра орбиту).

Набор всевозможных дискретных частот квантовых переходов:

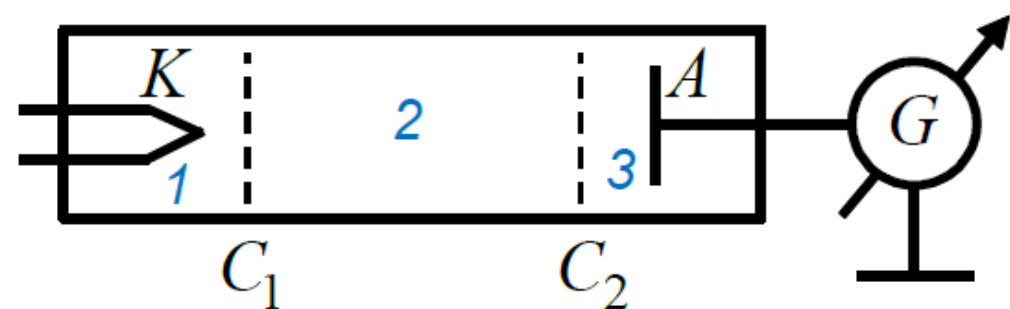
$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h}$$

определяет **линейчатый спектр атома.**

4. Опыты Франка и Герца

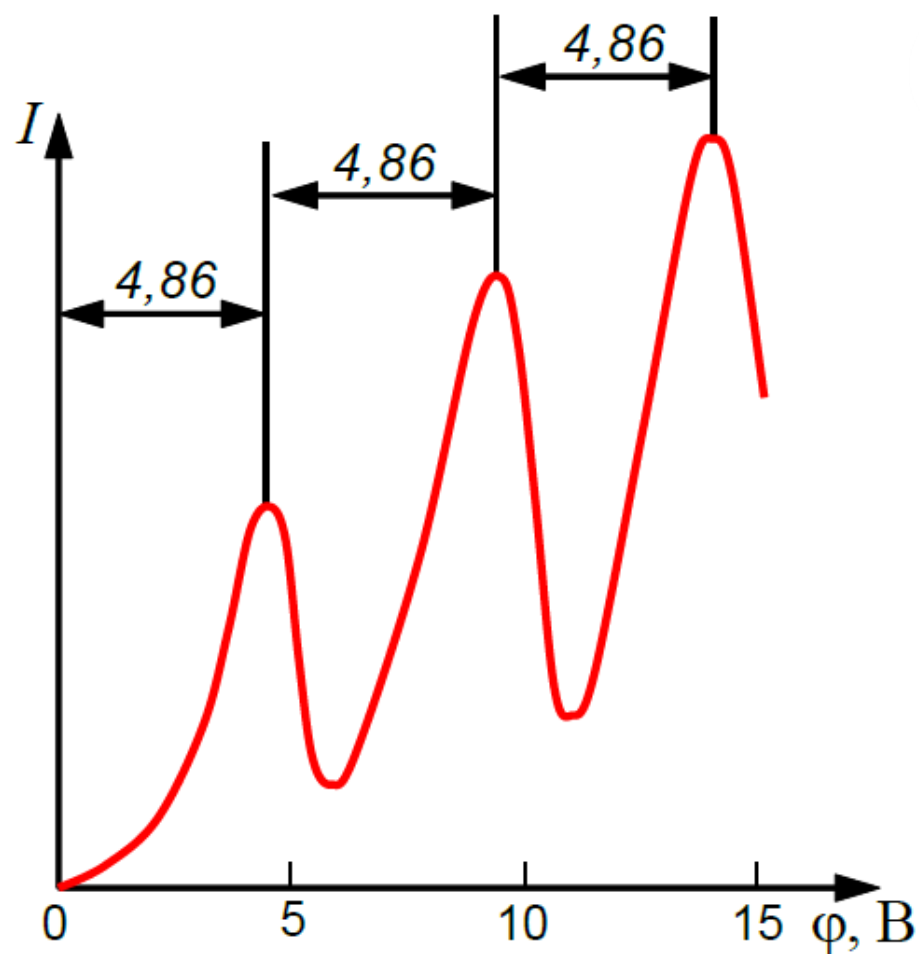
В опытах Франка и Герца было экспериментально доказано существование в атомах стационарных состояний.

Электроны, эмитированные катодом K , разгоняются в области 1 под



действием ускоряющей разности потенциалов φ между катодом и сеткой C_1 . В области 2 электроны проходят через пары ртути и достигают анода A . Первое возбуждённое состояние атома ртути имеет энергию

4,86 эВ. При увеличении ускоряющего потенциала φ до этой величины, соударения электронов с атомами становятся неупругими: электрон отдаёт кинетическую энергию атому, возбуждая переход из основного энергетического состояния в первое возбуждённое состояние (**поглощение** энергии атомами ртути) – ток в установке резко уменьшается.



При дальнейшем увеличении ϕ подобное же поведение тока наблюдается при энергиях, кратных $\Delta E = 4,86$ эВ, когда электроны испытывают 2, 3, 4... неупругих соударений. Таким образом, в атоме действительно существуют стационарные состояния (*подтверждение первого постулата Бора*).

Возбуждённые атомы ртути, переходя в основное состояние, **излучают** кванты света с длиной волны $\lambda = hc/\Delta E = 255$ нм (*подтверждение второго постулата Бора*).