

Российский государственный университет
нефти и газа им.И.М.Губкина

Учебно-научный центр
довузовской подготовки

Центр дистанционного обучения

Кафедра физики

А. Черноуцан

профессор кафедры физики
заместитель главного редактора журнала « КВАНТ »

ФИЗИКА

**Учебно-справочное пособие
для старшеклассников и абитуриентов**

Оглавление

Глава 6. Квантовая физика	139
§ 1. Световые кванты	139
§ 2. Атом и атомное ядро	141

Глава 6. Квантовая физика

§ 1. Световые кванты

► **Фотоэффект.** Вырывание электронов из вещества под действием света называют *фотоэффектом*. Для изучения фотоэффекта используют вакуумную лампу с холодным катодом (в этом случае термоэлектронную эмиссию можно не учитывать). Облучая катод светом фиксированной частоты и интенсивности (рис. 87), снимают вольтамперную характеристику лампы (зависимость тока от анодного напряжения). По вольтамперной характеристике (рис. 88) узнают а) число электронов, вырываемых из катода в единицу времени (оно выражается через ток насыщения: $N = I_{\text{нас}}/e$) и б) максимальную кинетическую энергию вырываемых электронов; она выражается через *задерживающее напряжение*, т.е. анодное напряжение, при котором ток обращается в ноль:

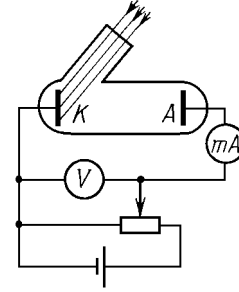


Рис. 87

$$\frac{mv^2}{2} = eU_{\text{зад}}$$

При этом напряжении даже самые быстрые электроны не могут долететь до анода.

► **Законы фотоэффекта.** Законы фотоэффекта были открыты Столетовым. *Первый закон:* количество электронов, вырываемых светом из металла в единицу времени, прямо пропорционально интенсивности световой волны. *Второй закон:* максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от интенсивности света. *Третий закон:* если частота света меньше определенной для данного вещества минимальной частоты ν_m , то фотоэффект не наблюдается (*красная граница фотоэффекта*). Экспериментально было обнаружено, что зависимость $eU_{\text{зад}}$ от ν для данного металла имеет вид наклонной прямой, причем наклон прямых, построенных для разных металлов, оказался одинаковым (рис. 89).

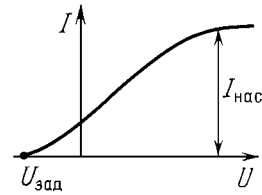


Рис. 88

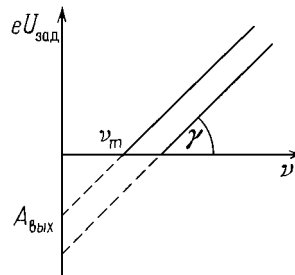


Рис. 89

► **Кванты света.** Объяснение законов фотоэффекта было дано Эйнштейном в 1905 г. Он исходил из гипотезы квантов света, выдвинутой в 1900 г. Планком для объяснения законов теплово-

го излучения: испускание или поглощение света данной частоты происходит порциями — *квантами*. Энергия квантов частоты ν равна

$$\Delta E = h\nu,$$

где $h \approx 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — новая константа, названная *постоянной Планка*. При объяснении фотоэффекта Эйнштейн усилил эту гипотезу, предположив, что кванты света поглощаются целиком отдельными электронами. Это означает, что свет ведет себя аналогично потоку частиц (их назвали *фотонами*) с энергией

$$E_\nu = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

где $\hbar = h/2\pi$ (аш с чертой). Как любая частица, *квант света* — *фотон* — обладает импульсом (см. формулу (0) главы 6):

$$p_\nu = \frac{E_\nu}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (2)$$

Квантовые свойства света проявляются при испускании, поглощении и рассеянии света. В явлениях, связанных с распространением света, проявляются его волновые свойства. Свет обладает двойственной природой (корпускулярно-волновой дуализм). Такие же свойства проявляют все элементарные частицы.

► **Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.** Поглощая квант света, электрон приобретает энергию $h\nu$. При вылете из металла энергия каждого электрона уменьшается на определенную величину, которую называют *работой выхода*. ($A_{\text{вых}}$ — работа, которую необходимо затратить, чтобы удалить электрон из металла. Работа выхода зависит от рода вещества.) Максимальная энергия электронов после вылета (если нет других потерь) имеет вид

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - A_{\text{вых}} \quad (3)$$

(уравнение Эйнштейна). Если $h\nu < A_{\text{вых}}$, то фотоэффекта не происходит. Значит, *красная граница фотоэффекта* равна

$$\nu_m = \frac{A_{\text{вых}}}{h}.$$

Из (3) видно, что наклон прямых на графике $eU_{\text{зад}}$ от ν (рис. 89) равен h , а отрезок, отсекаемый прямой от оси ординат, равен работе выхода.

Фотоэффект используется при создании фотоэлементов, фотореле и т.д.

Вопрос. Существование работы выхода означает, что на границе металла возникают силы, удерживающие электрон внутри металла. Как объяснить притяжение электрона к электронейтральному металлу?

Ответ. Заряженная частица притягивается наведенными на поверхности проводника зарядами противоположного знака. Сила притяжения вычисляется с помощью метода электростатических изображений (глава 3, стр. 0). Вылетающие и возвращающиеся электроны образуют возле поверхности отрицательно заряженное облако. Между отрицательно заряженным слоем электронов вне металла и положительным наведенным зарядом на его поверхности образуется электрическое поле, напряженность которого направлена наружу.

► **Давление света.** Давление света было предсказано Максвеллом на основе электромагнитной теории и измерено Лебедевым. Установка Лебедева состояла из легкого стержня, подвешенного в вакууме на тонкой нити. По краям стержня были закреплены две тонких пластинки — одна отражающая, другая поглощающая. Освещая пластинки и измеряя закручивание нити, он вычислял световое давление.

Электромагнитная теория давала следующее объяснение световому давлению: электрическое поле электромагнитной волны вызывает в металле ток, на который действует сила Ампера со стороны магнитного поля волны; эта сила направлена в сторону распространения волны и является причиной светового давления. Гораздо проще выглядит объяснение давления на языке световых квантов: фотоны, каждый из которых обладает импульсом (2), поглощаются или отражаются, передавая свой импульс веществу. При отражении фотона переданный импульс в два раза больше, чем при поглощении.

§2. Атом и атомное ядро

► **Опыты Резерфорда.** *Опыты Резерфорда* сыграли решающую роль в формировании ядерной модели атома. Цель опытов: выяснить распределение в атоме положительного заряда, в котором заключена почти вся масса атома (кроме массы электронов). Постановка эксперимента: бомбардировка α -частицами атомов тяжелых элементов (α -частицы — ядра атомов гелия, излучаемые в радиоактивном распаде с энергией в несколько МэВ). Главный качественный результат: обнаружены единичные случаи рассеяния α -частиц назад (на углы больше 90°). Анализ: если бы α -частица налетала на тяжелый точечный заряд q , то точку разворота ($v_\alpha = 0$) можно было бы найти из закона сохранения энергии: $m_\alpha v_\alpha^2/2 = kq_\alpha q/R_{\text{ост}}$. Подсчет показывает, что $R_{\text{ост}} \sim 10^{-12}$ см. Такой же результат — отражение в точке $r = R_{\text{ост}}$ — останется в силе, если положительный заряд размазан по шарикку радиусом $R < R_{\text{ост}}$. Если же размеры области положительного заряда заметно превышают $R_{\text{ост}}$, то α -частица проникает в эту область, сила

отталкивания уменьшается (внешние слои не создают напряженности — см. § 1 гл. 3), и отражения не происходит. Вывод: положительный заряд атома и почти вся его масса сконцентрированы в области размерами менее 10^{-12} см, что в десятки тысяч раз меньше размеров атома (10^{-8} см); эту область называют *ядром атома*.

► **Ядерная (планетарная) модель атома.** В атоме с порядковым номером Z заряд ядра равен Ze ; вокруг ядра по различным орбитам вращается Z электронов. Радиусом атома называют радиус орбиты внешних электронов. Главная трудность такой *планетарной модели атома* (модель Резерфорда) состоит в том, что при движении с ускорением электрон должен непрерывно излучать электромагнитные волны; расчет показывает, что за время 10^{-8} с электрон должен потерять всю энергию и упасть на ядро.

► **Квантовые постулаты Бора.**

1. Атомная система может находиться в особых *стационарных*, или квантовых, *состояниях*, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n . В стационарных состояниях атом не излучает.

2. *Излучение света* происходит при переходе атома из состояния с большей энергией E_k в состояние с меньшей энергией E_n . Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний (см. (1)):

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n.$$

► **Модель Бора для атома водорода.** Электрон, движущийся по круговой орбите, подчиняется второму закону Ньютона:

$$m \frac{v^2}{r} = k \frac{e^2}{r^2}$$

(v^2/r — центростремительное ускорение, ke^2/r^2 — сила кулоновского притяжения электрона к ядру). Для определения разрешенных орбит Бор ввел еще один постулат — *правило квантования*:

$$mvr = n\hbar,$$

где n — номер орбиты, $\hbar = h/2\pi$. Решая эти уравнения, находим радиус n -й орбиты r_n и скорость электрона на этой орбите v_n :

$$r_n = \frac{\hbar^2 n^2}{mke^2}, \quad v_n = \frac{ke^2}{n\hbar}.$$

Энергия электрона на n -й орбите есть сумма кинетической и потенциальной энергий:

$$E_n = \frac{mv_n^2}{2} - k \frac{e^2}{r_n}.$$

Подставляя сюда r_n и v_n , получаем

$$E_n = -\frac{m(ke^2)^2}{2\hbar^2 n^2}.$$

Состояние с наименьшей энергией ($n = 1$) называют *основным*, остальные состояния называют *возбужденными*. Энергия основного состояния E_1 и радиус орбиты электрона в этом состоянии (радиус атома водорода) равны

$$E_1 = -\frac{m(ke^2)^2}{2\hbar^2} \approx -21,7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = -13,6 \text{ эВ},$$

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{mke^2} \approx 0,53 \cdot 10^{-8} \text{ см}.$$

Чтобы ионизовать атом в основном состоянии, электрону надо сообщить энергию $|E_1|$; эту энергию называют *энергией ионизации*.

Для частоты излученного света получаем:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = \frac{m(ke^2)^2}{4\pi\hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) = R_\nu \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right),$$

где $R_\nu = m(ke^2)^2/(4\pi\hbar^3)$ называют *постоянной Ридберга* (для частоты). Часто используют формулу:

$$\frac{1}{\lambda_{kn}} = R_\lambda \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right),$$

где $R_\lambda = R_\nu/c = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ — постоянная Ридберга для обратной длины волны. В видимой части спектра наблюдаются линии, соответствующие переходам с уровней 3, 4, 5 и 6 на уровень 2, т.е. четыре линии из так называемой серии Бальмера. При поглощении фотона атом переходит в стационарное состояние с большей энергией.

► **Лазеры.** Лазеры используются для получения когерентных световых пучков высокого качества. Действие лазера основано на явлении *индуцированного излучения* (рассмотренного Эйнштейном), т.е. на излучении атомом кванта света под действием падающего света. Самопроизвольное излучение возбужденного атома без внешнего воздействия называют *спонтанным*. Световой квант, возникший при индуцированном излучении, имеет такую же частоту, фазу и поляризацию, как и падающий (падающий и излученный свет когерентны). Однако фотоны не только вызывают индуцированное излучение возбужденных атомов, но и поглощаются невозмущенными

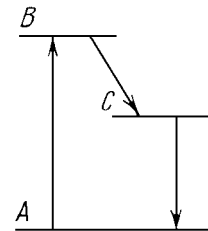


Рис. 90

атомами. Чтобы число квантов возросло, возбужденных атомов должно быть больше, чем невозбужденных (инверсная заселенность уровней). В рубиновом лазере инверсная заселенность создается с помощью трехуровневой системы, т.е. атомы переводят из невозмущенного состояния A (см. рис. 90) в состояние B с малым временем жизни, после чего часть атомов переходит не обратно в A , а в долгоживущее состояние C . Когда атомов C станет больше, чем атомов A , на переходе из C в A начинает работать лазер.

► **Состав ядра атома.** Ядро состоит из *протонов* (заряд $+e$, масса $m_p \approx 1,673 \cdot 10^{-27}$ кг) и *нейтронов* (заряд равен нулю, масса $m_n \approx 1,675 \cdot 10^{-27}$ кг). Заряд ядра равен Ze , где Z — число протонов. Массовое число A равно полному числу частиц в ядре: $A = Z + N$, где N — число нейтронов. *Нуклоны* (протоны и нейтроны) удерживаются в ядре короткодействующими силами большой величины — ядерными силами. При малых A наиболее устойчивы ядра с $N = Z$, при больших A число нейтронов N заметно превышает число протонов. Для обозначения ядер используют запись: A_ZX .

Изотопами называют ядра, имеющие одинаковый заряд, но различную массу. Изотопы есть у всех элементов; вещество представляет собой смесь изотопов в определенной пропорции. У некоторых ядер есть только один стабильный изотоп, а остальные — радиоактивные; начиная с полония ($Z = 84$), все изотопы элементов радиоактивны. Пример. Изотопы водорода: стабильный дейтерий ${}^2_1\text{H}$ и β -радиоактивный тритий ${}^3_1\text{H}$.

► **Радиоактивность.** Радиоактивность — испускание ядрами некоторых элементов различных частиц (α -частиц, электронов, γ -квантов), сопровождающееся переходом ядра в другое состояние и изменением его параметров. Момент времени, когда такое превращение испытает данное ядро, непредсказуем; однако каждую секунду распадается определенная доля ядер. Число распадов в единицу времени называют *активностью*. Время $T_{1/2}$, через которое распадется половина ядер (и, соответственно, активность упадет в 2 раза), называют *периодом полураспада*. *Закон радиоактивного распада* дает количество нераспавшихся ядер N от времени:

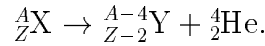
$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

(при $t = T_{1/2}$ получаем $N = N_0/2$). Для урана $T_{1/2} \approx 4,5$ млрд. лет, для радия $T_{1/2} \approx 1600$ лет; поэтому радий на Земле давно распался, и его можно получать только искусственно.

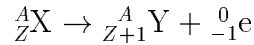
► **Виды радиоактивного распада.**

1. Альфа-распад. α -распад представляет собой излучение α -частиц (ядер гелия ${}^4_2\text{He}$) высокой энергии. Масса ядра уменьшается

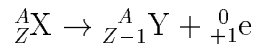
на 4 единицы, а заряд (порядковый номер элемента) — на 2 единицы (правило смещения):



2. Бета-распад. β^- -распад — излучение электрона:



и β^+ -распад — излучение позитрона:



(позитрон — античастица электрона — имеет такую же массу m_e , но положительный заряд $+e$). Порядковый номер ядра изменяется на единицу, массовое число не изменяется.

3. Гамма-излучение. γ -излучение представляет собой испущенные возбужденным ядром кванты света высокой частоты (γ -кванты). Параметры ядра при γ -излучении не меняются, ядро лишь переходит в состояние с меньшей энергией.

Распавшееся ядро обычно тоже радиоактивно, т.е. происходит цепочка последовательных радиоактивных превращений. Радиоактивное излучение обычно представляет собой смесь всех трех видов излучений.

► **Методы наблюдения и регистрации заряженных частиц.** Большинство методов основано на использовании систем в долгоживущем неустойчивом состоянии, в которых под действием пролетающей заряженной частицы происходит переход в устойчивое состояние.

Счетчик Гейгера основан на ударной ионизации газа; он фиксирует только факт пролета частицы.

В *камере Вильсона* используется пересыщенный пар. Камера фиксирует траекторию заряженной частицы: вдоль траектории возникают ионы, на которых конденсируются капельки жидкости.

Пузырьковая камера содержит перегретую жидкость. Ионы, возникающие вдоль траектории частицы, провоцируют образование мельчайших пузырьков пара. Частицы хорошо тормозятся жидкостью, что позволяет наблюдать несколько последовательных реакций.

В *толстослойных фотоэмульсиях* пролетающие частицы образуют скрытое изображение. После проявления видны все события, происшедшие за время наблюдения.

► **Энергия связи ядра.** Энергией связи называют работу, которую надо совершить для разделения ядра на нуклоны. Энергию связи можно найти, измерив достаточно точно массу ядра $m_{\text{я}}$. В

соответствии с формулой Эйнштейна (формула (0) гл. 6) для связи между массой и энергией, энергия связи равна:

$$\Delta E_{\text{св}} = E_{\text{нуклонов}} - E_{\text{ядра}} = (Zm_p + Nm_n)c^2 - m_{\text{я}}c^2.$$

Эксперимент подтверждает существование *дефекта масс*: масса ядра всегда меньше суммы масс составляющих его нуклонов. Энергия связи велика; например, при образовании 4 г гелия выделяется столько же энергии, сколько при сгорании шести вагонов каменного угля. Удельная энергия связи (т.е. энергия связи в расчете на один нуклон) с увеличением массового числа A сначала возрастает, потом остается примерно постоянной (8—9 МэВ на нуклон), а при $A > 60$ снова уменьшается. Это означает, что как при делении тяжелого ядра на две части, так и при соединении двух легких ядер должна выделяться энергия.

► **Ядерные реакции.** Ядерные реакции — изменения ядер, происходящие в результате их взаимодействий с элементарными частицами и друг с другом. Для воздействия на ядра используют как заряженные частицы большой энергии, полученные в радиоактивном распаде и на ускорителях, так и нейтроны. Нейтроны не отталкиваются кулоновским полем ядра, поэтому им не нужно придавать большую энергию; во многих случаях медленные (тепловые) нейтроны оказываются даже эффективнее.

► **Реакция деления.** Захватывая нейтрон, ядро урана может разделиться на два осколка; в процессе деления вылетают также два-три нейтрона (в больших ядрах доля нейтронов больше, чем в средних). Выделение энергии при одном акте деления составляет около 200 МэВ (примерно 1 МэВ на нуклон); именно на столько энергия связи урана меньше суммы энергий связи осколков. Объяснение процессу деления дает капельная модель ядра. Захватывая нейтрон, ядро переходит в возбужденное состояние и деформируется, что облегчает разрыв «капли» на два осколка (в результате кулоновского отталкивания частей ядра).

► **Цепная реакция. Реакторы.** Так как вылетевшие нейтроны могут, в свою очередь, привести к делению других ядер урана, то возможно возникновение *цепной* (самоподдерживающейся) *реакции*. Для поддержания реакции надо, чтобы *коэффициент размножения нейтронов* K был больше или равен 1. (Коэффициентом размножения называют отношение числа нейтронов в некотором «поколении» к числу нейтронов в предыдущем поколении.) Естественный уран содержит лишь 0,7% изотопа ${}_{92}^{235}\text{U}$, который делится при захвате любых нейтронов — как медленных, так и быстрых. Остальная часть приходится на долю изотопа ${}_{92}^{238}\text{U}$, который захва-

тывает только быстрые нейтроны, но в четырех случаях из пяти не делится. Поэтому есть два пути для создания цепной реакции: либо очищать уран, увеличивая процентное содержание ${}^{235}_{92}\text{U}$, либо замедлять вылетающие нейтроны. Первый путь используется в атомной бомбе и в реакторе на быстрых нейтронах. Вторым путем используется в обычных реакторах. Замедлители изготавливают из тяжелой или обычной воды, графита и т.д. Необходимо также учитывать, что при малых размерах активной зоны, содержащей уран, слишком много нейтронов уходит наружу через границу, и цепная реакция не идет. Значит, масса урана должна превышать некоторую *критическую массу*. Например, критическая масса чистого ${}^{235}_{92}\text{U}$ составляет примерно 50 кг. Для *управления реакцией* используют стержни из кадмия или бора, хорошо поглощающих нейтроны. Вдвигая стержни в реактор, останавливают реакцию.

► **Реакция синтеза.** *Термоядерный синтез* — реакция слияния двух легких ядер. Энергия связи конечного ядра больше суммы энергий связи исходных ядер, т.е. при слиянии ядер должна выделяться энергия. Например, в реакции ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ выделяется энергия 17,6 МэВ (т.е. 3,5 МэВ на нуклон). Главная трудность — ядра необходимо привести в контакт, т.е. сблизить до расстояния 10^{-12} см, чему препятствует сила кулоновского отталкивания. Для преодоления сил отталкивания вещество необходимо разогреть до сотен миллионов градусов. Чтобы сделать термоядерный синтез управляемым, надо решить задачу удержания такой раскаленной плазмы магнитным полем; пока эта задача не решена. Термоядерный синтез служит источником энергии звезд (в том числе Солнца). *Неуправляемая термоядерная реакция* происходит при взрыве *водородной бомбы*, где для достижения необходимых температур используют взрыв *атомной бомбы*.

► **Измерение дозы излучения.** *Поглощенная доза излучения* определяется как энергия, поглощенная единицей массы, и выражается в *греях* ($1 \text{ Гр} = \text{Дж/кг}$). Для характеристики рентгеновского и гамма-излучения по производимой ими ионизации сухого воздуха вводится *экспозиционная доза излучения*, равная сумме зарядов всех ионов одного знака, образующихся под действием электронов, возникших в облучаемом воздухе массой 1 кг (выражается в Кл/кг или в *рентгенах*: $1 \text{ рентген} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$).

Чтобы оценить биологическое воздействие излучения на живой организм, вводят *коэффициент качества излучения* Q , который показывает, во сколько раз данное излучение опаснее, чем рентгеновское, при одинаковых поглощенных дозах. Для бета-излучения $Q = 1$, для протонов с энергией меньше 10 МэВ $Q = 10$, для тепловых нейтронов с энергией меньше 20 кэВ $Q = 3$, а для нейтронов с энергией 0,5–10 МэВ $Q = 10$, для альфа-излучения с энергией меньше 10 МэВ $Q = 20$, для тяжелых ядер $Q = 20$. *Эквивалентная доза излучения* равна произведению поглощенной дозы на коэффициент качества. Она выражается в *зивертах* (1 Зв равен одному грею при $Q = 1$). Используется также *бэр* (биологический эквивалент рентгена): $1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}$.