

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет доуниверситетской подготовки и профессиональной ориентации

А. А. Григорьев

ФИЗИКА КВАНТОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

Методическое пособие
для иностранных слушателей
подготовительного отделения

Минск БГУИР 2011

УДК 537.8(076)

ББК 22.33я73

Г83

Р е ц е н з е н т:

доцент кафедры физики БГУИР,
кандидат физико-математических наук А. В. Березин

Григорьев, А. А.

Г83 Физика квантовых явлений : метод. пособие для иностранных слушателей подготовительного отделения. / А. А. Григорьев. – Минск : БГУИР, 2011. – 52 с. : ил.

ISBN 978-985-488-449-3

Предлагаются адаптированные тексты для чтения по следующим разделам физики: электростатика, законы постоянного тока, магнетизм, переменный ток. В конце каждого параграфа даны вопросы для самоконтроля, задачи, а также приведены решения задач.

Предназначено для иностранных слушателей подготовительного отделения для ознакомления с физической лексикой и развития фонетических навыков говорения на русском языке.

УДК 537.8(076)

ББК 22.33я73

ISBN 978-985-488-449-3

© Григорьев А. А., 2010

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2010

ГЛАВА 1. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

§ 1.1. Постулаты теории относительности

Теория относительности – физическая теория пространства и времени, т. е. теория пространственно-временных закономерностей, которые выполняются для любых физических процессов. Специальная теория относительности описывает свойства пространства-времени в условиях, когда силы тяготения не оказывают влияние на эти свойства.

Описываемые теорией относительности явления появляются при скоростях движения тел, близких к скорости света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Скорость света – это предельная скорость распространения любых взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую. Понятие предельной скорости требует глубокого изменения обычных (классических) пространственно-временных представлений, основанных на повседневном опыте, который ограничен наблюдениями сравнительно медленных ($v \ll c$) движений.

На опыте установлена инвариантность (неизменность) законов физики относительно преобразований движения, т. е. перехода от одной инерциальной системы отсчета к другой. Этот результат можно сформулировать как принцип относительности: *все явления в замкнутой физической системе протекают одинаково, независимо от того, покоится она в некоторой инерциальной системе отсчета или движется как целое с постоянной скоростью.*

Согласно этому принципу математическая форма физических законов должна быть одинакова во всех инерциальных системах отсчета. Другими словами, уравнения движения должны быть инвариантны относительно перехода от одной инерциальной системы отсчета к другой.

Теория относительности основана на двух принципах, или *постулатах*:

- 1) принцип относительности;
- 2) принцип существования предельной скорости распространения взаимодействий.

Распространение принципа относительности на электромагнитные и оптические явления приводит к выводу о том, что скорость света (электромагнитных волн) в пустоте во всех инерциальных системах отсчета одинакова. Однако принцип существования универсальной предельной скорости распространения взаимодействий утверждает существование общего предела для скорости передачи каких-либо действий и сигналов и придает скорости света в вакууме универсальное значение, не связанное с физической природой взаимодействия, а отражающее некоторое объективное свойство пространства и времени.

Очевидно, что второй постулат утверждает, что невозможно движение тел со скоростью, превышающей предельную универсальную скорость.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

- 1) В чем заключается физическое содержание принципа относительности?
- 2) Какие постулаты лежат в основе теории относительности?

§ 1.2. Релятивистская кинематика

Покажем, что из основных постулатов теории относительности следует относительный характер промежутков времени между событиями. Пусть два события в некоторой системе отсчета K' (рис. 1), которая движется со скоростью v относительно системы K , происходят в одной и той же точке A и промежуток времени между ними равен τ_0 (по часам системы K'). Этот промежуток времени называется собственным временем. Каким будет промежуток

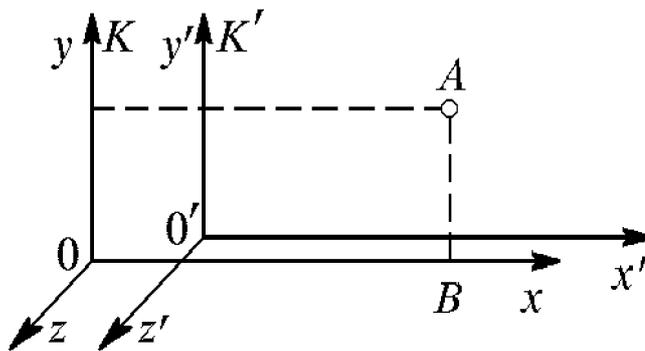


Рис. 1

времени между этими же событиями τ , если его измерить по часам системы K ? Для ответа на этот вопрос рассмотрим мысленный опыт по распространению световых сигналов в этих системах.

В результате получим следующее выражение: $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$.

Таким образом, промежуток времени между двумя событиями зависит от системы отсчета, т. е. является относительным. Так как при любой отличной от нуля скорости $\tau_0 < \tau$, то собственное время меньше, чем промежуток времени между этими же событиями, измеренный в любой другой системе отсчета. Этот эффект называют *релятивистским замедлением* времени. С точки зрения наблюдателя из системы K движущиеся часы (т. е. часы в системе K') идут медленнее, чем его собственные.

Подчеркнем, что замедление времени является следствием инвариантности скорости света.

Покажем теперь, что длина твердого стержня, расположенного вдоль направления относительной скорости систем отсчета K и K' (рис. 1), будет различной в этих системах. Пусть стержень покоится в системе отсчета K' . Его длину, измеренную в этой системе отсчета, называют собственной длиной. Обозначим ее через l_0 , а длину в системе K , относительно которой стержень движется со скоростью v , через l . В результате получим следующее выражение:

$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$. Мы приходим к выводу, что длина стержня зависит от системы отсчета, в которой она измеряется, т. е. является относительной. При любой отличной от нуля скорости $l < l_0$, т. е. длина стержня является наибольшей в той системе отсчета, в которой стержень покоится. Движущиеся относительно наблюдателя тела сокращаются в направлении своего движения. Этот релятивистский эффект носит название *лоренцевского сокращения*.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

- 1) Что называется собственным временем и собственной длиной?
- 2) Объясните формулу для лоренцевского сокращения длины.

З а д а ч а

1. Частицы из космических потоков достигают поверхности Земли. Во сколько раз сокращаются продольные размеры частицы, для скорости которой наблюдатель на Земле получил следующее соотношение $(v/c)^2 = 0,96$, где c – скорость света в вакууме.

Ответ: 5.

§ 1.3. Преобразования Лоренца

Рассмотрим, как можно записать координаты некоторого события A в двух инерциальных системах отсчета K и K' (рис. 1.1). Пусть координаты и время этого события в системе K есть x, y, z и t , а в системе K' – x', y', z' и t' . Будем считать, что при $t = 0$ точки O и O' совпадают. Расстояния в направлении, перпендикулярном вектору относительной скорости v систем отсчета, являются одинаковыми в K и K' , поэтому $y = y'$ и $z = z'$. Релятивистские формулы преобразования координат некоторого события при переходе от подвижной инерциальной системы отсчета K' к неподвижной K имеют вид:

$$x = \frac{x' + v \cdot t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}, \quad t = \frac{x' + \frac{v}{c^2} \cdot t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}, \quad y = y', \quad z = z'.$$

Эти формулы называют преобразованиями Лоренца. Они заменяют преобразования Галилея, справедливые лишь в предельном случае малых по сравнению со скоростью света относительных скоростей. При $v \ll c$ преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея. Это означает, что теория относительности не отвергает полностью классические представления о пространстве и времени, а включает их в себя как предельный случай, справедливый для медленных движений. Теория относительности не отвергает классическую физику, а определяет границы ее применимости.

Преобразования Лоренца выражают относительный характер промежутков времени между событиями и расстояний между точками в пространстве.

Однако наиболее характерной чертой теории относительности является не утверждение относительного характера пространства и времени, а установление абсолютных законов природы, которые не зависят от выбора систем отсчета. Задача нахождения абсолютного выражения законов природы тесно связана с отысканием абсолютных, инвариантных величин. Одна из таких величин – это максимальная скорость распространения взаимодействий, равная скорости света в вакууме c . Другой важной инвариантной величиной является пространственно-временной интервал между событиями, определяемый следующим соотношением: $s = \sqrt{(c \cdot t)^2 - x^2 - y^2 - z^2}$. Здесь одному из происходящих событий соответствуют координаты $x = y = z = 0$ и момент времени $t = 0$, а второму – координаты x, y, z и момент времени t .

Пусть первое событие представляет собой вспышку света, происходящую в начале координат при $t = 0$ в неподвижной системе отсчета K , а второе – приход фронта этой световой волны в точку с координатами x, y, z в момент времени t . Тогда $x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2$, а интервал для такой пары событий $S = 0$. Координаты и время второго события в другой системе отсчета K' будут другими, но в силу инвариантности скорости света для них будет выполняться такое же соотношение для координат и времени, поэтому $S' = 0$.

Таким образом, если два события связаны между собой *световым сигналом*, то интервал между ними равен *нулю* во всех инерциальных системах отсчета. Этот результат является математическим выражением абсолютного характера скорости света.

Для любой другой пары событий, не связанных световым сигналом, интервал отличен от нуля, а величина его во всех инерциальных системах отсчета одинакова.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

- 1) Что такое интервал между двумя событиями?
- 2) Что такое инвариантность интервала?

3) Когда величина интервала равна нулю?

§ 1.4. Релятивистский закон преобразования скорости

Преобразования Лоренца для координат и времени события при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой позволяют сразу получить и закон преобразования скорости частицы. Пусть некоторая частица за малый промежуток времени $\Delta t'$ по часам системы отсчета K' переместилась вдоль оси OX' из точки с координатой x' в точку с координатой $x' + \Delta x'$. Тогда v'_x мы определим как скорость этой частицы в системе K' . Из преобразований Лоренца можно получить скорость этой же частицы в системе K :
$$v_x = \frac{v'_x + v}{1 + \frac{v'_x \cdot v}{c^2}}$$

Здесь v – скорость относительного движения систем.

Релятивистский закон преобразования скорости соответствует исходному постулату об инвариантности скорости света. Рассмотрим в системе отсчета K' импульс света, который распространяется вдоль оси OX' . В этом случае $v'_x = c$, $v'_y = v'_z = 0$. Тогда для скорости этого же импульса в системе отсчета K получим
$$v_x = \frac{c + v}{1 + \frac{v}{c}}$$

т. е. луч света и в системе K распространяется вдоль оси OX со скоростью c .

Задача

1. Электрон излучается движущимся ядром в направлении своего движения. Определить скорость движения электрона относительно ядра, если скорость ядра относительно неподвижного наблюдателя равна $0,4 \cdot c$, а электрона – $0,82 \cdot c$. Ответ дать в единицах скорости света.

Ответ: $0,625 c$.

§ 1.5. Релятивистский импульс и энергия

В теории относительности для замкнутой физической системы сохраняются импульс \vec{p} и энергия E , однако релятивистские выражения для них отличаются

от классических: $\vec{p} = \frac{m \cdot \vec{v}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$, $E = \frac{m \cdot c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$, здесь m – масса частицы в по-

коящейся системе отсчета. Она совпадает с массой частицы в нерелятивистской механике. Покоящееся тело обладает энергией $E_0 = m \cdot c^2$. Энергию E_0 называют *энергией покоя*.

Кинетическая энергия частицы E_k в некоторой системе отсчета определяется как разность между ее полной энергией и энергией покоя:

$E = m \cdot c^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right)$. Если скорость частицы мала по сравнению со

скоростью света, то эта формула переходит в обычное выражение $E_k = m \cdot v^2 / 2$ для кинетической энергии частицы в нерелятивистской физике. Различие между классическим и релятивистским выражениями для кинетической энергии становится особенно существенным, когда скорость частицы приближается к скорости света. При $v \rightarrow c$ величина релятивистской кинетической энергии неограниченно возрастает. Частица, обладающая отличной от нуля массой покоя и движущаяся со скоростью света, должна была бы иметь бесконечную

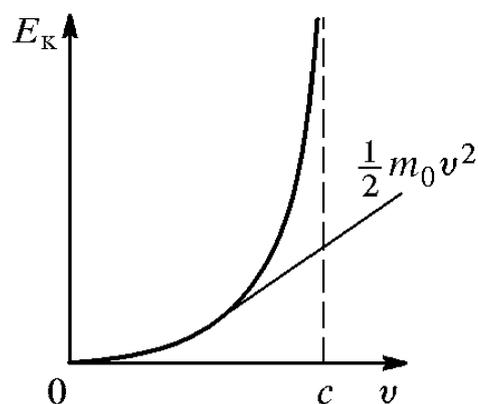


Рис. 2

кинетическую энергию. Зависимость кинетической энергии от скорости частицы показана на рис. 2.

Из определений релятивистских выражений для импульса \vec{p} и энергии E можно получить соотношения, которые их связывают: $\vec{p} = \frac{E \cdot \vec{v}}{c^2}$ и $E^2 = p^2 \cdot c^2 + m^2 \cdot c^4$. Рассмотрим случай когда частица движется со скоростью света c , тогда из первого уравнения получаем, что $p = \frac{E \cdot c}{c^2} = \frac{E}{c}$. Из второго уравнения следует, что $m = 0$. Из полученного результата можно сделать два вывода:

1. Только безмассовые частицы могут двигаться со скоростью света.
2. Безмассовые частицы обладают импульсом: $p = \frac{E}{c}$. В нерелятивистской динамике у таких частиц импульс равен нулю.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

- 1) Как энергия частицы зависит от ее скорости в релятивистской механике?
- 2) Что такое энергия покоя?
- 3) Что происходит с величиной кинетической энергии частицы при $v \rightarrow c$?

З а д а ч а

1. Определить отношение модуля скорости релятивистского электрона к скорости света в вакууме, если модуль его импульса равен $3,6 \cdot 10^{-22}$ кг·м/с. Массу электрона считать равной $9 \cdot 10^{-31}$ кг.

Ответ: 0,8.

§ 1.6. Ускоритель на встречных пучках

С помощью основных соотношений теории относительности можно показать преимущество ускорителя заряженных частиц на встречных пучках по сравнению с обычными ускорителями с неподвижной мишенью. Рассмотрим принципиальную схему устройства накопительных колец, которая представлена на рис. 3. Пучок частиц из ускорителя разделяется с помощью быстродействующего магнита переключателя A на два пучка, каждый из которых с помощью системы отклоняющих магнитов A и B направляется в свое кольцо.

Вращение по орбите в кольцах возможно благодаря магнитному полю, вектор индукции которого перпендикулярен плоскости рисунка. На общем участке CD происходят столкновения частиц, которые движутся навстречу друг другу.

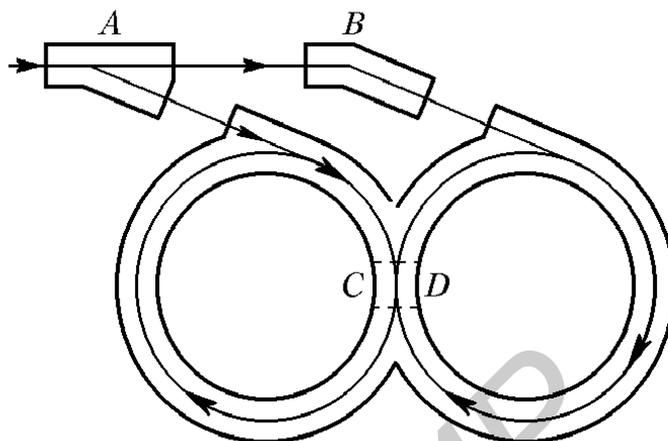


Рис. 3

Как найти частоту вращения заряженной частицы в однородном

магнитном поле с индукцией B ? Так как на частицу с зарядом q со стороны магнитного поля действует сила Лоренца, перпендикулярная скорости частицы, то величина скорости v не меняется по модулю. Следовательно, не изменяется и

релятивистская масса частицы $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$, здесь m_0 – масса частицы в

неподвижной системе координат. В этом случае частица движется по окружности с ускорением v^2/R , где R – радиус окружности. Поэтому закон изменения

импульса частицы запишется в виде второго закона Ньютона: $\frac{m \cdot v^2}{R} = q \cdot v \cdot B$.

Для угловой скорости вращения ω , связанной с линейной скоростью v обычным соотношением $v = \omega \cdot R$, находим следующий результат: $\omega = q \cdot B / m$.

В нерелятивистском случае неупругого столкновения частиц одинаковой массы, когда одна из них покоится, только половина первоначальной энергии может перейти в энергию покоя рождающихся частиц. Энергия, которой характеризуют ускорители, – это кинетическая энергия разогнанных частиц E_k . Согласно закону сохранения энергии полная энергия системы после столкновения E' такая же, как и до столкновения, т. е. равна сумме энергий покоя обеих частиц и кинетической энергии налетающей частицы. В ультрарелятивистском случае, когда кинетическая энергия частицы много больше энергии покоя:

$E_k \gg m_0 c^2$, полную массу покоя системы после столкновения. Тогда, увеличение энергии покоя частиц ΔE , которое произошло в рассматриваемом столкновении, принимает вид $\Delta E \approx \sqrt{2 \cdot E_k \cdot m_0 \cdot c^2}$. Если, например, мы хотим получить $\Delta E = 20$ ГэВ при столкновении протонов (энергия покоя протона $2 \cdot m_0 \cdot c^2 \approx 1$ ГэВ), то видно, что необходим ускоритель, разгоняющий протоны до энергии $E_k \sim 200$ ГэВ. Таким образом, в рассматриваемом примере может быть использована только *десятая часть* кинетической энергии протона (а не половина, как было бы в нерелятивистском случае).

Итак, из-за релятивистских эффектов доля кинетической энергии разогнанных частиц, которая может быть использована для реакции, в ускорителях с *неподвижной* мишенью уменьшается с ростом энергии. В ускорителе же на *встречных пучках* и в релятивистском случае *вся* кинетическая энергия сталкивающихся частиц может перейти в энергию покоя рождающихся частиц.

Насколько велика разность между кинетической энергией частицы E_k в *обычном ускорителе* и эквивалентной энергией E'_k в ускорителе со *встречными пучками*? В ультрарелятивистском случае, когда кинетическая энергия частицы много больше энергии покоя: $E_k \gg m_0 c^2$ можно получить следующее соотношение

$$E_k - E'_k \approx E'_k \cdot \left(\frac{2 \cdot E'_k}{m_0 \cdot c^2} - 1 \right).$$

Из приведенной формулы видно, что выигрыш при использовании ускорителей на *встречных пучках* особенно велик для легких частиц, например электронов, для которых $m_0 \cdot c^2 \approx 0,5$ МэВ. Так, для установки со *встречными пучками*, ускоряющей электроны до энергии $E'_k = 130$ МэВ, энергия E_k эквивалентного ускорителя с *неподвижной мишенью* составляет, примерно 70 ГэВ, т. е. в 520 раз больше!

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1) Сколько колец содержит ускоритель на *встречных пучках*?

- 2) Какая наибольшая часть кинетической энергии может перейти в энергию покоя рождающихся частиц для ускорителя на встречных пучках?
- 3) У какого типа ускорителей для получения одних и тех же частиц требуется большая кинетическая энергия?

ГЛАВА 2. ЧАСТИЦЫ И ВОЛНЫ

§ 2.1. Внешний фотоэлектрический эффект

Явление *фотоэффекта* заключается в вырывании электронов из металла под действием падающего на него света. Пучок света, падающий на поверхность металла, освобождает из металла электроны при условии, что частота света выше определенного критического значения, который зависит от рода металла. Количество вырванных в единицу времени электронов при неизменном спектральном составе излучения пропорционально падающему на поверхность металла световому

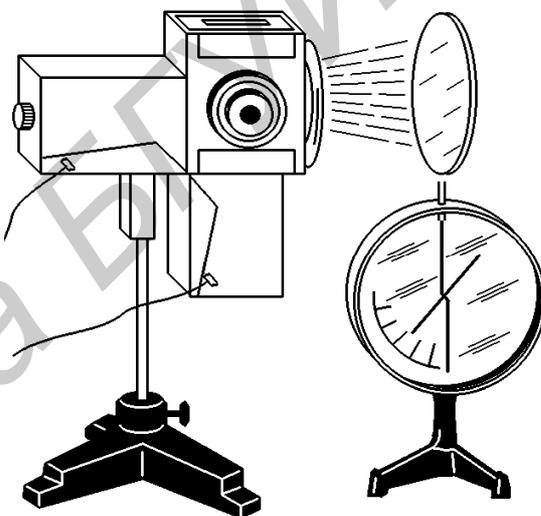


Рис. 4

поток. Эффект называется

внешним, так как электроны покидают металл. Простейший способ наблюдать фотоэффект – это освещать ультрафиолетовым излучением заряженную цинковую пластину, соединенную с электрометром (рис. 4). Если заряд пластины положительный, то облучение ее никак не влияет на быстроту разрядки электрометра. Если заряд пластины отрицательный, то излучение электрической дуги очень быстро разряжает электрометр. Сразу после открытия электрона стало ясно, что фотоэффект связан именно с освобождением имеющихся в металле *электронов*.

Можно изготовить прибор, в котором электроны, излучаемые катодом (их обычно называют *фотоэлектронами*), собираются на аноде в вакуумной колбе (рис. 5). Если цепь между электродами замкнута, то сила тока в ней будет *пропорциональна* световому потоку. Весь процесс протекает практически мгновенно, т. е. *безынерционно*. При увеличении разности потенциалов между электродами сила *фототока* возрастает.

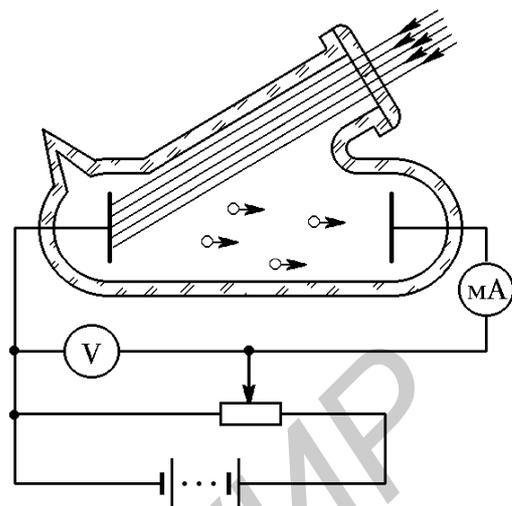


Рис. 5

При некотором напряжении она достигает определенного максимального значения, после чего перестает увеличиваться (рис. 6). Это максимальное значение фототока называется *током насыщения*. Ясно, что насыщение наступает

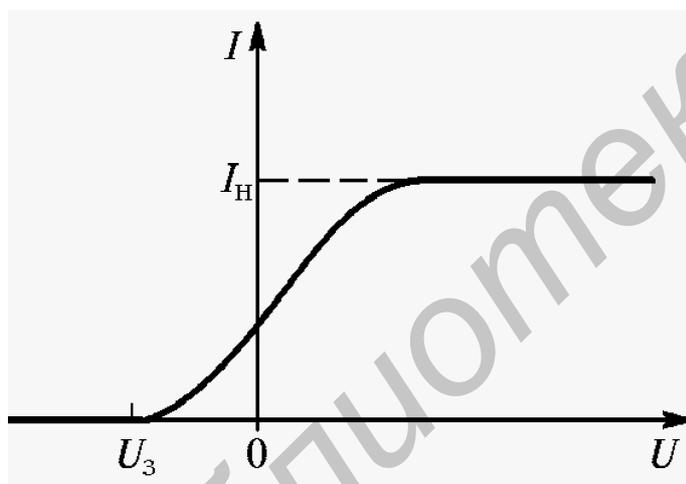


Рис. 6

тогда, когда все испускаемые фотоэлектроны попадают на второй электрод. Электроны, освобожденные из металла светом, обладают некоторой *кинетической* энергией. Эта энергия возрастает с увеличением частоты падающего света. Из графика на рис. 6 видно, что сила фототока отлична от нуля и

при отсутствии приложенного напряжения. Если изменить полярность потенциала анода, то фототок уменьшится и при некотором напряжении U_3 сила фототока обратится в нуль. Такое напряжение называется *задерживающим*, потому что все вырванные светом электроны возвращаются на катод. Значение U_3 зависит от максимальной кинетической энергии, которую имеют фотоэлектроны. Измеряя задерживающее напряжение и применяя закон сохранения энергии,

можно найти это максимальное значение кинетической энергии:

$$\frac{m \cdot v_{max}^2}{2} = e \cdot U_3.$$

Сила тока насыщения зависит от интенсивности света, но, как показали опыты, задерживающее напряжение U_3 остается неизменным. Это означает, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов *не зависит* от интенсивности света (при его неизменном спектральном составе). С точки зрения волновых представлений о свете этот факт необъясним. Так как чем больше интенсивность света, тем большие силы действуют на электроны в освещенном металле и тем большая энергия должна бы передаваться светом электронам.

Точные опыты показали, что кинетическая энергия электронов во внешнем фотоэффекте не зависит от интенсивности излучения, а зависит лишь от рода металла и от частоты излучения ν .

Теоретическое объяснение наблюдаемой закономерности было дано в 1905 г. Эйнштейном на основе гипотезы Планка о том, что свет излучается определенными порциями – *квантами*, причем энергия каждой такой порции определяется формулой $E = h \cdot \nu$.

Эйнштейн предложил для фотоэффекта уравнение, которое выражает закон сохранения энергии для процесса взаимодействия светового кванта, имею-

щего энергию $h \cdot \nu$, с электроном металла: $h \cdot \nu = \frac{m \cdot v_{max}^2}{2} + A$. В этом выражении

A – работа выхода электрона из металла, т. е. минимальная энергия, необходимая для удаления электрона из металла. Можно сделать вывод, что свет с частотой $\nu < \nu_{кр}$, где $h \cdot \nu_{кр} = A$, вообще *не может* вызывать фотоэффект в металле с

данным значением работы выхода. Эта частота $\nu_{кр}$ определяет *красную* границу фотоэффекта. Для цинка красная граница фотоэффекта находится в ближней *ультрафиолетовой* области спектра. У некоторых других металлов, например у натрия и калия, эта граница лежит в *видимой* области спектра.

Почему электрон обычно поглощает только один квант энергии независимо от интенсивности излучения? Самое простое объяснение этого явления заключается в следующем: свет состоит из частиц, т. е. из излученных порций световой энергии $E = h\nu$, которые сохраняют свою индивидуальность в процессе распространения, и при столкновении с электроном передают ему всю свою энергию.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

- 1) Что такое внешний фотоэффект?
- 2) Перечислите основные закономерности фотоэффекта.
- 3) Объясните связь уравнения фотоэффекта с законом сохранения энергии.

З а д а ч а

1. В результате очистки поверхности металла работа выхода электронов уменьшается в 1,21 раза. Во сколько раз нужно увеличить максимальную длину волны света, способного вызвать фотоэффект с этой поверхности?

Ответ: 1,21.

2. Используя вольт-амперную характеристику внешнего фотоэффекта на рис. 7 для разных частот падающего излучения, определите, какая частота больше ν_1 или ν_2 .

Ответ: $\nu_1 > \nu_2$.

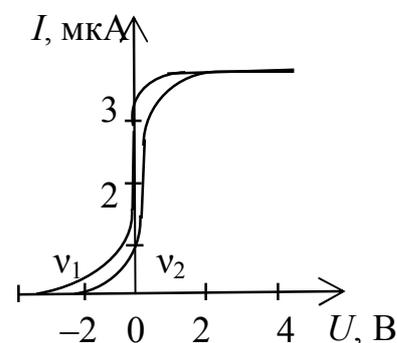


Рис. 7

§ 2.2. Фотоны

Обобщение данных различных опытов привело к следующим важным выводам:

- 1) электромагнитное излучение имеет двойственную природу, которая проявляется то в волновых, то в корпускулярных свойствах;
- 2) существуют дискретные значения физических величин, которые, по представлениям классической физики, могли изменяться непрерывно.

Итак, одна группа опытов указывает, что свет – это частицы, которые могут быть локализованы; а другая группа опытов доказывает, что свет – это волны.

Теперь рассмотрим более детально свет с корпускулярной точки зрения. В теории Планка энергия фотона E связана с частотой света ν соотношением $E = h \cdot \nu$. Поскольку фотоны не существуют в состоянии покоя, то их масса покоя равна нулю. Импульс фотона равен отношению его энергии к скорости света:

$p = \frac{E}{c}$. Данная формула является частным случаем общего соотношения, связывающего энергию, импульс и массу покоя любой частицы:

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

Фотон представляет собой квантовый объект, его нельзя описывать как только частицу или только волну. В микромире объекты обладают и теми и другими свойствами, которые не разделяются так, как это происходит в макроскопических объектах. Рассматривать поведение фотона имеет смысл, только исходя из результатов проведенных измерений. Под *корпускулярно-волновой дуализмом* будем понимать, тот факт, что свет обладает потенциальной возможностью проявлять и волновые, и корпускулярные свойства.

Соотношения $E = h \cdot \nu$ и $p = h/\lambda$ позволяют по энергии частицы найти ее частоту, а по импульсу – длину волны. Эти количественные характеристики дополняют друг друга, так как только их совокупность дает полное представление о свете. Корпускулярно-волновой дуализм есть свойство не только фотонов, но и любых других элементарных частиц.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

- 1) В чем проявляется двойственный характер света?
- 2) Как связаны между собой энергия и импульс фотона?

З а д а ч а

1. Во сколько раз энергия фотона рентгеновского излучения больше энергии

фотона видимого света, если длина волны рентгеновского излучения равна 10^{-10} м, а видимого света – $5,5 \cdot 10^{-7}$ м?

Ответ: 5500.

2. Средняя мощность импульсного лазера, работающего на длине волны 550 нм, равна 72 Вт. Число фотонов в импульсе – 10^{18} . Сколько импульсов излучает лазер каждую секунду?

Ответ: 200.

§ 2.3. Волны де Бройля

В 1927 г. американские физики Л. Джермер и К. Дэвиссон обнаружили, что пучок электронов после отражения от монокристалла никеля создавал различный ток в детекторе в зависимости от его положения. Структура кристалла была известна из опытов по дифракции рентгеновских лучей. При этом распределение тока по углам в пространстве не зависела от интенсивности исходного электронного пучка. Такой же результат получался в предельном случае весьма слабых потоков, когда можно было считать, что электроны падают на кристалл поодиночке. Схема их эксперимента представлена на рис. 8. Электроны из электронной пушки, прошедшие ускоряющую разность потенциалов, падали нормально на поверхность кристалла никеля. С помощью детектора исследовалось число электронов, отраженных от кристалла при различных значениях угла его поворота β .

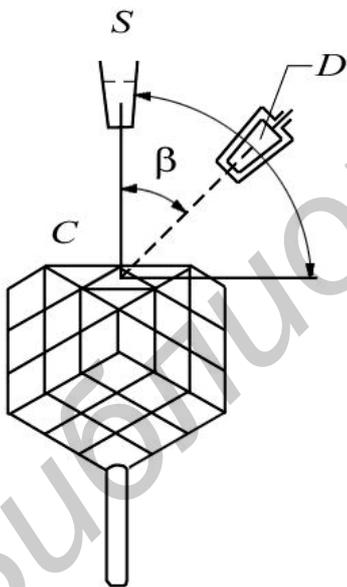


Рис. 8

Таким образом, оказалось, что как *электроны*, так и фотоны обладают свойствами, которые имеют *волны*, а не для частицы. Важно отметить, что эти волновые свойства можно приписывать каждому электрону в отдельности, а не всей совокупности электронов в пучке.

Рассмотренный выше эксперимент проводился с интенсивными пучками частиц, в данном случае электронов. Обнаруженные в них волновые свойства могли быть отнесены как к ансамблю взаимодействующих между собою электронов, так и *отдельной* частице.

Чтобы выяснить, обладает ли индивидуальная частица волновыми свойствами, группа советских физиков во главе с В. А. Фабрикантом выполнила в 1949 г. исследования с очень слабым пучком электронов. В этих опытах промежуток времени между двумя последовательными прохождениями электронов через кристалл в 30000 раз превышал время, необходимое одному электрону на прохождение всего прибора. Таким образом, электроны дифрагировали в кристалле по-одному и полностью *исключалось взаимодействие* электронов друг с другом как причина возникновения дифракционной картины. Качественный вид распределения дифрагированных электронов по фотопластинке приведен на рис. 9.

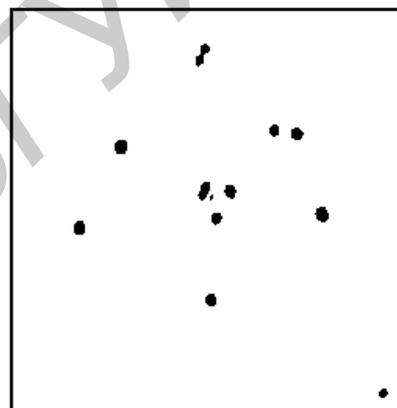


Рис. 9

При *небольшой* длительности эксперимента точки на фотопластинке, отвечающие попаданию электронов, распределены совершенно *случайным* образом. Однако при *большей* длительности эксперимента распределение точек приобретает характерный для дифракции на поликристалле вид концентрических колец (рис.10). Таким образом, было доказано, что *отдельный* электрон обладает волновыми свойствами.

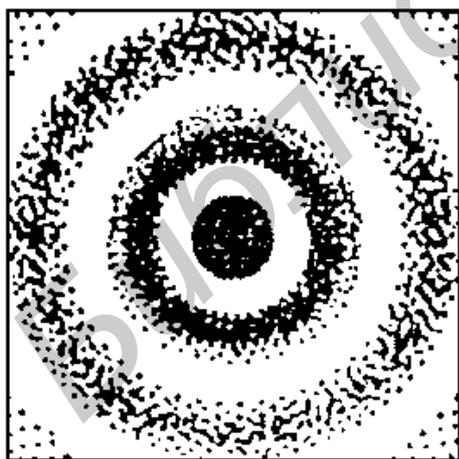


Рис. 10

Большое значение имело проведение дифракционных опытов с *нейтронами*. У нейтронов *нет электрического заряда*, и даже при малых скоростях они могут свободно проникать в кристалл и дифрагировать на трехмерной, пространственной кри-

сталлической решетке. Источниками нейтронов являются ядерные реакции, поэтому интенсивный пучок нейтронов, необходимый для проведения дифракционных исследований, может быть получен от ядерных реакторов или на ускорителях заряженных частиц.

Анализ показывает, что испытывать дифракцию в кристалле могут только так называемые *тепловые* нейтроны, энергия которых сравнима с энергией молекул газа при комнатной температуре ~ 300 К.

В 1924 г. Луи де Бройль предположил, что *все частицы* должны обладать *волновыми свойствами*, подобными волновым свойствам света. Он нашел количественное соотношение между *длиной волны*, которая сопоставляется частице, и *импульсом* частицы, аналогичное соотношению между длиной волны и импульсом фотона: $\lambda = h/p$.

Несколько лет спустя Джермер и Дэвиссон, изучая рассеяние электронов кристаллами, обнаружили дифракцию электронов. Точность совпадения величины длины волны в эксперименте составила 1 %. Следовательно, электроны, отражаясь от кристалла, дифрагируют точно так же, как будто они обладают длиной волны, предсказанной де Бройлем.

Каков же физический смысл волн де Бройля и какова их связь с частицами вещества? Одна из идей состоит в следующем. Частицы представляют собой *суперпозиции* волн. Из математики известно, что из волн различных частот и направлений всегда можно составить *волновой пакет*, т. е. некоторое волновое образование. Волны обладают таким свойством, что могут усиливать друг друга в какой-то малой области пространства, тогда вне этой области произойдет полное ослабление их действия. Такой волновой пакет и есть частица. Скорости волновых слагаемых различны по величине. Как будет эволюционировать такой волновой пакет во времени? Монохроматические волны разных частот, из которых образован пакет, будут расходиться с различными фазовыми скоростями. Это приведет к деформации, расплыванию и в конце концов к распаду первоначального волнового пакета. Таким образом, частица, если бы она представляла

собой волновое образование, была бы неустойчива и быстро распадалась бы. Это ни в какой мере не соответствует действительности. Таким образом, частица не может быть волновым пакетом, образованным из волн де Бройля.

Подобные трудности вынудили предложить *статистическое* объяснение волн де Бройля, что позволило сочетать атомизм частиц с их волновыми свойствами. Таким образом, волны де Бройля следует рассматривать как волны функции вероятности.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

- 1) Что происходило с электронами в опыте Джермера и Дэвиссона?
- 2) Что предположил де Бройль?

З а д а ч а

1. Во сколько раз скорость света в вакууме превышает скорость движения электрона, если длина волна де Бройля для него равна $2,42 \cdot 10^{-10}$ м.

Ответ: 99.

ГЛАВА 3. СТРОЕНИЕ АТОМА

§ 3.1. Закономерности в спектрах излучения атома

Газ или пар, находящийся при низком давлении, называется разреженным. В этом случае атомы вещества находятся на большом расстоянии друг от друга и слабо взаимодействуют между собой. Если в таком состоянии газ получит какое-то количество энергии, то через некоторое время он может отдать в окружающую среду ее часть, т. е. излучить электромагнитные волны. Каждый атом вещества будет излучать волны независимо друг от друга. Такой процесс может быть зарегистрирован экспериментально с помощью *спектрографа*. В результате получают *спектр излучения* в виде групп вертикальных линий, которые показывают распределение энергии в излучении по длинам волн. В разреженном состоянии газ или пар дает *линейчатый спектр*, в котором линии

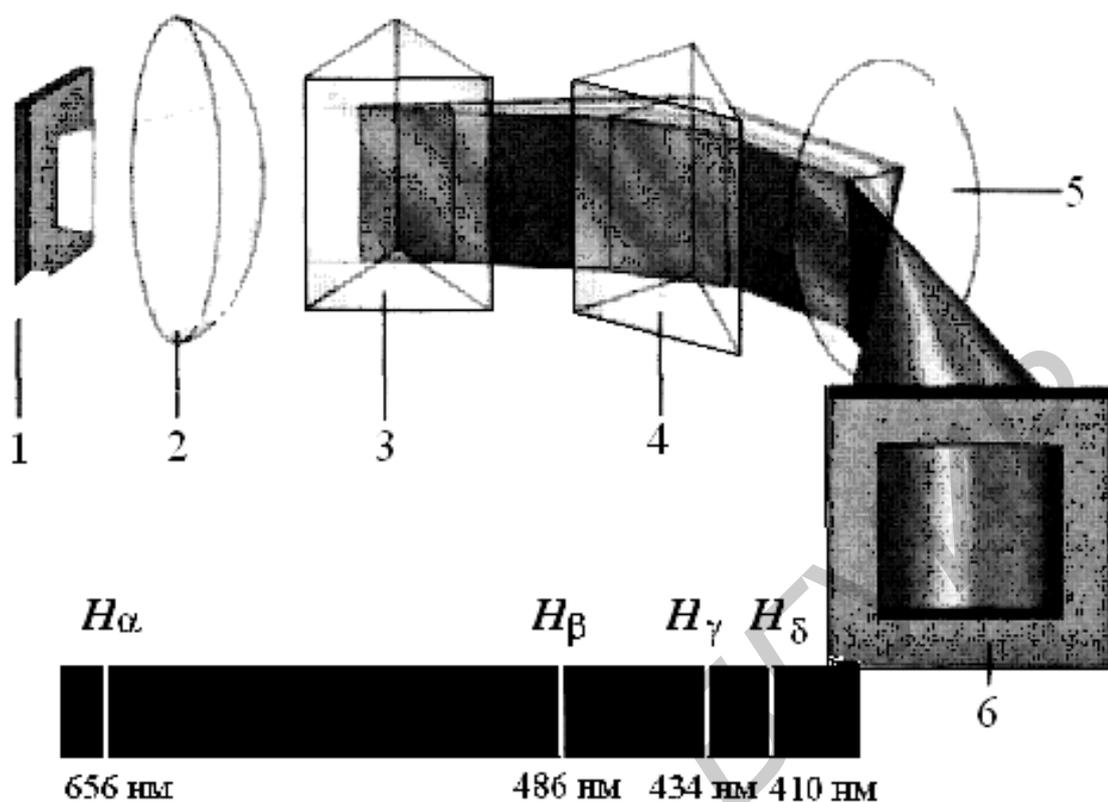


Рис. 11

расположены дискретно, т. е. представляет собой совокупность тонких линий разделенных темными промежутками. Каждая линия соответствует определенному процессу излучения в атоме. Спектр излучения есть точная и уникальная характеристика физического строения атома. Таким образом, мы можем различать атомы с помощью спектров, т. е. использовать их как инструмент измерений в микромире. Простейшим атомом является атом водорода, который состоит из ядра и одного электрона. Можно предполагать, что такой атом имеет простейшую последовательность спектральных линий.

В 1885 г. Бальмер (Швейцария) пропускал электрический ток через разряженный водород и добился его свечения. Полученный свет он направил на призму и увидел несколько световых потоков разного цвета на экране (рис. 11). Так он впервые получил линейчатый спектр излучения водорода в атомарном состоянии. В нем содержатся четыре характерных линии, которые обозначают H_{α} , H_{β} , H_{γ} , H_{δ} . Бальмер установил математический закон порядка следования этих линий, то есть зависимость длины волны излучения данной линии λ_n и ряда

натуральных чисел $n = 3, 4, 5 \dots$: $\lambda_n = R \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$, $R = 1,097373 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – постоянная Ридберга. Последовательность линий получила название *серии Бальмера* для *видимой* области спектра излучения. Из закона очевидно, что линии располагаются в определенном порядке. Расстояние между линиями убывает по мере перехода от более длинных волн к более коротким.

Дальнейшие исследования показали, что в спектре водорода имеется еще несколько серий. В ультрафиолетовой части спектра находится серия Лаймана. Остальные серии лежат в инфракрасной области. Линии этих серий могут быть представлены в виде формул, аналогичных формуле Бальмера, изменяется только число $m = 1, 2, 3, 4, \dots$, которое нумерует спектральные серии: $\lambda_n = R \cdot \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$. $m = 1$ – серия Лаймана, $m = 2$ – серия Бальмера, $m = 3$ – серия Пашена и т.д.

При возрастании номера n длина волны излучения стремится к некоторому пределу, который называется границей серии.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

- 1) Что происходило с электронами в опыте Джермера и Дэвиссона?
- 2) Что предположил де Бройль?

З а д а ч а

1. Определить длину волны излучения атома водорода в серии Бальмера при переходе с пятого энергетического уровня в нанометрах. Ответ дать с точностью до целого. ($R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$)

Ответ: 433 нм.

2. Определить энергию электрона в электронвольтах на втором энергетическом уровне в атоме водорода. Энергия основного состояния для атома водорода равна $-21,632 \cdot 10^{-19}$ Дж. Ответ дать с точностью до сотых.

Ответ: 3,38 эВ.

§ 3.2. Квантовые постулаты Бора

Ядерная модель атома, предложенная Резерфордом, не могла объяснить не только спектральные закономерности, но даже и сам факт существования атома, точнее – его устойчивость. Она также оказалась в противоречии с законами классической физики.

Во-первых, в соответствии с законами классической электродинамики Максвелла электроны при движении по орбитам с ускорением должны непрерывно излучать электромагнитные волны. Частота излучения совпадает с частотой их обращения вокруг ядра.

Во-вторых, вследствие того, что излучение сопровождается потерей энергии, электроны за время порядка 10^{-13} с должны упасть на ядро (рис. 12). Следовательно, атом должен прекратить свое существование.

В-третьих, частота вращения электрона по мере приближения к ядру будет изменяться непрерывно, т. е. спектр излучения атома должен быть *непрерывным*, а не линейчатым.



Рис. 12

Таким образом, по законам классической электродинамики атом Резерфорда должен быть неустойчивым, а его спектр излучения – непрерывным, что противоречило результатам экспериментов.

В новой модели атома необходимо было признать значительные «отступления» от следствий классической электродинамики при ускоренном движении электрона.

Для преодоления противоречий между ядерной моделью атома Резерфорда и законами классической электродинамики Нильс Бор поставил перед собой цель объединить в единое целое:

- 1) ядерную модель атома Резерфорда,
- 2) закономерности линейчатых спектров,

3) квантовый характер излучения и поглощения света.

В 1913 г. он предложил квантовую модель атома, в основу которой положил следующие постулаты.

1-й постулат Бора (постулат стационарных состояний):

электрон в атоме может находиться только в особых стационарных (квантовых) состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия. Когда электрон находится в стационарном состоянии, атом не излучает.

Стационарные состояния отличаются друг от друга различными орбитами, по которым движутся электроны в атоме. Набор электронных орбит определяет стационарные состояния электрона в атоме. Как следует из постулата, вопреки классической электродинамике электроны движутся по замкнутым орбитам и электромагнитные волны при этом *не излучаются*. Стационарные состояния можно пронумеровать, присвоив им порядковый номер $n = 1, 2, 3, \dots$. Каждое состояние электрона обладает своей фиксированной энергией E_n .

Первый постулат Бора сохраняет основу ядерной модели атома, предложенной Резерфордом: электроны вращаются вокруг ядра по определенным (разрешенным) орбитам. Бор полагал, что эти орбиты представляют собой окружности, однако немецкий физик Зоммерфельд показал, что орбиты могут также иметь форму эллипса, причем ядро располагается в одном из его фокусов (рис. 13).

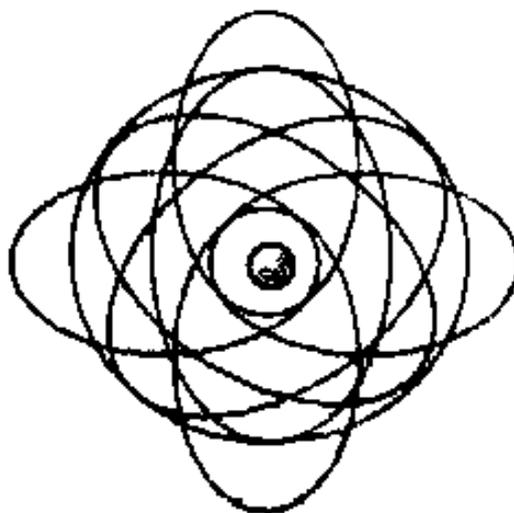


Рис. 13

2-й постулат Бора (правило частот):

электрон в атоме может «скачком» переходить из одного стационарного состояния (k -го) в другое (n -е). При этом переходе испускается или поглощается

ется квант электромагнитного поля с частотой, которая определяется разностью энергий электрона в атоме в данных состояниях: $h \cdot \nu = E_n - E_k$.

Если $E_n - E_k > 0$, то происходит поглощение энергии, если $E_n - E_k < 0$ – ее излучение.

Состояние атома, которому соответствует наименьшая энергия, называется *основным*, а состояния, которым отвечают большие значения энергии, – *возбужденными*.

Позже было показано, что в атоме в основном энергетическом состоянии электрон может находиться неограниченно долго, а в остальных стационарных состояниях – в среднем не более 10^{-8} с. Этот временной интервал называется *временем жизни атома* в возбужденном состоянии.

Из второго постулата Бора следует, что частота излучения атома не связана с частотой обращения электрона по орбите, а определяется энергиями E_n и E_k атома в начальном и конечном состояниях. Переход электрона в атоме из одного стационарного состояния в другое сопровождается электромагнитным излучением с длиной волны $\lambda = \frac{h \cdot c}{E_k - E_n}$.

Правило частот Бора позволило объяснить линейчатую структуру атомных спектров: частоты излучения атома определяются значениями энергий атом и возбужденных состояниях.

3-й постулат Бора (правило квантования орбит):

стационарные (разрешенные) электронные орбиты в атоме находятся из условия $m \cdot v \cdot r_n = n \cdot h / 2 \cdot \pi$,

где m – масса электрона, v – линейная скорость его движения, r_n – радиус n -й орбиты, h – постоянная Планка. Число $n = 1, 2, 3, \dots$, которое обозначает номер орбиты, называется *главным квантовым числом*.

Бор усовершенствовал ядерную (планетарную) модель атома Резерфорда и объяснил вид атомных спектров и квантовый характер излучения, обнаруженный Планком и Эйнштейном.

Контрольные вопросы

- 1) Сформулируйте и запишите второй постулат Бора.
- 2) Что позволило объяснить правило частот Бора?

Задача

1. Электрон атома водорода находится на четвертом энергетическом уровне. Сколько квантов различной энергии он может испустить при всевозможных переходах?

Ответ: 6.

2. Определить скорость электрона в км/с на первой боровской орбите с радиусом $5,3 \cdot 10^{-11}$ м. Масса электрона – $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Ответ дать в виде целого числа.

Ответ: 2179 км/с.

§ 3.3. Атом водорода

Используем модель Бора для построения теории простейшего атома – атома водорода, содержащего ядро и один электрон, и рассмотрим движение электрона по орбите вокруг ядра. Из второго закона Ньютона следует, что центростремительное ускорение электрону сообщает кулоновская сила:

$$\frac{m \cdot v^2}{r} = \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2}.$$

Применяя 3-й постулат Бора (правило квантования орбит),

получаем выражение для радиуса стационарной орбиты с номером n :

$$r_n = 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{h^2 n^2}{m \cdot e^2}.$$

Из этой формулы при $n = 1$ можно найти радиус первой (ближайшей к атомному ядру) орбиты электрона, которая определяет размер атома водорода в устойчивом состоянии. Как видим, с увеличением номера n радиус орбиты возрастает пропорционально n^2 .

Энергия атома водорода равна сумме кинетической энергии движения электрона вокруг ядра E_k и его потенциальной энергии E_n в электростатическом поле ядра. Поскольку взаимодействуют частицы, имеющие заряды

противоположных знаков, то потенциальная энергия их взаимодействия отрицательна: $E_n = -\frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r}$. Полная энергии атома записывается в виде суммы

энергий: $E = E_k + E_n = \frac{m \cdot v^2}{r} - \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r}$. Если подставить найденное ранее зна-

чение квадрата скорости, то получим окончательное выражение для энергии

$E = -\frac{e^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r}$. Так как расстояние r может принимать только набор дискрет-

ных (квантованных) значений r_n , то и энергия атома в различных стационарных состояниях может также принимать только дискретные значения E_n . С учетом определенных ранее значений радиусов орбит для значений энергетических

уровней атома получаем $E_n = -\frac{m \cdot e^2}{8 \cdot h^2 \cdot \epsilon_0^2 \cdot n^2}$.

Как видно из формулы, энергия атома определяется только номером орбиты (главным квантовым числом) n , поскольку все остальные величины в этой формуле – фундаментальные константы. Не трудно вычислить, что энергия атома водорода в основном энергетическом состоянии ($n = 1$) будет равна

$E_1 = -\frac{m \cdot e^2}{8 \cdot h^2 \cdot \epsilon_0^2} \approx -13,55$ эВ. Соответственно, для того чтобы удалить электрон,

находящийся в основном состоянии, из атома (при этом энергия системы станет равной нулю), электрону необходимо сообщить энергию $E = 13,55$ эВ. Эта энергия называется *энергией связи атома*, а процесс удаления электрона из атома – *ионизацией*. Ионизация может быть однократной (атом теряет один электрон), двукратной (два электрона) и т.д.

Поскольку энергия электрона в атоме может принимать только дискретный набор значений $E_n = \frac{E_1}{n^2}$, то говорят, что она *квантована*. Для наглядного

представления возможных энергетических состояний электрона в атоме используется энергетическая диаграмма (рис. 14), на которой каждому энергетическо-

му состоянию электрона в атоме E_n соответствует горизонтальная линия – энергетический уровень. Энергетическую диаграмму изображают как систему энергетических уровней, расположенных на разных расстояниях друг от друга. Бор сделал предположение, что формула Бальмера

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

соответствует переходам электрона в атоме водорода с более высоких энергетических уровней ($n > 2$) на второй уровень. Таким образом, длины волн спектральных линий $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\delta$ можно вычислить с помощью энергетической диаграммы состояний электрона в атоме водорода (рис. 14). Действительно, если преобразовать формулу Бальмера, умножив обе ее



Рис. 14

части на hc , то получится выражение для энергии фотона,

$$E = h \cdot c \cdot R \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Расчеты Бора совпали с данными, полученными экспериментально. Все остальные спектральные серии атома водорода также можно описать с помощью формул: $E = h \cdot c \cdot R \cdot \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ – серия Лаймана; $E = h \cdot c \cdot R \cdot \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ – серия Пашена.

Как видно (рис. 15), излучение света атомом происходит при переходах электрона в атоме с внешних орбит на внутренние. Модель атома Бора позволила выразить постоянную Ридберга R через другие фундаментальные физические

константы: $R = -\frac{m \cdot e^4}{8 \cdot c \cdot h^3 \cdot \epsilon_0^2} = 1,097373 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$. Подчеркнем, что постоянная

Ридберга вычислена в предположении, что масса ядра атома бесконечно велика по сравнению с массой электрона и ядро неподвижно. Если же рассмотреть движение электрона и движения ядра вокруг их общего центра масс, тогда в уравнение движения вместо масс взаимодействующих частиц будет входить приведенная масса

$$\mu = \frac{m_e \cdot m_p}{m_e + m_p},$$

где m_e – масса электрона, m_p – масса ядра атома водорода (протона).

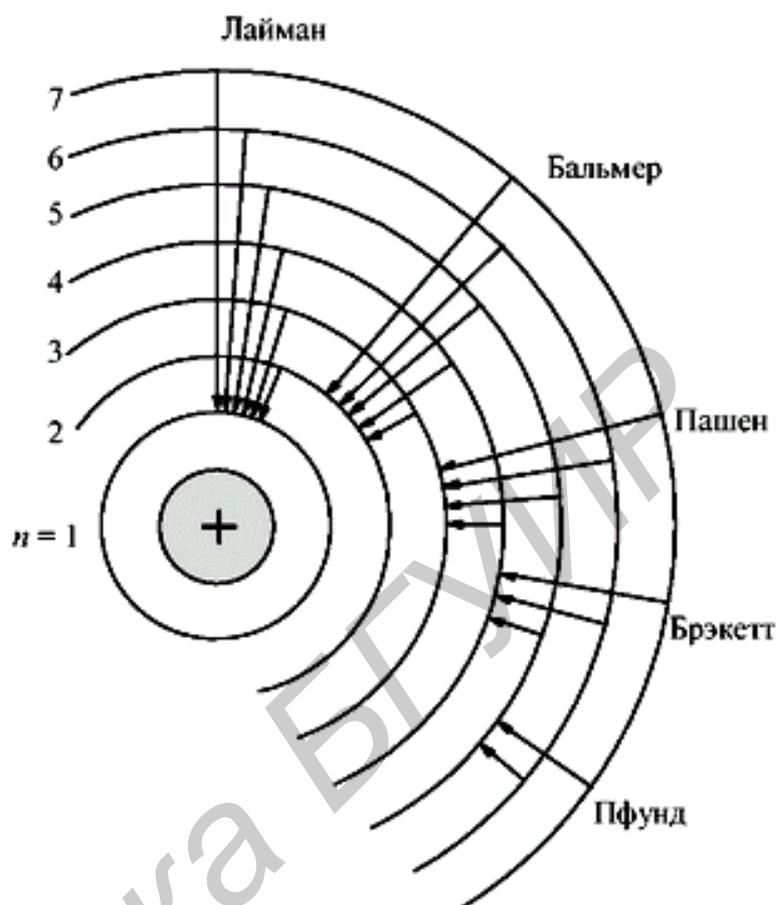


Рис. 15

Бор, используя малую поправку на конечность массы ядра, оценил отношение массы электрона к массе протона и получил

$$\frac{m_e}{m_p} = \frac{1}{1836}.$$

Теория Бора по-

зволяет описать не только атом водорода, но и ионизированные атомы (ионы) других элементов, вокруг ядер которых, как и в атоме водорода, вращается один электрон. Такие ионы называются *водородоподобными*. Примерами водородоподобных ионов могут служить однократно ионизированный атом гелия He^+ , двукратно ионизированный атом лития Li^{++} и т. д.

Атом гелия – один из простейших атомов, который следует за водородом в периодической таблице. Однако попытка создать теорию его строения явилась первой неудачей ученых. Далее стало ясно, что теория Бора является переходным этапом на пути познания атомных законов.

Контрольные вопросы

- 1) Как можно представить энергетическую диаграмму?
- 2) Как зависит энергия электрона от номера боровской орбиты?

Задача

1. Определить максимальную величину длины волны излучения в серии Лаймана. Постоянная Ридберга – $R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$. Ответ дать в нанометрах с точностью до целого.

Ответ: 121 нм.

2. Определить относительное изменение массы атома водорода при переходе электрона с первого энергетического уровня на второй. Масса протона – $1,65 \cdot 10^{-27}$ кг. Массой электрона пренебречь.

Ответ: $1,1 \cdot 10^{-8}$.

ГЛАВА 4. АТОМНОЕ ЯДРО

§ 4.1. Модель ядра

В экспериментах Резерфорда по изучению рассеяния α -частиц в 1911 г. было установлено, что *атом* состоит из положительного заряженного *ядра*, в котором сосредоточено 99,96 % массы атома и *электронов*. Радиус ядра имеет величину порядка 10^{-15} м (рис. 16).

Обладает ли атомное ядро структурой? В 1913 г. нидерландский физик Ван ден Брук предложил модель строения ядра, согласно которой оно состояло из положительно и отрицательно заряженных частиц. Наличие в ядре положительно заряженных частиц – *протонов*

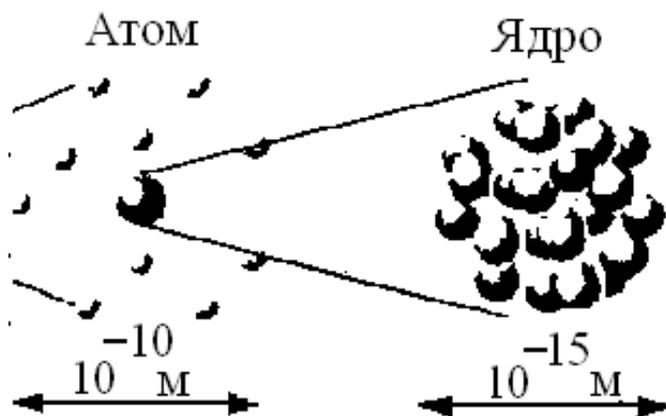


Рис. 16

было экспериментально обнаружено в 1919 г. Резерфордом. Протон обладает положительным зарядом $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, равным по величине заряду электрона,

а его масса – $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-19}$ кг, что примерно в 2000 раз превышает массу электрона.

Ядро атома водорода, например, содержит один протон. Однако предположение о существовании отрицательно заряженных частиц – электронов внутри атомного ядра привело к ряду противоречий между теорией и экспериментом. Магнитные свойства атомных ядер, рассчитанные теоретически по такой модели, не совпадали с результатами экспериментов.

В 1930 г. немецкие ученые Боте и Буккер изучали реакции, происходящие при облучении ядра бериллия ${}^9_4\text{Be}$ α -частицами. Они обнаружили новый тип излучения, которое обладало очень большой *проникающей* способностью. Это излучение первоначально назвали бериллиевыми лучами. Через два года английский физик Чедвик путем точных расчетов показал, что бериллиевые лучи на самом деле состоят из нейтральных частиц, которые он назвал *нейтронами*.

Нейтрон – частица, которая как и протон, электрон и фотон называется *элементарной*. Масса нейтрона – $m_n = 1,675 \cdot 10^{-19}$ кг почти точно совпадает с массой протона, однако он электрически нейтрален и не участвует в *кулоновских* взаимодействиях с атомными ядрами и электронами.

Нейтрон движется прямолинейно до тех пор, пока не столкнется с каким-либо атомным ядром. При столкновении с *тяжелыми* атомами нейтрон почти не теряет энергии, т.е. он ведет себя как упругий мяч, отскакивающий от стены. При столкновении же с *легкими* атомами нейтрон передает им часть своей энергии и начинает двигаться медленнее. С течением времени его кинетическая энергия будет соответствовать энергии *теплового* движения частиц окружающей среды. Такие медленно движущиеся нейтроны называются *тепловыми*. Они играют важную роль в *цепных ядерных реакциях*.

Вещества, содержащие легкие атомы, называются *замедлителями* нейтронов. Наиболее эффективными замедлителями являются вещества, в которых содержатся атомы водорода. Замедление движения происходит вследствие того, что масса атома водорода близка к массе нейтрона.

Открытие нейтронов позволило в 1932 г. советскому ученому Иваненко и немецкому ученому Гейзенбергу независимо друг от друга предложить *протонно-нейтронную модель* строения ядра. Согласно этой модели ядро состоит из частиц двух типов – протонов и нейтронов. Их объединяют общим названием *нуклоны* (от латинского *nucleus* – ядро).

Число протонов в ядре называется *атомным номером* и обозначается буквой Z . Общее число нуклонов назывался *массовым числом* и обозначается буквой A . Число нейтронов в ядре равно $N = A - Z$. В настоящее время для атомов химических элементов принято следующее обозначение: A_ZX . В природе встречаются ядра, содержащие одно и то же число протонов, но различающиеся числом нейтронов. Такие ядра называются *изотопами*. Например, хорошо известны изотопы водорода дейтерий 2_1H и тритий 3_1H , имеющие соответственно один и два нейтрона в ядре (рис. 17).

Химические свойства вещества определяются не атомной массой, а числом электронов в электрически нейтральном атоме элемента и их распределением по энергетическим уровням. Действительно, атомные массы изотопов различаются, а их химические свойства одинаковы. В то же время, изотопы водорода дейтерий 2_1H и тритий 3_1H имеют практически одинаковые атомные массы, но разные химические свойства.

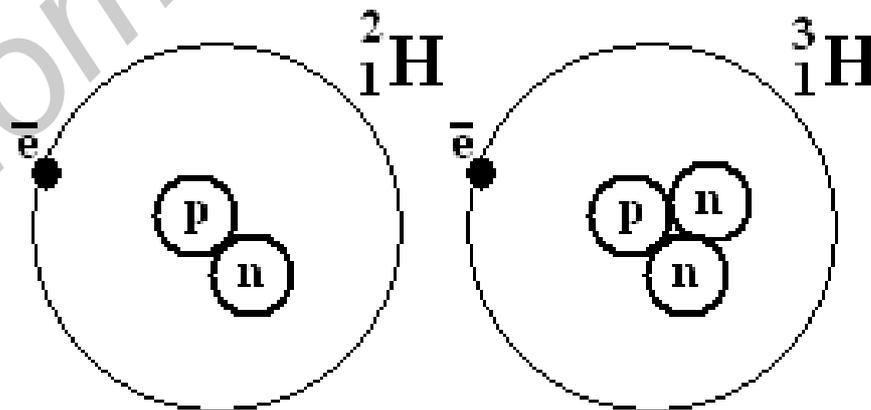


Рис. 17

При использовании протонно-нейтронной модели ядра возникает вопрос о его устойчивости. Между протонами действуют силы кулоновского отталкивания огромной величины. На расстоянии, соответствующему размерам ядра

10^{-15} м, электростатическая сила отталкивания составляет 230 Н. Это громадная сила для частицы массой 10^{-27} кг.

Причина устойчивости ядра скрыта в существовании внутри него кроме кулоновских, особых взаимодействий между нуклонами. Их называют *сильным взаимодействием*. Соответствующие им ядерные силы обладают рядом отличительных свойств:

- 1) являются только силами притяжения;
- 2) примерно в 100 раз превосходят по величине кулоновские силы отталкивания в ядре;
- 3) проявляются на расстояниях порядка 10^{-15} м, т.е. являются короткодействующими силами;
- 4) не зависят от электрического заряда взаимодействующих нуклонов;
- 5) не являются центральными силами;
- 6) обладают свойством насыщения, т.е. не могут удерживать более чем определенное число нуклонов.

Считается, что ядра имеют примерно сферическую форму, а объем ядра пропорционален массовому числу A . Для оценки величины радиуса ядра можно

использовать формулу $r = 1,4 \cdot 10^{-15} \cdot A^{\frac{1}{3}}$ м.

Определим плотность ядерного вещества, например ядра атома водорода, для этого его массу протона разделим на объем ядра. Расчеты показывают, что *все ядра имеют примерно одинаковую плотность* $1,8 \cdot 10^{17}$ кг/м³.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

- 1) Что такое нуклоны?
- 2) Какие силы обеспечивают устойчивость ядра?

§ 4.2. Дефект масс и энергия связи ядра

Массы ядер измеряют в атомных единицах массы (а.е.м.). Если использовать связь между энергией и массой $E = m \cdot c^2$, то размерность массы можно выразить в единицах энергии *электронвольтах*. Соотношения между различными

единицами измерения массы определяются с помощью формул: $1 \text{ а.е.м.} = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 931,5 \text{ МэВ}/c^2$, где $1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$.

Экспериментально было обнаружено, что массы ядер *меньше*, чем массы образующих их протонов и нейтронов в свободном состоянии. Величина этой разности масс зависит от силы взаимодействия нуклонов в данном ядре.

Дефектом масс называется разность между суммарной массой всех нуклонов ядра в свободном состоянии и массой ядра: $\Delta m = Z \cdot m_p + (A - z) \cdot m_n - m_{\text{я}}$.

Из соотношения Эйнштейна для массы и энергии можно получить величину энергии, которая отвечает дефекту масс. Под *энергией связи* атомных ядер понимается энергия, необходимая для расщепления ядра на отдельные нуклоны:

$$E_{\text{св}} = c^2 \cdot (Z \cdot m_p + (A - z) \cdot m_n - m_{\text{я}}).$$

Выражение для энергии связи можно записать в виде $E_{\text{св}} = 931,5 \cdot (Z \cdot m_p + (A - z) \cdot m_n - m_{\text{я}})$, где масса частиц измеряется *в атомных единицах массы*, а энергия – *в мегаэлектронвольтах*.

Рассчитаем энергию связи нуклонов в ядре бериллия ${}^8_4\text{Be}$, которое состоит из 4 протонов и 4 нейтронов. Масса протона $m_p = 938,28 \text{ МэВ}$, нейтрона – $m_n = 939,57 \text{ МэВ}$. Суммарная масса всех частиц составляет $7511,4 \text{ МэВ}$. Масса ядра бериллия равна $7454,7 \text{ МэВ}$. Тогда дефект масс составляет $\Delta m = 56,7 \text{ МэВ}$. Это будет равно, по определению, энергии связи ядра бериллия. Энергия такой величины удерживает все восемь нуклонов ядра. Следовательно, на каждый нуклон приходится примерно 7 МэВ , что подтверждается экспериментальными данными. Характеристикой устойчивости ядер служит *удельная энергия связи* ядра, т.е. энергия связи, одного нуклона, которая определяется как $E_{\text{св}}/A$. Чем больше эта величина, тем сильнее каждый нуклон связан с ядром, что дает большую устойчивость ядра. На рис.18 изображена зависимость удельной энергии связи от массового числа A . Сильнее всего связаны нуклоны в ядрах с массовыми числами порядка $50 - 60 \text{ а.е.м.}$ (т. е. для элементов от Cg до Zn). Энергия связи для этих ядер достигает $8,7 \text{ МэВ/нуклон}$. С ростом A удельная энергия связи постепенно уменьшается. Для урана ${}^{238}_{92}\text{U}$, самого тяжелого при-

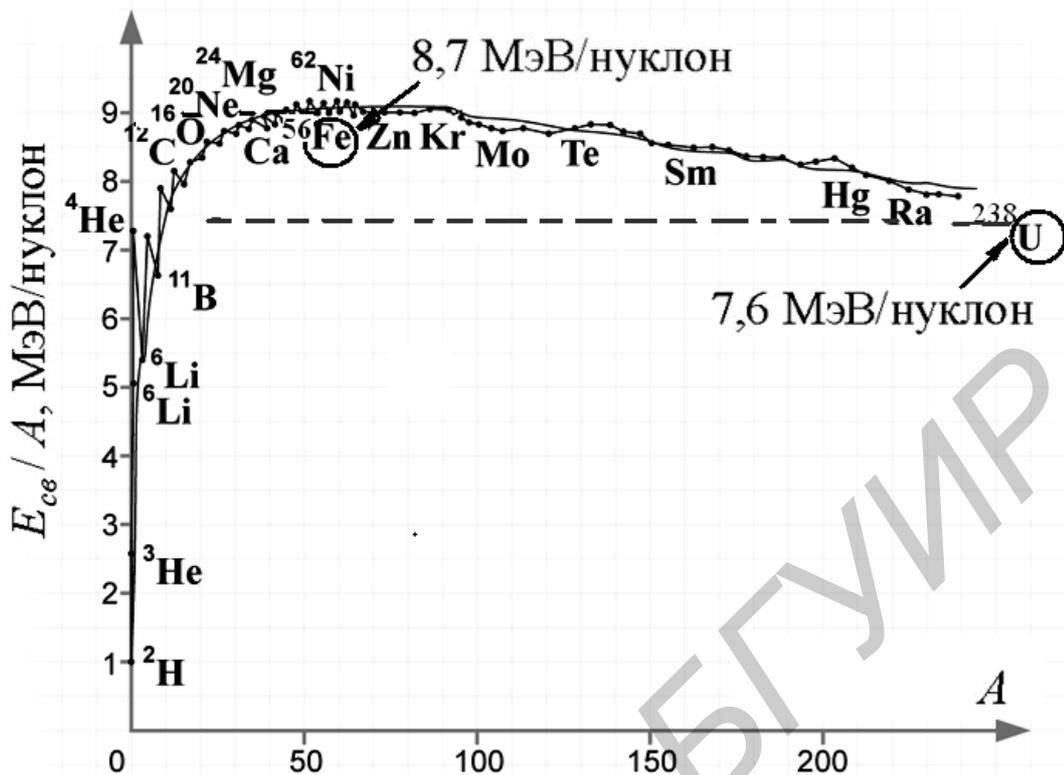


Рис. 18

родного элемента, она составляет 7,5 МэВ/нуклон. Такая зависимость удельной энергии связи от массового числа делает энергетически возможными два процесса:

- 1) деление тяжелых ядер на несколько более легких ядер;
- 2) слияние (синтез) легких ядер в одно ядро.

Оба процесса должны сопровождаться выделением большого количества энергии. Так, например, деление одного ядра с массовым числом $A = 240$ а.е.м. (удельная энергия связи равна 7,5 МэВ) на два ядра с массовыми числами $A = 120$ а.е.м. (удельная энергия связи равна 8,5 МэВ) привело бы к высвобождению энергии в 240 МэВ. Слияние двух ядер тяжелого водорода ${}^2_1\text{H}$ в ядро гелия ${}^4_2\text{He}$ привело бы к выделению энергии, равной 24 МэВ.

Кроме ядерных сил притяжения в ядре действуют электростатические силы отталкивания. Для ядер с достаточно большими атомными номерами кулоновское отталкивание превышает ядерное притяжение. Таким образом, должен существовать предел числа нуклонов, при котором добавление протонов

уже не может образовать устойчивое ядро. Оказывается, что не существует устойчивых ядер с $Z > 83$.

Контрольные вопросы

- 1) Что такое дефект масс?
- 2) Дайте определение удельной энергии связи.

Задача

1. Вычислить дефект масс для изотопа ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ в а.е.м. ($m_p = 1,0078$ а.е.м., $m_n = 1,0087$ а.е.м., $m_{\text{я}} = 55,9349$ а.е.м.).

Ответ: 0,5289 а.е.м.

2. Для расщепления ядра дейтерия на свободные протон и нейтрон требуется энергия $4 \cdot 10^{-13}$ Дж. Определить в мегаэлектронвольтах модуль энергии связи ядра дейтерия.

Ответ: 2,5 МэВ.

§ 4.3. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада

В 1896 г. французский физик Беккерель обнаружил, что соли урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ обладают способностью засвечивать фотопластинку самопроизвольно испуская какое-то излучение. *Радиоактивность* – явление спонтанного превращения неустойчивого изотопа одного химического элемента в изотоп другого элемента, которое сопровождается испусканием частиц, обладающих большой проникающей способностью. В 1898 г. Резерфорд и другие исследователи обнаружили, что по проникающей способности излучение можно разделить на три различных вида (рис. 19). Излучение первого вида с трудом проходило сквозь лист бумаги, второго – проникало сквозь алюминиевую пластину толщиной до 1 мм, а третьего – проходило сквозь слой свинца толщиной в несколько сантиметров. Три вида излучения были названы первыми тремя буквами греческого

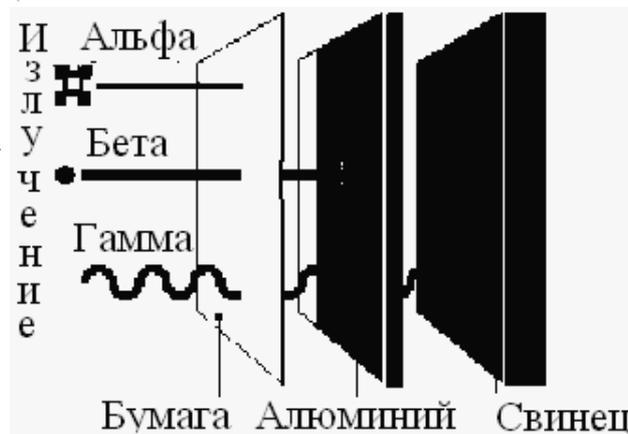


Рис. 19

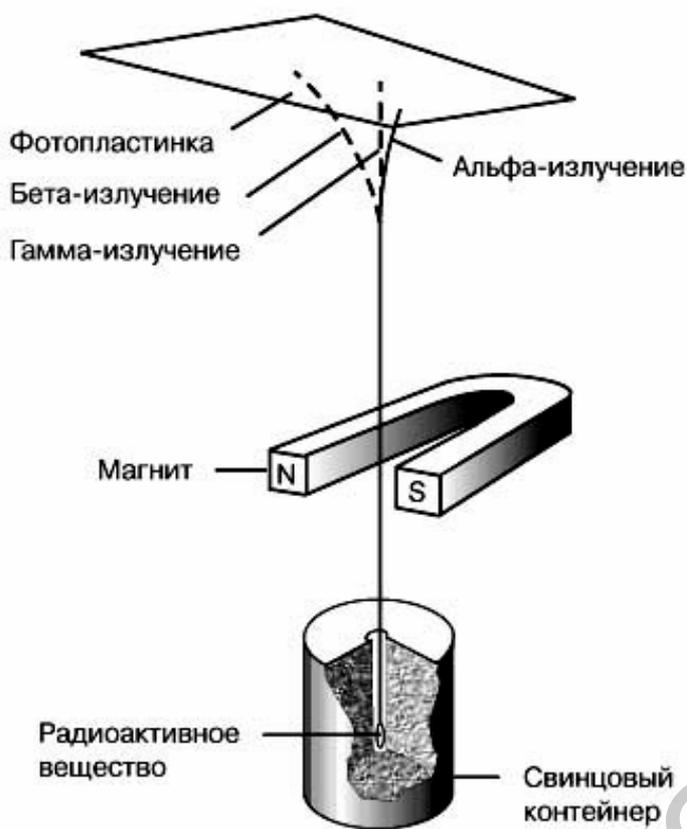
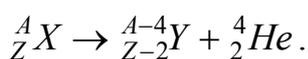


Рис. 20

алфавита α -, β - и γ -лучами. Позже было обнаружено, что эти лучи по-разному ведут себя в электрических и магнитных полях (рис.20). Данный факт указывал на то, что это потоки частиц с разными электрическими знаками. Ученые установили, что радиоактивные лучи представляют собой известные частицы, α -излучение – это ядра атомов гелия ${}^4_2\text{He}$, β -излучение – электроны, γ -излучение – фотоны очень

большой энергии. При распаде на-

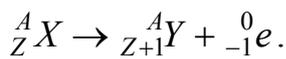
чального (материнского) ядра ${}^A_Z X$ продуктом распада оказывается некоторый изотоп Y с числом протонов равным $(Z - 2)$ и массовым числом $(A - 4)$:



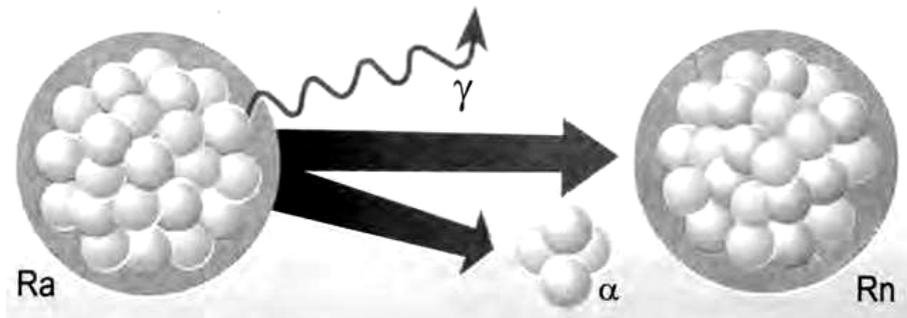
Особенности α -распада:

- 1) наблюдается для тяжелых ядер с $A > 200$ а.е.м.;
- 2) энергия частиц для различных ядер лежит в пределах 2 – 9 МэВ;
- 3) энергии и скорости испускаемых α -частиц в пучке очень близки друг к другу.

Примером α -распада является реакция ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$, в ходе которой получается радиоактивный газ радон (рис.21). При β -распаде ядра ${}^A_Z X$ образуется изотоп с атомным номером $Z+1$ и таким же массовым числом, как и материнское ядро. Для электронов в ядерной физике принято обозначение ${}^0_{-1}e$. С учетом этого реакцию β -распада можно записать следующим образом:



Эта закономерность в величине заряда ядра, найденная в 1913 г. английски-

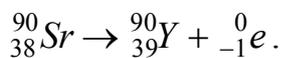


ми учеными Фаянсом и Содди, получила название *правила сдвига* (смещения).

Особенности β-распада:

- 1) наблюдается для тяжелых и средних ядер;
- 2) скорости электронов сильно различаются по величине.

Пример β-распада – излучение электрона изотопом стронция:



γ-излучение не приводит к превращениям элементов: ${}^A_Z X' \rightarrow {}^A_Z X + {}^0_0 \gamma$, штрих у символа ядра указывает на то, данное ядро находится в возбужденном состоянии.

Особенности γ-излучения:

- 1) очень коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны 10^{-10} – 10^{-13} м;
- 2) энергия γ-кванта находится в пределах от десятков килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт.

Обычно γ-излучение завершает радиоактивные превращения ядер при α- и β-излучениях. Конечные ядра (их называют *дочерними*) появляются в возбужденных состояниях и переходят затем в основные состояния, испуская γ-кванты.

Радиоактивный распад не зависит от внешних условий в широком интервале изменения таких параметров, как температура и давление. Процесс радиоактивного распада ядер по своему характеру является *статистическим* (вероятностным). В результате невозможно точно сказать, когда произойдет распад отдельно взятого ядра. Но можно оценить, сколько всего ядер распадется за данный промежуток времени.

Для каждого радиоактивного вещества существует характерный интервал времени, который называется периодом полураспада и обозначается T . *Период полураспада* – это промежуток времени, за который распадается ровно половина начального количества радиоактивных ядер.

Пусть в начальный момент времени число радиоактивных ядер было N_0 . Через интервал времени, равный периоду полураспада, это число станет равным $N_0/2$, спустя такой же интервал времени – $N_0/4$. Через произвольный промежуток времени число нераспавшихся ядер будет: $N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$. Это соотношение и выражает закон радиоактивного распада.

С помощью этого закона можно определить активность радиоактивного вещества. *Активность* – число радиоактивных распадов, происходящих в единицу времени: $A = \Delta N / \Delta t = \lambda \cdot N$. Единица активности в СИ – 1 *беккерель*, 1 Бк = 1 распад/с. Внесистемной единицей для измерения радиоактивной загрязненности вещества является 1 *кюри*, 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк. На практике обычно используются удельные единицы, например, 1 Ки/км², 1 Ки/м³ и т.д.

Закон радиоактивного распада позволяет сделать *оценку возраста Земли* на основе известного процентного содержания в урановой руде радиоактивных изотопов урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ и ${}_{92}^{235}\text{U}$. Среднее время жизни ядра связано с его периодом полураспада следующим образом: $T/0,71$. Измеренные времена жизни этих изотопов составляют соответственно $6,52 \cdot 10^9$ лет и $1,02 \cdot 10^9$ лет. Их процентное содержание в естественной смеси составляет 99,3 % для ${}_{92}^{238}\text{U}$ и 0,7 % для ${}_{92}^{235}\text{U}$. Можно предположить, что в момент образования химических элементов, содержание этих изотопов было *одинаковым*. Применение закона радиоактивного распада для каждого изотопа урана дает величину временного интервала прошедшего после начала распада в 6000 миллионов лет. Эта цифра хорошо согласуется с другими оценками возраста Земли или Солнечной системы, полученными на основе геологических и космологических соображений.

В 1946 г. американский физик Либби разработал геохронологический метод определения возраста предметов органического происхождения – по измерению содержания радиоактивного изотопа углерода $^{14}_6\text{C}$.

Метод измерения был основан на том, что некоторая часть азота $^{14}_7\text{N}$, который находится в атмосфере, непрерывно превращается в радиоактивный изотоп углерода $^{14}_6\text{C}$ в соответствии с реакцией $^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow ^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} + 0,6 \text{ МэВ}$. Данный процесс происходит под действием нейтронов, которые приносятся космическим излучением. Изотоп углерода распадается с периодом полураспада 5700 лет, однако его *общая концентрация* в атмосфере Земли остается *постоянной*. Радиоактивный изотоп углерода $^{14}_6\text{C}$, так же как и его стабильный вариант $^{12}_6\text{C}$, усваивается *живыми организмами* и на 1 кг углерода в органических соединениях приходится $5 \cdot 10^{13}$ изотопов $^{14}_6\text{C}$.

После прекращения жизнедеятельности организма количество атомов $^{14}_6\text{C}$ начинает уменьшаться и по *активности* распада можно определить возраст органических останков.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

- 1) Что такое радиоактивность ядер?
- 2) Что такое период полураспада?

З а д а ч а

1. Ядро изотопа урана $^{238}_{92}\text{U}$ испытывает два электронных β -распада и несколько α -распадов и превращается в ядро изотопа радия $^{226}_{88}\text{Ra}$. Сколько процессов α -распада произошло?

Ответ: 3.

2. Какая часть ядер ^{234}U , распадется за 125 тысяч лет? Период полураспада ядер урана – $25 \cdot 10^4$ лет.

Ответ: 0,295.

§ 4.4. Методы регистрации радиоактивного излучения

Радиоактивное излучение распространяется в среде и взаимодействует с атомами вещества. За счет своей кинетической энергии частица может выбить из атома электроны, т.е. *ионизировать* его. Часто одна частица может ионизировать несколько атомов. Поэтому процесс прохождения излучения через вещество сопровождается сильной ионизацией последнего. Радиоактивные излучения часто называют ионизирующими.

Одни методы регистрации излучений основаны на ионизирующем действии радиации. Другие используют *магнитное поле*, позволяющее по характеру отклонения заряженных частиц в области поля определить знак и величину удельного электрического заряда.

Приборы для регистрации ядерных излучений называют *детекторами*. Их можно разделить на две основные группы. *Трековые* детекторы позволяют наблюдать и фиксировать треки (следы) частиц. К ним относятся камера Вильсона, пузырьковая камера, толстослойные фотоэмульсии.

Дискретные детекторы регистрируют отдельные частицы, а также их энергию. К ним относятся разрядные и сцинтилляционные счетчики.

В *камере Вильсона* находятся *насыщенные пары* какой-либо жидкости (рис. 22). При резком увеличении объема камеры пары переходят в крайне неустойчивое пересыщенное состояние.

Если в этот момент в камеру попадает ионизирующая частица, то она образует отдельные ионы или целые группы ионов. Ионы становятся центрами конденсации. Активная конденсация, которая развивается вдоль траектории движения частицы, дает удобные для регистрации треки из капелек тумана. Треки ионизирующих частиц фиксируются на фотопленке. Если камеру Вильсона помес-

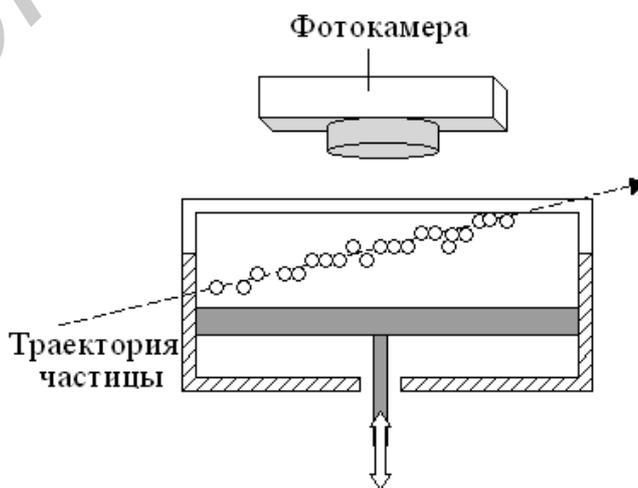


Рис. 22

тить в область магнитного поля, то треки заряженных частиц будут иметь форму кривых линий.

Пузырьковая камера отличается от камеры Вильсона в основном тем, что рабочей средой в ней является не пар, а жидкость. Преимущество по сравнению с камерой Вильсона обеспечивается использованием более плотного рабочего вещества, что позволяет применять пузырьковую камеру для регистрации частиц *высокой* энергии.

Для регистрации ионизирующего излучения от источников с *невысокой активностью* применяются газоразрядные счетчики. *Счетчик Гейгера – Мюллера* представляет собой газонаполненный цилиндр снабженный двумя электродами (рис. 23). Газ состоит из смеси легкоионизируемых неона и аргона с небольшой добавкой галогена – хлора или брома.

Счетчик работает на том участке вольтамперной характеристики, который соответствует *самостоятельному* электрическому разряду в газе. Поэтому создает одинаковые импульсы тока независимо от начальной ионизации и определяет



Рис. 23

только число ионизирующих частиц. Счетчик регистрирует почти 100 % радиоактивных частиц и порядка 5 % гамма-квантов. Сопротивление, которое включено в контур счетчика, быстро гасит импульс напряжения и подготавливает счетчик к регистрации следующей частицы.

Сцинтилляционные счетчики – приборы, работа, которых основана на явлении *люминесценции* для регистрации отдельных радиоактивных частиц.

Процесс преобразования кинетической энергии частицы в энергию световой вспышки называется сцинтилляцией (*scintillatio* в переводе с латинского означает сверкание, искрение). Световая вспышка, возникающая при попадании заряженной частицы в сцинтиллирующий кристалл, преобразуется фотоумножителем в импульсы электрического тока. С помощью импульсов тока можно определить как число зарегистрированных частиц, так и их энергию. Такие счетчики позволяют регистрировать 100 % заряженных частиц и 30 % гамма-квантов.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

- 1) Что можно наблюдать в камере Вильсона?
- 2) Какие устройства применяются для регистрации ионизирующего излучения от источников с невысокой активностью?

§ 4.5. Ядерные реакции

В 1898 г. Пьер Кюри и Мари Склодовская-Кюри открыли новые радиоактивные химические элементы – радий ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ и полоний ${}_{84}^{209}\text{Po}$. Резерфорд и Содди выдвинули гипотезу, согласно которой радиоактивные излучения возникают при *распаде* атомных ядер. Исследования подтвердили их гипотезу. Ряд изотопов являются *нестабильными* и самопроизвольно распадаются с испусканием того или иного излучения. *Неустойчивыми* являются ядра двух типов:

- 1) ядра, у которых *протонов* намного *больше* чем нейтронов.

Причина: избыток энергии кулоновского взаимодействия;

- 2) ядра, у которых число *нейтронов* намного *больше* числа протонов.

Причина: избыток суммарной массы нейтронов.

Многие нестабильные изотопы встречаются в природе, поэтому их радиоактивность называется *естественной*.

Ядерными реакциями называют процессы изменения атомных ядер, вызванные их взаимодействиями с элементарными частицами или друг с другом. В ходе реакций участвуют два ядра и две частицы: первая пара ядро-частица называется *исходной*, а другая – *конечной*. Суммарный электрический заряд и число нуклонов в ходе реакции должны *сохраняться*.

Символически уравнение ядерной реакции записывается в следующем виде: $A + a \rightarrow B + b$, здесь A – исходное ядро, a – налетающая частица, B – конечное ядро, b – испускаемая частица. Для протонов и нейтронов в ядерной физике приняты соответствующие символические обозначения 1_1p и 1_0n . Ядерная реакция может произойти под действием положительно заряженной частицы, если последняя обладает *достаточной* кинетической энергией для преодоления сил электростатического отталкивания.

Исторически первой исследованной ядерной реакцией под действием α -частицы считается реакция, в результате которой в 1919 г. Резерфордом был открыт *протон*: ${}^{14}_7N + {}^4_2He \rightarrow {}^{17}_8O + {}^1_1p$.

Нейтрон был открыт Чедвиком в 1932 г. в реакции радиоактивного превращения ядер бериллия в изотоп углерода при бомбардировке последнего α -частицами: ${}^9_4Be + {}^4_2He \rightarrow {}^{12}_6C + {}^1_0n$.

Ядерные реакции бывают двух типов *эндотермические* (с поглощением энергии) и *экзотермические* (с выделением энергии).

Если сумма масс исходного ядра и частиц, вступающих в реакцию, *больше* суммы масс конечного ядра и испускаемых частиц, то энергия *выделяется*, и наоборот.

Рассчитаем выход некоторой ядерной реакции: $A + a \rightarrow B + b$. Массовое число до реакции равно $(m_A + m_a)$, а после реакции – $(m_B + m_b)$. Разность энергий после и до реакции: $\Delta E = (m_B + m_b - m_A - m_a) \cdot c^2$. Если эта величина *меньше* нуля, то энергия *выделяется*. Такой вид энергии называется *энергетическим выходом ядерной реакции*. Его величина может достигать сотен мегаэлектронвольт, что в миллионы раз превышает выход энергии при *химических* реакциях.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

- 1) Кто экспериментально установил, что в состав атомных ядер входят нейтроны?
- 2) Что называют энергетическим выходом ядерной реакции?

§ 4.6. Реакция деления ядер. Цепная реакция

Если посмотреть на график зависимости удельной энергии связи нуклонов от их числа (рис.18), то видно, что расщепление ядра урана $^{238}_{92}\text{U}$ приводит к освобождению более 200 МэВ энергии. Такое количество энергии несравнимо ни с каким количеством теплоты, выделяемой в химических реакциях горения топлива.

Выводы теоретиков нашли свое подтверждение в ходе многих экспериментов в середине XX в. Основной вопрос для исследователей заключался в том, как заставить ядро делиться. Бомбардировка ядра α -частицами или протонами не является эффективной, так как они сильно отталкиваются ядром. Электроны слишком легкие, поэтому выбор пал на нейтроны. Они достаточно тяжелые, электрически нейтральны, могут двигаться с малой скоростью. Когда нейтрон попадает в сферу действия ядерных сил, то он ускоряется и проникает в ядро, разгоняясь до очень большой энергии.

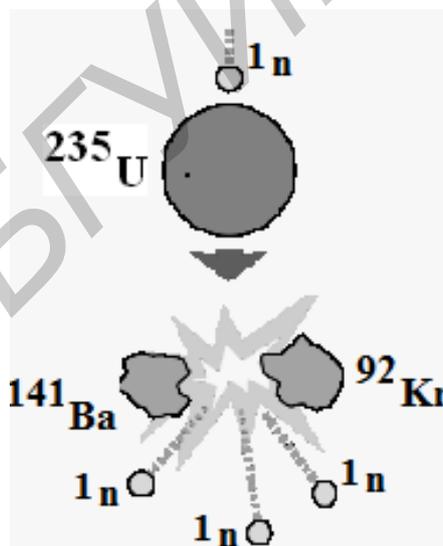


Рис. 24

В 1938 г. немецкие ученые Отто Хан, Фриц Штрассман и Лиза Мейтнер впервые осуществили деление ядра урана $^{235}_{92}\text{U}$ нейтронами по схеме: $^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{141}_{56}\text{Ba} + {}^{92}_{36}\text{Kr} + 3 \cdot {}^1_0\text{n} + 200 \text{ МэВ}$. Также было установлено, что при делении ядра, вызванном нейтронами, образуются осколки, отношение масс которых примерно равно 3:2 (рис. 24). Сама идея расщепления ядра столь была необычна, что ученый мир вначале не принял результаты их опытов.

Наглядно процесс деления можно представить, используя капельную модель ядра. Нуклоны интенсивно взаимодействуют только со своими ближайшими соседями. Как и молекулы на поверхности жидкости частицы, находящиеся на поверхности ядра, стремятся уйти вглубь и создают силы ядерного по-

верхностного натяжения. Поэтому ядро стремится принять шарообразную форму аналогично капле жидкости в состоянии невесомости (рис. 25, а). Нейтрон при поглощении ядром передает ему дополнительную внутреннюю энергию (подобно нагреву капли). Образуется промежуточное возбужденное состояние ядра. Ядерная «жидкость» начинает совершать колебания и ядро приобретает удлиненную форму типа гантели (рис. 25, б). Ядерные силы уже не могут удержать все нуклоны вместе. Вследствие электро-статического отталкивания двух или трех сгустков ядерной «жидкости» ядро расщепляется на части (рис. 25, в). Осколки деления, уже не связанные короткодействующими ядерными силами, с высокой скоростью разлетаются за счет

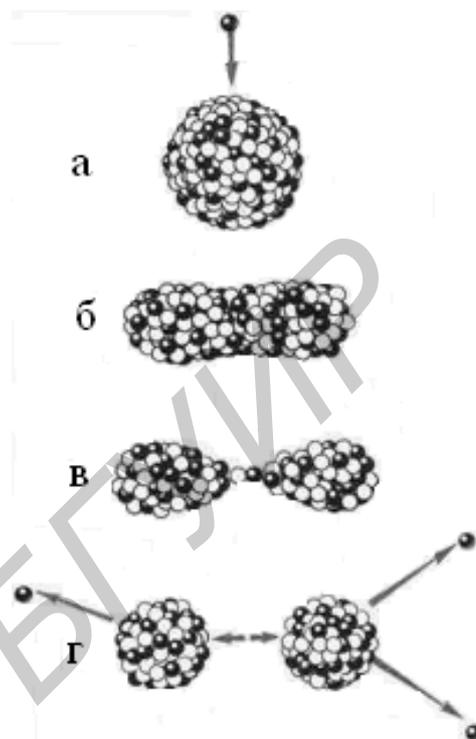


Рис. 25

электростатического отталкивания (рис. 25, г). Суммарная кинетическая энергия осколков ~ 170 МэВ составляет основную долю всей энергии освобождаемой при делении ядра ~ 200 МэВ. Появление осколков – не единственный результат деления ядра. Первоначальное отношение числа нейтронов к числу протонов в ядре-осколке заметно больше значения этой величины для стабильных ядер одинаковой массы. Поэтому на каждый акт деления ядра образуется 2–3 лишних нейтрона каждый с энергией в среднем 2 МэВ. Испускаемые при делении ядра нейтроны могут вызвать процесс деления других ядер урана. Следующее поколение нейтронов расщепляет новые ядра. Процесс рождения нейтронов и расщепления ядер урана лавинообразно нарастает (рис. 26). Так запускается *цепная реакция*, в которой в больших количествах образуются те частицы, которые вызывали данную реакцию. В результате неуправляемое развитие процессов деления ядер приводит к высвобождению колоссального количества энергии за очень короткий промежуток времени.

Характеристикой реакции деления является коэффициент размножения нейтронов k : отношение числа нейтронов последующего поколения к числу нейтронов в предыдущем. Коэффициент размножения должен быть больше единицы с учетом всех возможных потерь. Нейтроны могут поглощаться различными примесями, покидать область

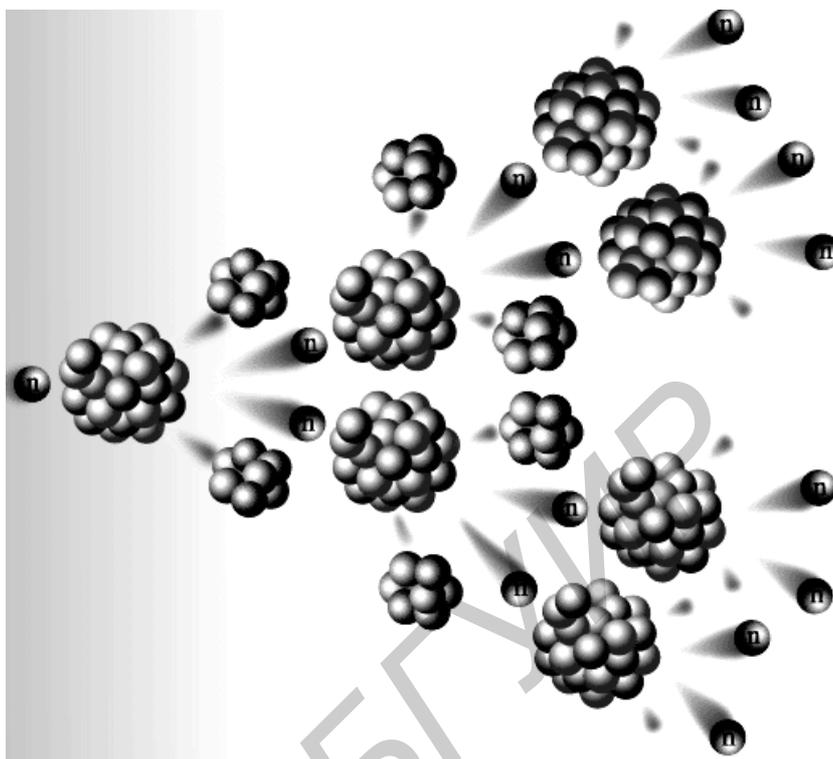


Рис. 26

с ядерным веществом, терять свою энергию в результате большого числа актов рассеяния. Существует минимальное количество вещества, необходимое для осуществления цепной реакции – критическая масса. Ее величина определяется размерами области пространства, в которой происходит цепная реакция. Если область будет очень маленькой, то нейтроны будут покидать ее без взаимодействия с ядрами. Для 50 кг урана ${}^{235}_{92}\text{U}$ форма критической фигуры – шар радиусом 8,5 см.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

- 1) Как называется модель процесса деления ядер?
- 2) Что такое коэффициент размножения нейтронов?

§ 4.7. Ядерный реактор. Термоядерная реакция

Цепная ядерная реакция может быть управляемой или неуправляемой (ядерный взрыв). В первом случае необходимо очень строго контролировать процесс размножения нейтронов. Если коэффициент размножения $k = 1$, то число нейтронов в зоне реакции все время будет оставаться неизменным. При $k > 1$ общее число нейтронов увеличивается со временем, что может привести к их неуправ-

ляемому размножению. При $k < 1$ число нейтронов уменьшается, а реакция деления с течением времени замедляется.

Ядерным реактором называется устройство (рис. 27), в котором происходит управляемая цепная реакция деления ядер. В ходе такого процесса освобождается тепловая энергия, которую можно использовать для производства электричества.

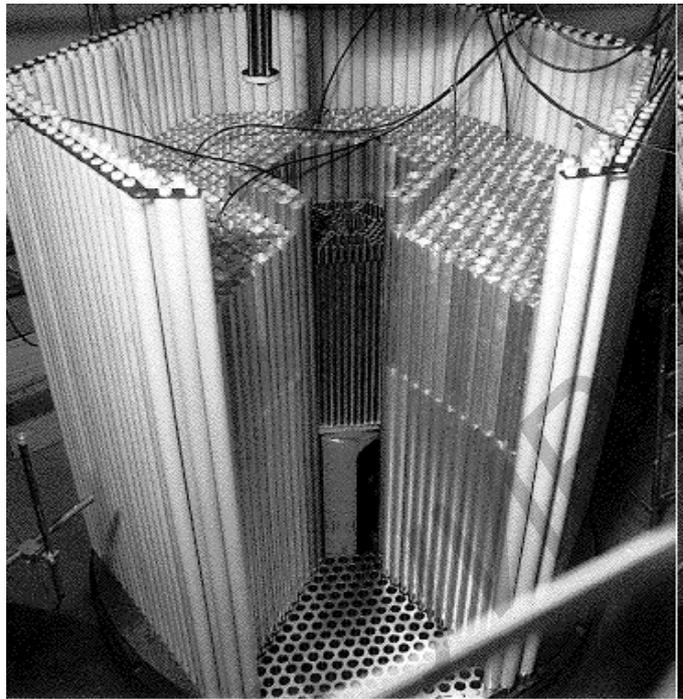


Рис. 27

Ядерный реактор имеет четыре основных рабочих элемента (рис. 28):

1) *Активная зона* реактора содержит ядерное горючее, которое находится

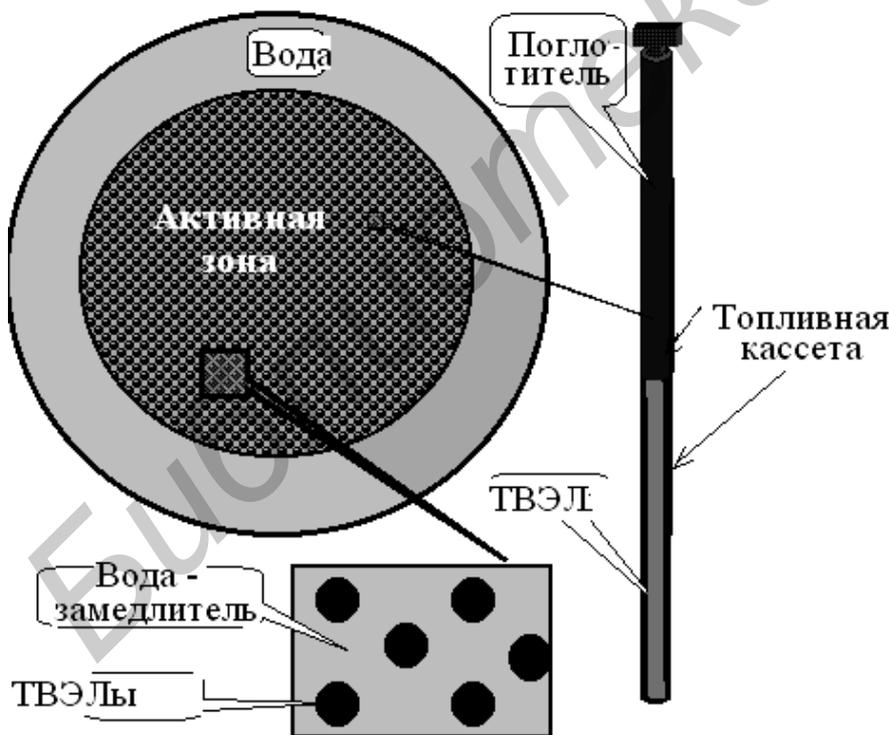
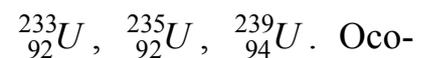


Рис. 28

в *твелах* – тепловыделяющих элементах. Они представляют собой очень длинные трубки, проходящие через всю активную зону реактора.

В твелах идет цепная реакция. В качестве ядерного топлива используется три вида радиоактивных изотопов



Особенность этих изотопов

состоит в том, что они делятся нейтронами различной энергии. Можно использовать даже тепловые нейтроны для этих целей.

2) *Замедлитель* быстрых нейтронов (графит, тяжелая вода, бериллий, окись бериллия, гидриды металлов, органические жидкости). Величина средней энергии нейтронов, рождающихся в реакторе, примерно равна 2 МэВ. Различают медленные (тепловые) и быстрые нейтроны. Если энергия нейтрона меньше 0,1 эВ (скорость – 2200 м/с), то он *тепловой*, а если энергия больше 0,1 МэВ (скорость – 10^7 м/с), то нейтрон *быстрый*. Замедлитель эффективно отбирает энергию от быстрых нейтронов, которые появляются в реакции деления. Нейтроны замедляются до энергий порядка нескольких долей электрон-вольт. Быстрые нейтроны имеют очень малую вероятность взаимодействия с ядром урана или плутония.

3) *Система охлаждения* содержит теплоноситель, который используется для отвода из активной зоны реактора определенного количества энергии. В качестве теплоносителя используется вода, жидкий натрий. Тепловая энергия выделяется через стенки твэлов, теплоноситель забирает тепло и переносит его в виде пара к турбине для генерации электромагнитной энергии.

4) *Система регулирования* обеспечивает возможность управления цепной реакцией. В системе регулирования используются кадмий, бор. Это вещество называют *поглотителем*, так как оно активно захватывает нейтроны в реакторе. Если стержни с поглотителем поднять вверх из активной зоны, то коэффициент размножения увеличится. Данный эффект позволяет регулировать скорость протекания реакции деления в реакторе.

Второй путь освобождения ядерной энергии связан с реакциями *синтеза*. Чтобы осуществить реакцию синтеза, нужно сблизить легкие ядра до расстояний 10^{-15} м, тогда и появится действие ядерных сил. Для преодоления кулоновского отталкивания ядер необходимо разогнать их до очень больших скоростей. Достижение таких скоростей становятся возможными при температурах порядка 10^8 К. Реакция слияния легких ядер при очень высокой температуре, сопровождающаяся выделением энергии, называется *термоядерной реакцией*, например: ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + 17,6 \text{ МэВ}$.

Большое практическое значение имеет тот факт, что при этой реакции на *каждый нуклон* выделяется намного больше энергии, чем при ядерной реакции, например, при синтезе ядра гелия из ядер водорода выделяется энергия, равная 3,5 МэВ, а при делении ядра урана на один нуклон приходится 0,85 МэВ.

Управляемая термоядерная реакция – энергетически выгодный процесс. При большой плотности вещества рабочая температура может быть достигнута путем создания в плазме мощных электронных разрядов. Однако появляется технически сложная проблема удержания плазмы в стабильном состоянии. Самоподдерживающиеся термоядерные реакции происходят в звездах. В настоящее время в ряде стран ведутся работы по осуществлению управляемой термоядерной реакции.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

- 1) Из каких составных частей состоит ядерный реактор?
- 2) Что такое термоядерный синтез?

З а д а ч а

1. Электрическая мощность одного реактора атомной станции равна 1,2 МВт, а КПД составляет 37,5 %. Удельная энергия связи ядра изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ равна 200 МэВ. Найти десятичный логарифм числа ядер, расщепляющихся в реакторе за секунду.

Ответ: 17.

2. Определить количество энергии, которое выделяется в реакции синтеза ядра гелия ${}_{3}^{7}\text{Li} + {}_{1}^{1}\text{p} \rightarrow 2 \cdot {}_{2}^{4}\text{He}$ в мегаэлектронвольтах. Удельная энергия связи ядра изотопа лития равна 5,6 МэВ, а гелия – 7,06 МэВ.

Ответ: 17,28 МэВ.

СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1. Специальная теория относительности.....	3
§ 1.1. Постулаты теории относительности	3
§ 1.2. Релятивистская кинематика	4
§ 1.3. Преобразования Лоренца	6
§ 1.4. Релятивистский закон преобразования скорости.....	8
§ 1.5. Релятивистский импульс и энергия	8
§ 1.6. Ускоритель на встречных пучках	10
Глава 2. Частицы и волны.....	13
§ 2.1. Внешний фотоэлектрический эффект	13
§ 2.2. Фотоны	16
§ 2.3. Волны де Бройля.....	18
Глава 3. Строение атома.....	21
§ 3.1. Закономерности в спектрах излучения атома.....	21
§ 3.2. Квантовые постулаты Бора.....	24
§ 3.3. Атом водорода.....	27
Глава 4. Атомное ядро.....	31
§ 4.1. Модель ядра	31
§ 4.2. Дефект масс и энергия связи ядра.....	34
§ 4.3. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада.....	37
§ 4.4. Методы регистрации радиоактивного излучения.....	41
§ 4.5. Ядерные реакции.....	42
§ 4.6. Реакция деления ядер. Цепная реакция	46
§ 4.7. Ядерный реактор. Термоядерная реакция.....	48

Учебное издание

ФИЗИКА КВАНТОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

Методическое пособие
для иностранных слушателей
подготовительного отделения

А в т о р - с о с т а в и т е л ь

Григорьев Александр Александрович

Редактор Е. Н. Батурчик

Подписано в печать . .2010	Формат 60x84 1/16	Бумага офсетная.
Печать ризографическая.	Гарнитура «Таймс»	Усл.печ.л.
Уч.-изд.л. 2, .	Тираж 100 экз.	Заказ 320

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004

220013, Минск, П.Бровки,6