

Глава 7

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

§ 7.1. АТОМНОЕ ЯДРО И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Слова «атомное ядро» и «элементарные частицы» уже неоднократно упоминались в нашем курсе физики. Вся атомная физика посвящена, в сущности, исследованию взаимодействия различных ядер и элементарных частиц друг с другом.

Проблема элементарных частиц возникла после открытия сложного строения атома, после открытия электрона. С момента же, когда Резерфорд доказал существование внутри атома ядра, началось развитие *ядерной физики* — науки о строении, свойствах и взаимных превращениях атомных ядер. Правда, вначале все внимание было сосредоточено на исследовании более простой и самой актуальной в начале XX в. проблемы строения электронной оболочки атома. Теория элементарных частиц и ядра начала развиваться значительно позднее, когда на основе квантовой механики была построена теория атома.

Первоначально разделения на ядерную физику и физику элементарных частиц не было. С многообразием мира элементарных частиц физики столкнулись при изучении ядерных процессов. Выделение физики элементарных частиц в самостоятельную область исследования произошло сравнительно недавно, около пятидесяти лет назад. Теперь мы имеем два самостоятельных раздела физики: содержание одного из них составляет изучение структуры и превращений атомных ядер, а содержание другого — изучение природы, свойств и взаим-

ных превращений элементарных частиц. Однако в отношении рассматриваемых и применяемых методов исследования у обоих разделов сохранилось много общего.

Если многие элементарные частицы (нейтрон, нейтрино и др.) были открыты при исследовании ядерных процессов, то, в свою очередь, исследование взаимодействия и взаимных превращений элементарных частиц пролило свет на многие ядерные процессы, такие, например, как β -излучение ядер (вылет из ядра электронов).

Можно предположить, что сегодняшняя относительная независимость этих двух разделов физики является временной. Она связана с тем, что пока мы еще не располагаем удовлетворительной количественной теорией элементарных частиц. В дальнейшем же вся ядерная физика будет строиться на основе теории элементарных частиц, подобно тому как квантовая теория атома уже сейчас строится на основе известных из опыта свойств атомных ядер и электронов.

Мы начинаем со знакомства с атомным ядром и посвятим этому большую часть времени. Лишь после этого перейдем к элементарным частицам.

Пока об атомном ядре нам известно следующее: 1) размеры ядра (10^{-12} — 10^{-13} см) в десятки или сотни тысяч раз меньше размеров атома (10^{-8} см); 2) заряд ядра равен его порядковому номеру Z в таблице Менделеева, умноженному на элементарный заряд e ; 3) практически вся масса атома сосредоточена в атомном ядре.

Теперь нам предстоит выяснить следующие фундаментальные вопросы: из чего состоит атомное ядро? Какие силы удерживают составные части ядра друг около друга? Какие превращения ядер возможны?

§ 7.2. МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Вначале ознакомимся с устройствами, которые вообще сделали возможным возникновение и развитие физики атомного ядра и элементарных частиц. Это устройства для регистрации и изучения отдельных актов — столкновений и взаимных превращений ядер и элементарных частиц. Именно они дают необходимую информацию о реальных событиях, которые происходят в микромире.

Принцип действия приборов для регистрации элементарных частиц

Любое устройство, регистрирующее элементарные частицы или движущиеся атомные ядра, подобно заряженному ружью со взведенным курком. Небольшое усилие при нажатии на спусковой крючок ружья вызывает эффект, не сравнимый с затраченным усилием, — выстрел.

Регистрирующий прибор — это более или менее сложная макроскопическая система, которая может находиться в неустойчивом состоянии. При небольшом возмущении, вызванном пролетевшей частицей, немедленно начинается процесс перехода системы в новое, более устойчивое состояние. Этот процесс и позволяет регистрировать частицу.

Методы регистрации частиц весьма разнообразны и в большом числе случаев, особенно при регистрации частиц высоких энергий, отличаются большой сложностью и дороговизной. Комплект регистрирующей аппаратуры, обслуживающей ускоритель элементарных частиц, по своей стоимости приближается к стоимости самого ускорителя.

В зависимости от целей эксперимента и условий, в которых он проводится, применяются те или иные регистрирующие устройства, отличающиеся друг от друга по основным характеристикам. К последним относятся: *эффективность* (отношение количества зарегистрированных частиц к числу частиц, попавших в прибор), *минимальное время регистрации* (время, за которое прибор после регистрации очередной частицы возвращается в исходное, рабочее состояние), *точность* измерений энергий, масс, зарядов частиц и т. д.

Мы ограничимся кратким описанием устройств, применяемых наиболее широко при исследовании элементарных частиц и в ядерной физике. С простейшим методом регистрации — подсчетом сцинтилляций вы уже знакомы.

Газоразрядный счетчик Гейгера

Счетчик Гейгера — один из важнейших приборов для автоматического счета частиц. Хорошие счетчики позволяют регистрировать до 10 000 и более частиц в секунду. Счетчик (рис. 7.1) состоит из стеклянной трубки 1, покрытой изнутри металлическим слоем (катод 2), и тонкой металлической нити, идущей вдоль оси трубки (анод 3). Трубка заполняется газом, обычно аргоном. Действие счетчика основано на ударной ионизации.

Заряженная частица (электрон, α -частица и т. д.), пролетая в газе, отрывает у атомов электроны и таким образом создает положительные ионы и свободные электроны. Электрическое поле между анодом и катодом (к ним подводится высокое напряжение) ускоряет электроны до энергий, при которых начинается ударная ионизация. Возникает лавина ионов, и ток через счетчик резко возрастает. При этом на нагрузочном резисторе R образуется импульс напряжения, который подается в регистрирующее устройство (обычно это усилитель и механический счетчик).

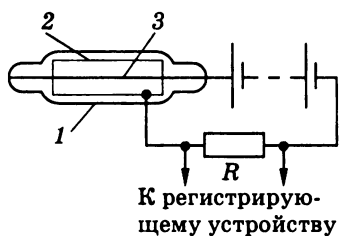


Рис. 7.1

Для того чтобы счетчик мог регистрировать новую частицу, лавинный разряд необходимо погасить. Это происходит автоматически. Так как в момент появления импульса тока падение напряжения на нагрузочном резисторе R велико, то напряжение между анодом и катодом резко уменьшается — настолько, что разряд прекращается и счетчик снова готов к работе.

Счетчик Гейгера применяется в основном для регистрации электронов и γ -квантов (фотонов большой энергии). Однако непосредственно γ -кванты вследствие их малой ионизирующей способности не регистрируются. Для их обнаружения внутреннюю стенку трубки покрывают материалом, из которого γ -кванты выбивают электроны. При регистрации электронов эффективность счетчика порядка 100%, а при регистрации γ -квантов всего лишь около 1%.

Регистрация тяжелых частиц (например, α -частиц) затруднена, так как довольно трудно сделать в счетчике достаточно тонкое «окошко», прозрачное для этих частиц.

При большом числе частиц механический счетчик не успевает срабатывать («захлебывается»). Поэтому применяют пересчетные радиотехнические устройства, позволяющие регистрировать какую-то известную долю всех импульсов (один из четырех или один из шестнадцати и т. д.).

Сцинтилляционный счетчик

В настоящее время в экспериментах на крупнейших ускорителях широко применяются сцинтилляционные и черенковские счетчики.

Метод сцинтилляций, напомним, состоит в подсчете крохотных вспышек света при попадании α -частиц на экран, покрытый сульфидом цинка. Впоследствии этим методом, как мало эффективным, перестали пользоваться. Однако в 40-х гг. сцинтилляционный метод был возрожден благодаря двум усовершенствованиям. Во-первых, непрозрачные экраны, покрытые сульфидом цинка (ZnS), были заменены прозрачными кристаллами некоторых органических соединений или неорганическими кристаллами иодида натрия (NaI) или иодида калия (KI) с примесями, а также прозрачными жидкими сцинтилляторами. Благодаря этому оказалось возможным заменить поверхностный эффект объемным и, используя большое количество сцинтилляций, обеспечить высокую чувствительность прибора. Во-вторых, вместо визуальной регистрации вспышек света в сцинтилляторе было предложено применять изобретенный к тому времени фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), имеющий коэффициент усиления около ста миллионов.

Сцинтилляционный счетчик представляет собой комбинацию сцинтиллятора (твердого или жидкого) и фотоумножителя (рис. 7.2). Излучаемый сцинтиллятором при прохождении частицы свет попадает на фотокатод ФЭУ. Выбитые из катода электроны ускоряются электрическим полем и размножаются за счет вторичных электронов, выбитых из промежуточных электродов — динодов. В конце концов возникает достаточно сильный импульс тока, который можно непосредственно регистрировать. Существенно, что сила тока выходного импульса счетчика прямо пропорциональна поглощенной сцинтиллятором энергии частицы. Это позволяет измерять энергию частиц.

Широкое применение сцинтилляционных счетчиков объясняется тем, что, имея простое устройство, они успешно регистрируют практически все частицы. Эффективность регистрации велика. Даже γ -кванты могут регистрироваться с эффективностью 100%. Используя большие объемы жидкого сцинтиллятора, можно регистрировать частицы, очень слабо взаимодействующие с веществом.

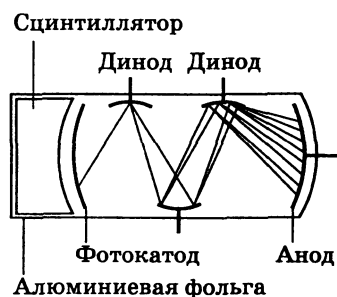


Рис. 7.2

Черенковский счетчик

На совершенно ином принципе основано действие черенковского счетчика. Советскими физиками, лауреатами Нобелевской премии П. А. Черенковым (1904—1990), И. Е. Таммом (1895—1971) и И. М. Франком (1908—1990) было установлено, что при движении частицы в среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде, возникает слабое излучение^{*}.

Происхождение черенковского излучения можно объяснить следующим образом. Рассмотрим ряд последовательных положений электрона, движущегося с постоянной скоростью $\vec{v}$ вдоль прямой КА (рис. 7.3). Каждую точку среды можно считать источником сферической волны, возникающей в момент прохождения через нее частицы. Так как скорость электрона больше скорости света в среде c_c , эти волны появляются только позади электрона. В момент, когда электрон находится в точке А, отдельные волны изображены окружностями разных радиусов. Согласно принципу Гюйгенса, огибающая этих сфер — волновой фронт — представляет собой коническую поверхность^{**}. Конус движется вперед со скоростью электрона. Угол раствора конуса определяется соотношением:

$$\sin \alpha = \frac{HB}{AB} = \frac{c_c t}{vt} = \frac{c_c}{v}. \quad (7.2.1)$$

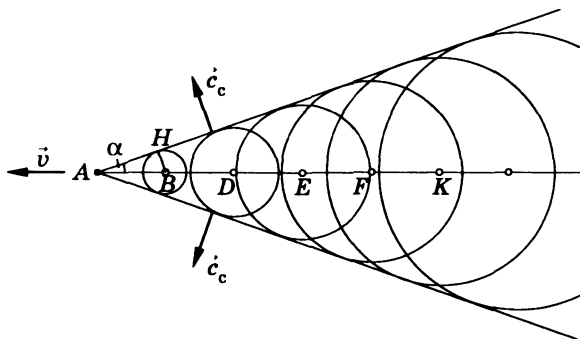


Рис. 7.3

^{*} Частица не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме. Но движение со скоростью, большей скорости света в среде, не противоречит теории относительности.

^{**} Аналогичное явление наблюдается при движении тела в воздухе со сверхзвуковой скоростью. Возникает ударная волна, которую вы можете слышать при полете сверхзвукового самолета.

Этот эффект можно использовать для регистрации элементарных частиц, улавливая с помощью чувствительного фотомножителя черенковское излучение, возникающее в газе, жидкости или прозрачном твердом теле.

Черенковские счетчики пригодны только для регистрации частиц, движущихся с релятивистскими скоростями. По углу между направлением движения частицы и направлением излучения можно с точностью до десятых долей процента определить скорость частицы.

Камера Вильсона

Счетчики позволяют лишь регистрировать факт прохождения через них частицы и фиксировать некоторые ее характеристики. Наиболее наглядная и точная информация о событиях микромира получается с помощью камеры Вильсона и ее «младшей сестры» — пузырьковой камеры. В этих приборах заряженная частица оставляет след, который можно наблюдать непосредственно или фотографировать. Эти приборы можно назвать «окнами» в микромир.

Камера Вильсона создана в 1912 г. английским физиком Ч. Вильсоном (1869—1959). Она представляет собой герметически закрытый сосуд, заполненный парами воды или спирта, близкими к насыщению (рис. 7.4. Цифрами обозначены: 1 — источник заряженных частиц; 2 — поршень; 3 и 4 — электроды для создания электрического поля, удаляющего ионы; 5 — лампа для бокового освещения; 6 — треки). При резком опускании поршня, вызванном уменьшением давления под поршнем, пар в камере адиабатически расширяется. Вследствие это-

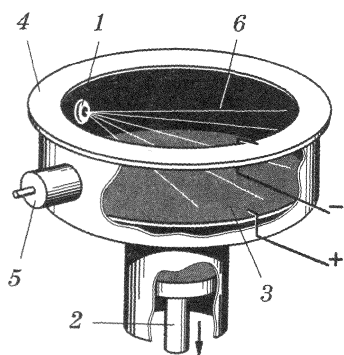


Рис. 7.4

го происходит охлаждение, и пар становится пересыщенным. Это неустойчивое состояние пара. Если частица проникает в камеру непосредственно перед расширением или после него, то ионы, которые она образует, будут действовать как центры конденсации. Возникающие на них капельки воды образуют след пролетевшей частицы — трек. Затем камера возвращается в исходное состояние и ионы удаляются электрическим

полем. Перед очередным расширением это поле выключается. В зависимости от размеров камеры время восстановления рабочего режима колеблется от нескольких секунд до десятков минут.

Информация, которую дают треки в камере Вильсона, значительно богаче той, которую могут дать счетчики. По длине трека можно определить энергию частицы, а по числу капелек на единицу длины трека оценивается ее скорость.

Помещая камеру в однородное магнитное поле (метод, предложенный советскими физиками П. Л. Капицей (1894—1984) и Д. В. Скобельциным (1892—1990)), можно по направлению изгиба траектории и ее кривизне определить знак заряда и отношение заряда к массе или импульс частицы (если ее заряд известен).

Хуже обстоит дело с нейтральными частицами. Они не оставляют следов в камере Вильсона, так как, не обладая зарядом, не вызывают ионизации атомов. Об их присутствии можно судить только по вторичным эффектам: столкновению с заряженными частицами или распадам на заряженные частицы.

Наиболее интересные события в микромире происходят при столкновениях частиц высокой энергии. Можно наблюдать целые серии последовательных превращений более тяжелых частиц в более легкие. Можно, но только не в камере Вильсона. Из-за малой плотности рабочего вещества камеры (газ) проследить длинную цепь рождений и распадов частиц нельзя. Частицы большой энергии слишком быстро покидают камеру, не испытав каких-либо превращений.

Пузырьковая камера

В 1952 г. физики справились с этой проблемой. Была построена пузырьковая камера. Эта камера наполняется жидкостью, чаще всего жидким водородом или пропаном. В подготовленном для работы состоянии жидкость в камере находится под высоким давлением, предохраняющим ее от закипания, несмотря на то что температура жидкости выше температуры кипения при атмосферном давлении. При резком понижении давления жидкость оказывается перегретой и в течение некоторого времени находится в этом неустойчивом состоянии. Для того чтобы она закипела, нужны какие-либо центры парообразования. Пролетающая заряженная частица и создает такие центры

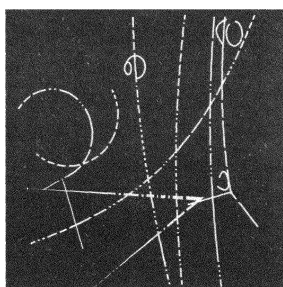


Рис. 7.5

в виде цепочки ионов. На этих ионах образуются пузырьки пара, составляющие трек частицы (рис. 7.5).

Длительность рабочего цикла камеры невелика — около 0,1 с. В этом состоит еще одно преимущество пузырьковой камеры перед камерой Вильсона.

Из-за большой плотности жидкости (по сравнению с плотностью газа) частица быстро теряет свою энергию. Пробеги частиц оказываются достаточно

короткими, и частицы даже больших энергий застревают в камере. Это позволяет наблюдать как распад частицы (или серию последовательных распадов), так и вызываемые ею реакции. Большинство новых элементарных частиц было открыто в последнее время с помощью пузырьковых камер.

Обработка информации, даваемой пузырьковой камерой, весьма трудоемка. Сначала фотографии треков просматривают и отбирают наиболее интересные. Затем изображения с помощью специального устройства преобразуются в серию электрических импульсов, подобно тому как это делается в телевизионной передающей трубке, и дальнейший анализ производится с помощью электронных вычислительных машин автоматически. И даже в этом случае на изучение каждой фотографии затрачивается довольно много времени. Поэтому обнаружить с помощью пузырьковой камеры очень редкие события в мире элементарных частиц довольно трудно.

Для увеличения вероятности обнаружения редких реакций между частицами изготавливают огромные пузырьковые камеры с рабочим объемом около 30 м^3 . Часто камеры заполняют более плотными жидкостями, чем водород или пропан, например фреоном.

Наблюдение следов элементарных частиц производит сильное впечатление, создает ощущение соприкосновения с микромиром.

Искровая камера

В 1957 г. была изобретена искровая камера. Ее действие основано на применении электрического пробоя. В камере имеется система плоскопараллельных пластин, расположенных близко друг к другу. Пространство между пластинами заполнено инертным газом (обычно неоном). На пластины подается высокое напряжение, чуть ниже пробойного. При пролете бы-

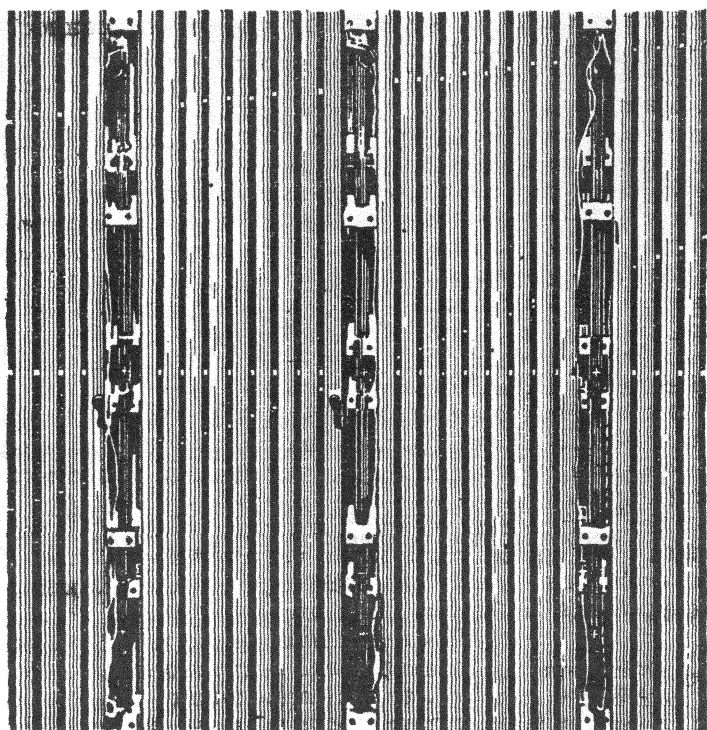


Рис. 7.6

строй частицы вдоль ее траектории между пластинами проскакивают искры, создавая огненный трек (рис. 7.6).

Главное преимущество искровой камеры по сравнению с пузырьковой состоит в том, что она может управляться автоматически. Команда к фотографированию треков дается лишь после того, как окружающие камеру счетчики зарегистрируют событие, представляющее интерес. Одновременно подается напряжение на электроды камеры. Часто при этом применяются электронные логические схемы, оценивающие автоматически до включения камеры важность получаемой информации.

Такое управление пузырьковой камерой невозможно. Дело в том, что время жизни зародышевых пузырьков очень мало (менее миллионной доли секунды) и за это время по сигналу счетчиков не успевает срабатывать механическое устройство, уменьшающее давление в камере. Но четкость треков в пузырьковой камере много выше, чем в искровой.

Искровая камера, кроме того, позволяет осуществлять автоматическую регистрацию треков с использованием электронно-

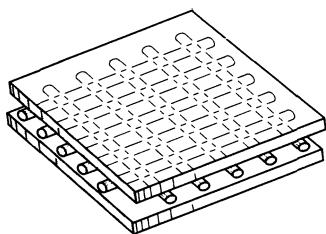


Рис. 7.7

вычислительных машин непосредственно в экспериментальной установке. Для этого электроды камеры выполняются в виде очень тонких параллельных проволочек, расположенных на расстоянии около одного миллиметра друг от друга (рис. 7.7). Искра при попадании в какую-либо проволочку вызывает в ней слабый ток, который фиксируется с помощью того или иного устройства и подается в вычислительную машину. Номера проволочек, в которых возник ток, определяют траекторию частицы. Таким образом, вычислительная машина сразу же получает сведения о процессах в камере и может тут же анализировать полученные данные. Это чрезвычайно сокращает время между экспериментом и получением обработанной информации.

Кроме того, внутри искровых камер можно помещать многотонные металлические пластины для увеличения вероятности обнаружения редких реакций. Поместить такие массивные мишени внутри пузырьковой камеры невозможно.

Для обнаружения редких реакций применяют в настоящее время сложные комбинированные детекторы, состоящие из больших объемов жидкого сцинтиллятора, множества фотоумножителей и счетчиков, нескольких искровых камер и мощных электромагнитов.

Метод толстослойных фотоэмульсий

До сих пор для регистрации частиц применяются толстослойные фотоэмульсии. Ионизирующее действие быстрых заряженных частиц на эмульсию фотопластинки позволило французскому физiku А. Беккерелю открыть в 1896 г. радиоактивность. Метод фотоэмульсии был развит советскими физиками Л. В. Мысовским, А. П. Ждановым и др.

Фотоэмульсия содержит большое количество микроскопических кристаллов бромида серебра. Быстрая заряженная частица, пронизывая кристаллик, отрывает электроны от отдельных атомов брома. Цепочка таких кристалликов образует скрытое изображение. При проявлении в этих кристалликах восстанавливается металлическое серебро и цепочка зерен серебра образует трек частицы (рис. 7.8). По длине и толщине трека можно оценить энергию и массу частицы.

Рис. 7.8

Из-за большой плотности фотоэмульсии треки получаются очень короткими (порядка 10^{-3} см для α -частиц, испускаемых радиоактивными элементами), но при фотографировании их можно увеличить.

Преимущество фотоэмульсий состоит в непрерывном суммирующем действии. Это позволяет регистрировать редкие явления. Важно и то, что благодаря высокой тормозящей способности фотоэмульсий увеличивается число наблюдаемых интересных реакций между частицами и ядрами.

§ 7.3. ОТКРЫТИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ

Нестабильность атомов была открыта в конце XIX в. Спустя 46 лет был построен первый ядерный реактор. Мы проследим за быстрым развитием физики атомного ядра в исторической последовательности.

Открытие *естественной радиоактивности* — явления, доказывающего сложный состав атомного ядра, произошло благодаря счастливой случайности. Рентгеновские лучи, как вы помните, впервые были получены при столкновениях быстрых электронов со стеклянной стенкой разрядной трубки. Одновременно наблюдалось свечение стенок трубки. Беккерель долгое время исследовал родственное явление — послесвечение веществ, предварительно подвергшихся облучению солнечным светом. К таким веществам принадлежат, в частности, соли урана, с которыми экспериментировал Беккерель.

И вот у него возник вопрос: не появляются ли после облучения солей урана наряду с видимым светом и рентгеновские лучи? Беккерель завернул фотопластинку в плотную черную бумагу, положил сверху крупинки урановой соли и выставил на яркий солнечный свет. После проявления пластинка почернела на тех участках, где лежала соль. Следовательно, уран со-

здавал какое-то излучение, которое, подобно рентгеновскому, пронизывает непрозрачные тела и действует на фотопластинку. Беккерель думал, что это излучение возникает под влиянием солнечных лучей. Но однажды, в феврале 1896 г., провести очередной опыт ему не удалось из-за облачной погоды. Беккерель убрал пластинку в ящик стола, положив на нее сверху медный крест, покрытый солью урана. Проявив на всякий случай пластинку два дня спустя, он обнаружил на ней почернение в форме отчетливой тени креста. Это означало, что соли урана самопроизвольно, без влияния внешних факторов создают какое-то излучение. Начались интенсивные исследования. Конечно, не будь этой счастливой случайности, радиоактивные явления все равно были бы открыты, но, по-видимому, значительно позже.

Вскоре Беккерель обнаружил, что излучение урановых солей ионизирует воздух, подобно рентгеновским лучам, и разряжает электроскоп. Испробовав различные химические соединения урана, он установил очень важный факт: интенсивность излучения определяется только количеством урана в препарате и совершенно не зависит от того, в какие соединения он входит. Следовательно, это свойство присуще не соединениям, а химическому элементу урану, его *атомам*.

Естественно было попытаться обнаружить, не обладают ли способностью к самопроизвольному излучению другие химические элементы, кроме урана. В 1898 г. Мария Склодовская-Кюри (1867—1934) во Франции и другие ученые обнаружили излучение тория. В дальнейшем главные усилия в поисках новых элементов были предприняты Марией Склодовской-Кюри и ее мужем Пьером Кюри. Систематическое исследование руд, содержащих уран и торий, позволило им выделить новый, неизвестный ранее химический элемент полоний, названный так в честь родины Марии Склодовской-Кюри — Польши.

Наконец, был открыт еще один элемент, дающий очень интенсивное излучение. Он был назван радием (т. е. лучистым). Само же явление самопроизвольного излучения было названо супругами Кюри **радиоактивностью**.

Радий имеет относительную атомную массу, равную 226, и занимает в таблице Менделеева клетку под номером 88. До открытия Кюри эта клетка пустовала. По своим химическим свойствам радий принадлежит к щелочноземельным элементам.

Впоследствии было установлено, что все химические элементы с порядковым номером более 83 являются радиоактивными.

§ 7.4. АЛЬФА-, БЕТА- И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

После открытия радиоактивных элементов началось исследование физической природы их излучения. Кроме Беккереля и супругов Кюри этим занялся Резерфорд.

Классический опыт, позволивший обнаружить сложный состав радиоактивного излучения, состоял в следующем. Радиоактивный препарат помещался на дно узкого канала в куске свинца. Против канала находилась фотопластинка. На выходящее из канала излучение действовало сильное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны лучу (рис. 7.9). Вся установка размещалась в вакууме.

В отсутствие магнитного поля на фотопластинке после проявления обнаруживалось одно темное пятно, точно против канала. В магнитном поле пучок распадался на три пучка. Две составляющие первичного потока отклонялись в противоположные стороны. Это указывало на наличие у этих излучений электрических зарядов противоположных знаков. При этом отрицательная компонента излучения отклонялась магнитным полем гораздо больше, чем положительная. Третья составляющая не отклонялась магнитным полем. Положительно заряженная компонента получила название альфа-лучей, отрицательно заряженная — бета-лучей и нейтральная — гамма-лучей (α -лучи, β -лучи, γ -лучи).

Эти три вида излучения очень сильно отличаются друг от друга по проникающей способности, т. е. по тому, насколько интенсивно они поглощаются различными веществами. Наименьшей проникающей способностью обладают α -лучи. Слой бумаги толщиной около 0,1 мм для них уже непрозрачен. Если прикрыть отверстие в свинцовой пластинке листочком бумаги, то на фотопластинке не обнаружится пятна, соответствующего α -излучению.

Гораздо меньше поглощаются при прохождении через вещество β -лучи. Алюминиевая пластинка полностью их задерживает только при толщине в несколько миллиметров. Наибольшей проникающей способностью обладают γ -лучи.

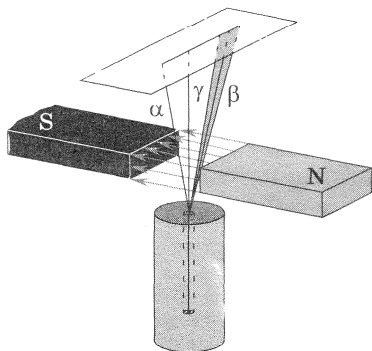


Рис. 7.9

Как и в случае рентгеновских лучей, интенсивность поглощения γ -лучей увеличивается с ростом атомного номера вещества-поглотителя. Но и слой свинца толщиной в 1 см не является для них непреодолимой преградой. При прохождении через такую пластину их интенсивность убывает лишь вдвое.

Физическая природа α -, β - и γ -лучей, очевидно, различна.

Гамма-лучи

По своим свойствам γ -лучи очень сильно напоминают рентгеновские, но только их проникающая способность гораздо больше, чем у рентгеновских лучей. Это наводит на мысль, что γ -лучи представляют собой электромагнитные волны. Все сомнения в этом отпали после того, как была обнаружена дифракция γ -лучей на кристаллах и измерена длина волны. Она оказалась очень малой — от 10^{-8} до 10^{-11} см.

На шкале электромагнитных волн γ -лучи непосредственно следуют за рентгеновскими. Скорость распространения в вакууме у γ -лучей такая же, как у всех электромагнитных волн, — около 300 000 км/с.

Бета-лучи

С самого начала α - и β -лучи рассматривались как потоки заряженных частиц. Проще всего было экспериментировать с β -лучами, так как они сильно отклоняются как в магнитном, так и в электрическом поле.

Основная задача состояла в определении заряда и массы частиц. При исследовании отклонения β -частиц в электрических и магнитных полях было установлено, что они представляют собой не что иное, как электроны, движущиеся со скоростями, очень близкими к скорости света. Существенно, что скорости β -частиц, испущенных данным радиоактивным элементом, неодинаковы. Встречаются частицы с самыми различными скоростями.

Альфа-частицы

Труднее оказалось выяснить природу α -частиц, так как они слабо отклоняются магнитным и электрическим полями.

Окончательно эту задачу удалось решить Резерфорду. Он измерил отношение заряда q частицы к ее массе m по отклонению в электрическом и магнитном полях. Оно оказалось примерно в 2 раза меньше, чем у протона — ядра атома водорода. Для определения массы α -частицы нужно было измерить еще ее заряд.

Это было сделано лишь после изобретения счетчика Гейгера. С его помощью подсчитывалось число частиц, попадающих в единицу времени внутрь металлического цилиндра, соединенного с электрометром (рис. 7.10). Сквозь очень тонкое окошко α -частицы могут проникать внутрь счетчика и регистрироваться им. Электрометр позволяет определить суммарный заряд α -частиц, испущенных за определенный интервал времени. Такого рода опыты показали, что заряд α -частицы равен удвоенному элементарному заряду. Следовательно, ее масса в 4 раза превосходит массу атома водорода, т. е. равна массе атома гелия. Таким образом, α -частица оказалась ядром атома гелия*.

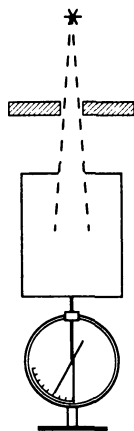


Рис. 7.10

Не довольствуясь достигнутым результатом, Резерфорд затем еще прямыми опытами доказал, что при радиоактивном α -распаде образуется гелий. Собирая α -частицы внутри специального резервуара на протяжении нескольких дней, Резерфорд с помощью спектрального анализа убедился в том, что в сосуде накапливается гелий (каждая α -частица захватывала два электрона и превращалась в атом гелия).

§ 7.5. РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Что же происходит с веществом при радиоактивном излучении? Ответить на этот вопрос в начале XX в. было очень не просто. Уже в самом начале исследований радиоактивности обнаружилось много странного и необычного.

Во-первых, удивительное постоянство, с которым радиоактивные элементы уран, торий и радий испускают излучения. На протяжении суток, месяцев и лет интенсивность излучения заметно не изменялась. На него не оказывали никакого влияния такие обычные воздействия, как нагревание или увеличение давления.

Химические реакции, в которые вступали радиоактивные вещества, также не влияли на интенсивность излучения.

* В то время (первое десятилетие XX в.) атомное ядро еще не было открыто. Поэтому Резерфорд говорил об ионе атома гелия.

Во-вторых, очень скоро после открытия радиоактивности выяснилось, что радиоактивность сопровождается выделением энергии. Пьер Кюри поместил ампулу с хлоридом радия в калориметр. В нем поглощались α -, β - и γ -лучи, и за счет их энергии нагревался калориметр. Кюри определил, что 1 г радия за 1 ч выделяет 582 Дж энергии. И эта энергия выделяется непрерывно на протяжении ряда лет.

Откуда же берется энергия, на выделение которой не оказывают никакого влияния все известные воздействия? По-видимому, при радиоактивности вещество испытывает какие-то глубокие изменения, совершенно отличные от обычных химических превращений. Было сделано предположение, что **превращения претерпевают сами атомы!**

Сейчас эта мысль не может вызвать особого удивления, так как о ней ребенок может услышать еще раньше, чем научиться читать. Но в начале XX в. она казалась фантастической и нужна была большая смелость, чтобы решиться высказать ее. В то время только что были получены бесспорные доказательства существования атомов. Идея Демокрита многовековой давности об атомистическом строении вещества наконец восторжествовала. И вот почти сразу же вслед за этим неизменность атомов ставится под сомнение.

Не будем рассказывать подробно о тех экспериментах, которые привели в конце концов к полной уверенности в том, что при радиоактивном распаде происходит цепочка последовательных превращений атомов. Остановимся только на самых первых опытах, начатых Резерфордом и продолженных им совместно с английским химиком Ф. Содди (1877—1956).

Резерфорд обнаружил, что *активность тория, определяемая как число распадов в единицу времени, остается неизменной в закрытой ампуле*. Если же препарат обдувается даже очень слабыми потоками воздуха, то активность тория сильно уменьшается. Резерфорд предположил, что одновременно с α -частицами торий испускает какой-то газ, который также является радиоактивным. Этот газ он назвал *эманацией**. Отсасывая воздух из ампулы, содержащей торий, Резерфорд выделил радиоактивный газ и исследовал его ионизирую-

* От латинского слова *emanatio* — истечение.

щую способность. Оказалось, что активность этого газа быстро убывает со временем. Каждую минуту активность убывает вдвое, и через десять минут она практически оказывается равной нулю. Содди исследовал химические свойства этого газа и нашел, что он не вступает ни в какие реакции, т. е. является инертным газом. Впоследствии газ был назван радоном и помещен в таблицу Менделеева под порядковым номером 86.

Превращения испытывали и другие радиоактивные элементы: уран, актиний, радий. Общий вывод, к которому пришли ученые, был точно сформулирован Резерфордом: «Атомы радиоактивного вещества подвержены спонтанным* видоизменениям. В каждый момент небольшая часть общего числа атомов становится неустойчивой и взрывообразно распадается. В подавляющем большинстве случаев выбрасывается с огромной скоростью осколок атома — α -частица. В некоторых других случаях взрыв сопровождается выбрасыванием быстрого электрона и появлением лучей, обладающих, подобно рентгеновским лучам, большой проникающей способностью и называемых γ -излучением.

Было обнаружено, что в результате атомного превращения образуется вещество совершенно нового вида, полностью отличное по своим физическим и химическим свойствам от первоначального вещества. Это новое вещество, однако, само также неустойчиво и испытывает превращение с испусканием характерного радиоактивного излучения.

Таким образом, точно установлено, что атомы некоторых элементов подвержены спонтанному распаду, сопровождающемуся излучением энергии в количествах, огромных по сравнению с энергией, освобождающейся при обычных молекулярных видоизменениях».

После того как было открыто атомное ядро, сразу же стало ясно, что именно оно претерпевает изменения при радиоактивных превращениях. Ведь α -частиц вообще нет в электронной оболочке, а уменьшение числа электронов оболочки на единицу превращает атом в ион, а не в новый химический элемент. Выброс же электрона из ядра меняет заряд ядра (увеличивает его) на единицу. Заряд ядра определяет порядковый номер элемента в таблице Менделеева и все его химические свойства.

* От латинского слова *spontaneus* — самопроизвольный.

§ 7.6. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА. ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА

Радиоактивный распад подчиняется статистическому закону.

Ранее уже упоминалось, что при исследовании радиоактивного распада Резерфорд установил опытным путем характер зависимости активности радиоактивных веществ от времени — *основной закон радиоактивного распада*. Оказалось, что для каждого радиоактивного вещества существует определенный интервал времени, на протяжении которого активность убывает в 2 раза. Этот интервал носит название *периода полураспада*. Период полураспада T — это то время, в течение которого распадается половина наличного числа радиоактивных атомов. Ведь уменьшения активности препарата в 2 раза можно достичь простым делением его на две равные части.

Спад активности A , т. е. числа распадов в секунду, в зависимости от времени для одного из радиоактивных веществ изображен на рисунке 7.11. Период полураспада этого вещества равен 5 сут.

Найдем теперь математическую формулу закона радиоактивного распада. Пусть число радиоактивных атомов в начальный момент времени ($t = 0$) равно N_0 . Тогда по истечении периода

полураспада это число будет равно $\frac{N_0}{2}$. Спустя еще один такой же интервал времени это число станет равным

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}.$$

По истечении времени $t = nT$, т. е. спустя n периодов полураспада T , радиоактивных атомов останется

$$N = N_0 \frac{1}{2^n}$$

или

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}. \quad (7.6.1)$$

Это и есть основной закон радиоактивного распада.

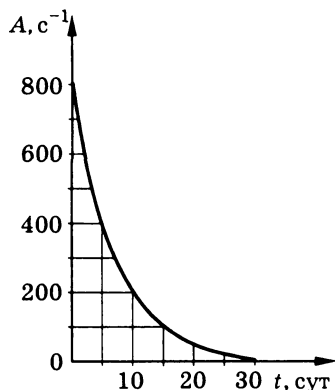


Рис. 7.11

Период полураспада — основная величина, характеризующая скорость радиоактивного распада. Для разных веществ он имеет сильно различающиеся значения. Так, для урана $T \approx 4,5$ млрд лет. Именно поэтому активность урана на протяжении отрезка времени в несколько лет заметно не меняется. Для радия $T = 1600$ лет. Поэтому активность радия значительно больше, чем урана. Чем меньше период полураспада, тем интенсивнее протекает распад. Есть радиоактивные элементы с периодом полураспада в миллионные доли секунды.

Период полураспада можно определить по формуле (7.6.1), подсчитав число атомов, распавшихся за некоторый промежуток времени, и зная число атомов в начальный момент.

Статистический характер закона радиоактивного распада

Сам закон радиоактивного распада довольно прост. Но физический смысл этого закона представить себе нелегко. Действительно, согласно этому закону за любой интервал времени распадается одна и та же доля имеющихся атомов (за период полураспада — половина атомов). Значит, с течением времени скорость распада нисколько не меняется. Радиоактивные атомы не «стареют». Так, атомы радона, возникающие при распаде радия, имеют одинаковые шансы претерпеть радиоактивный распад как сразу же после своего образования, так и спустя полчаса после этого. Распад любого атомного ядра — это, так сказать, не «смерть от старости», а «несчастный случай» в его жизни. Для радиоактивных атомов (точнее, ядер) не существует понятия возраста. Можно определить лишь *среднее время жизни* τ .

Время существования отдельных атомов может колебаться от долей секунды до миллиардов лет. Атом урана, например, может спокойно пролежать в земле миллиарды лет и внезапно взорваться, в то время как его соседи благополучно продолжают оставаться в прежнем состоянии. Среднее время жизни — это просто среднее арифметическое времен жизни достаточно большого количества атомов данного сорта. Оно прямо пропорционально периоду полураспада. Можно показать, что

$$\tau \approx 1,4T. \quad (7.6.2)$$

Предсказать, когда произойдет распад данного атома, невозможно. Определенный смысл имеют только утверждения о поведении в среднем большой совокупности атомов. Именно в

среднем число атомов, распадающихся за данный интервал времени, определяется законом радиоактивного распада. Но всегда имеются неизбежные отклонения от среднего значения, и чем меньше количество атомов в препарате, тем больше эти отклонения. Закон радиоактивного распада является *статистическим законом*. Он справедлив в среднем для большого количества частиц. Для малого числа атомов говорить об определенном законе радиоактивного распада не имеет смысла.

Если поднести радиоактивный препарат с малой активностью к счетчику, дающему звуковой сигнал (щелчок) при регистрации частицы, то щелчки будут следовать друг за другом нерегулярно, хаотически. Здесь вероятностный характер распада ощущается непосредственно. Каждый щелчок означает, что один из бесчисленных миллиардов атомов препарата самопроизвольно взрывается, выбрасывая быструю частицу.

Статистический характер закона радиоактивного распада есть следствие того, что законы поведения микрочастиц — законы квантовой механики — являются статистическими. Только после создания квантовой механики удалось построить теорию радиоактивных превращений атомных ядер.

Определение возраста Земли

Возраст Земли имеет тот же порядок, что и возраст древнейших пород. Этот возраст можно оценить по относительному содержанию естественных радиоактивных ядер и продуктов их распада. Так, например, уран после цепочки радиоактивных распадов превращается в конце концов в стабильный свинец. Если в данном минерале, содержащем уран, весь свинец имеет радиоактивное происхождение, то по отношению числа атомов урана к числу атомов свинца можно определить возраст минерала. Подобные оценки позволяют утверждать, что возраст Земли 4,5 млрд лет.

§ 7.7. ИЗОТОПЫ

Изучение радиоактивности привело к важному открытию, касающемуся природы атомных ядер.

В результате наблюдения огромного числа радиоактивных превращений постепенно выяснилось, что существуют вещества, имеющие совершенно различные радиоактивные свойства

(т. е. распадающиеся разными способами), но совершенно тождественные по своим химическим свойствам. Их никак не удалось разделить всеми известными химическими способами. На этом основании Содди в 1911 г. высказал предположение о возможности существования элементов с одинаковыми химическими свойствами, но различающихся в других отношениях, в частности своей радиоактивностью. Эти элементы нужно помещать в одну и ту же клетку периодической системы Менделеева. Содди назвал их **изотопами** (т. е. занимающими одинаковые места).

Предположение Содди получило блестящее подтверждение и глубокое толкование год спустя, когда Дж. Дж. Томсон предпринял точные измерения массы ионов неона методом отклонения их в электрических и магнитных полях. Томсон обнаружил, что неон представляет собой смесь двух сортов атомов. Большая часть их имеет относительную массу, равную 20. Но имеется незначительная добавка атомов с относительной атомной массой 22. В результате относительная атомная масса смеси равна 20,2. Атомы, обладающие одними и теми же химическими свойствами, различались массой. Оба сорта неона, естественно, занимают одно и то же место в таблице Менделеева и, следовательно, являются изотопами. Таким образом, изотопы могут отличаться не только своими радиоактивными свойствами, но и массой. Именно последнее обстоятельство и оказалось главным. У изотопов заряды атомных ядер, которые определяют число электронов в оболочке и, следовательно, химические свойства атомов, одинаковы. Но массы ядер различны. Причем ядра могут быть как радиоактивными, так и стабильными. Различие свойств радиоактивных изотопов связано с тем, что их ядра имеют различную массу.

В настоящее время установлено существование изотопов у всех химических элементов, но только не все элементы имеют стабильные изотопы. Изотопы есть у самого тяжелого из существующих в природе элементов — урана (относительные атомные массы 238, 235 и др.) и у самого легкого — водорода (относительные массы 1, 2, 3).

Особенно замечательны изотопы водорода, так как они отличаются друг от друга по массе в 2 или 3 раза. Изотоп с относительной атомной массой 2 называется **дейтерием**. Он стабилен и входит в качестве небольшой примеси (1 : 4500) в обычный водород. При соединении дейтерия с кислородом образуется так называемая *тяжелая вода*. Ее физические свой-

ства заметно отличаются от свойств обычной воды. При нормальном атмосферном давлении она кипит при $101,2^{\circ}\text{C}$ и замерзает при $3,8^{\circ}\text{C}$.

Изотоп водорода с атомной массой 3 называется **тритием**. Он β -радиоактивен с периодом полураспада около 12 лет.

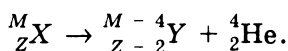
Существование изотопов доказывает, что заряд атомного ядра и, следовательно, строение электронной оболочки определяют не все свойства атомов, а лишь его химические свойства и те физические свойства, которые зависят от периферии электронной оболочки, например размеры. Масса же атома и его радиоактивные свойства не определяются порядковым номером в таблице Менделеева.

Существенно, что при точном измерении относительных атомных масс изотопов выяснилось, что они близки к целым числам. Сильное отклонение относительных атомных масс некоторых химических элементов от целых чисел (атомная масса хлора, например, равна 35,5) объясняется тем, что в естественном состоянии химически чистое вещество представляет собой смесь изотопов в различных пропорциях. Целочисленность (приближенная) относительных атомных масс изотопов очень важна для выяснения строения атомного ядра.

§ 7.8. ПРАВИЛО СМЕЩЕНИЯ

Лишь после того как были открыты изотопы, удалось разобраться в последовательной цепи радиоактивных превращений элементов.

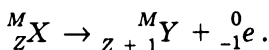
Эти превращения подчиняются так называемому **правилу смещения**, сформулированному впервые Содди: при α -распаде ядро теряет положительный заряд $2e$, и масса его убывает приблизительно на четыре единицы относительной атомной массы. В результате элемент смещается на две клетки к началу периодической системы. Символически это можно записать так:



Здесь элемент обозначается, как и в химии, общепринятыми символами; заряд ядра записывается в виде индекса слева внизу символа, а атомная масса — в виде индекса слева вверху символа. Например, обычный изотоп водорода обозначается символом

${}^1_1\text{H}$, дейтерий — символом ${}^2_1\text{H}$. Для α -частицы, являющейся ядром атома гелия, применяется обозначение ${}^4_2\text{He}$ и т. д.

При β -распаде из ядра вылетает электрон. В результате заряд ядра увеличивается на единицу, а масса остается почти неизменной:



Здесь ${}^0_{-1}e$ обозначает электрон: индекс «0» вверху означает, что масса его очень мала по сравнению с единицей относительной атомной массы. После β -распада элемент смещается на одну клетку ближе к концу периодической системы.

Гамма-излучение не сопровождается изменением заряда; масса же ядра меняется ничтожно мало.

Правила смещения показывают, что при радиоактивном распаде сохраняется электрический заряд и приблизительно сохраняется относительная атомная масса ядер.

Возникшие при радиоактивном распаде новые ядра в свою очередь обычно также радиоактивны.

§ 7.9. ИСКУССТВЕННОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ АТОМНЫХ ЯДЕР

Впервые в истории человечества искусственное превращение ядер было осуществлено Резерфордом в 1920 г. Это было уже не случайное открытие.

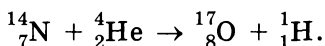
Так как ядро весьма устойчиво и ни высокие температуры, ни давления, ни электромагнитные поля не вызывают превращения элементов и не влияют на скорость радиоактивного распада, то Резерфорд предположил, что для разрушения или преобразования ядра нужна очень большая энергия. Наиболее подходящим носителем большой энергии в то время были α -частицы, вылетающие из ядер при радиоактивном распаде.

Первым ядром, подвергшимся искусственному преобразованию, было ядро азота ${}^{14}_7\text{N}$. Бомбардируя азот α -частицами большой энергии, испускаемыми радием, Резерфорд обнаружил появление протонов — ядер атома водорода.



Рис. 7.12

В первых опытах регистрация протонов проводилась методом сцинтилляций, и результаты опыта не были достаточно убедительными и надежными. Но спустя несколько лет превращение азота удалось наблюдать в камере Вильсона. Примерно одна α -частица на 50 000, испущенных радиоактивным препаратом в камере, захватывается ядром азота, что приводит к испусканию протона. При этом ядро азота превращается в ядро изотопа кислорода:



На рисунке 7.12 показана одна из фотографий этого процесса. Слева видна характерная «вилка» — разветвление трека. Жирный след принадлежит ядру кислорода, а тонкий — протону. Остальные α -частицы не претерпевают столкновений с ядрами, и их треки прямолинейны.

Другими исследователями были обнаружены превращения под влиянием α -частиц ядер фтора, натрия, алюминия и др. Ядра тяжелых элементов конца периодической системы не испытывали превращений. Очевидно, их большой электрический заряд не позволял α -частице приблизиться к ядру вплотную.

Существенно, что кинетическая энергия α -частицы не равняется сумме кинетических энергий протона и нового ядра, возникшего в результате превращения. Реакция идет с поглощением кинетической энергии. Часть кинетической энергии (примерно $1,2 \cdot 10^6$ эВ) переходит во внутреннюю энергию вновь образовавшегося ядра.

Но аналогичная реакция расщепления ядра алюминия приводит к выделению кинетической энергии: кинетическая энергия продуктов реакции больше кинетической энергии α -частицы, бомбардировавшей ядро алюминия, на 400 000 эВ. Это громадная энергия, но использовать ее здесь практически нельзя. Ведь большая часть α -частиц не вызывает реакции, и их кинетическая энергия теряется без пользы. Однако уже эти наблюдения показали, что запасы энергии внутри атомных ядер исключительно велики, и нужно только суметь эту энергию извлечь.

§ 7.10. ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА

В 1932 г. произошло важнейшее для всей ядерной физики событие — был открыт нейтрон.

При бомбардировке бериллия α -частицами протоны не появлялись. Но обнаружилось какое-то сильно проникающее излучение, способное преодолеть такую преграду, как свинцовая пластина в 10—20 см толщиной. Было сделано предположение, что это γ -лучи большой энергии. Ирен Жолио-Кюри (дочь Марии и Пьера Кюри) и ее муж Фредерик Жолио-Кюри (1900—1958) обнаружили, что если на пути излучения бериллия поставить парафиновую пластину, то ионизирующая способность этого излучения резко увеличивается. Они справедливо предположили, что излучение бериллия выбивает из парафиновой пластины протоны, имеющиеся в большом количестве в этом водородсодержащем веществе. С помощью камеры Вильсона (схема опыта приведена на рисунке 7.13) супруги Жолио-Кюри обнаружили эти протоны и по длине пробега оценили их энергию. Если допустить, что протоны ускорялись в результате столкновения с γ -квантами, то энергия этих квантов должна быть огромной — около 55 МэВ.

В 1932 г. ученик Резерфорда — английский физик Д. Чедвик (1891—1974) наблюдал в камере Вильсона треки ядер азота, испытавших столкновение с бериллиевым излучением. По его оценке, энергия γ -квантов, способных сообщать ядрам скорость, соответствующую наблюдениям, должна была составлять 90 МэВ. Наблюдения же ядер отдачи аргона привели к еще более огромной цифре — 150 МэВ. Таким образом, считая, что ядра приходят в движение в результате столкновения с частицами, лишенными массы покоя, исследователи пришли к явному противоречию: одним и тем же γ -квантам приходилось приписывать различную энергию.

Стало очевидным, что предположение об излучении бериллием γ -квантов, т. е. частиц, лишенных массы покоя, несостоятельно. Из бериллия под действием α -частиц вылетают какие-то достаточно тяжелые частицы, так как только при столкновениях с тяжелыми частицами протоны или ядра азота и аргона



Рис. 7.13

могли получить ту большую энергию, которая наблюдалась. Поскольку эти частицы обладали большой проникающей способностью и непосредственно не ионизировали газ, то, следовательно, они были электрически нейтральными. Ведь заряженная частица сильно взаимодействует с веществом и поэтому быстро теряет свою энергию.

Новая частица была названа *нейтроном*. Существование ее предсказывал Резерфорд более чем за 10 лет до опытов Чедвика.

Массу нейтрона можно определить, применяя законы сохранения энергии и импульса к соударениям нейтронов с атомными ядрами. Если считать соударение центральным и абсолютно упругим, то скорость ядра отдачи $v_{\text{я}}$ равна:

$$v_{\text{я}} = \frac{2m_n}{m_n + M_{\text{я}}} v_n, \quad (7.10.1)$$

где m_n — масса нейтрона, v_n — его скорость до соударения, а $M_{\text{я}}$ — масса ядра отдачи. Скорость $v_{\text{я}}$ можно измерить, масса ядра известна. Остаются две неизвестные величины: масса нейтрона и его начальная скорость v_n . Но взяв отношение скоростей отдачи для двух различных ядер, можно найти массу нейтрона.

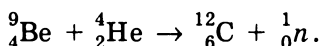
Отношение скоростей ядер отдачи азота и водорода, согласно (7.10.1), определяется следующей формулой:

$$\frac{v_{\text{N}}}{v_{\text{H}}} = \frac{m_n + M_{\text{H}}}{m_n + M_{\text{N}}}. \quad (7.10.2)$$

Здесь M_{H} и M_{N} — массы ядер водорода (протона) и азота. Экспериментальное значение отношения $\frac{v_{\text{N}}}{v_{\text{H}}} \approx 0,13$. Это позволяет вы-

числить массу нейтрона. Она оказалась чуть больше массы протона — 1838,6 электронных масс вместо 1836,1 для протона.

При попадании α -частиц в ядра бериллия происходит следующая реакция:



Здесь ${}^1_0n$ — символ нейтрона; заряд его равен нулю, а относительная масса равна приблизительно единице.

Подобная реакция наблюдается также при бомбардировке α -частицами бора — пятого элемента периодической системы.

1. Предложите конструкцию счетчика для регистрации нейтронов.
2. Счетчик регистрирует β -частицы радиоактивного препарата очень малой интенсивности. Происходят ли срабатывания счетчика через одинаковые интервалы времени?
3. Существуют ли изотопы у бария, относительная атомная масса которого равна 137,34?
4. Какая реакция должна происходить при бомбардировке α -частицами ядер бора?
5. Чему равно отношение скоростей ядер отдачи различных атомов при бомбардировке их γ -квантами?

§ 7.11. СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА

Ядро простейшего атома, атома водорода, представляет собой положительно заряженную частицу — протон.

Из чего состоят другие ядра?

Может быть, из протонов? Нет, это предположение не верно. Возьмем, например, ядро атома гелия (α -частицу). Его масса почти точно в 4 раза больше массы протона. Если бы ядро гелия состояло из четырех протонов, то его заряд был бы тоже вчетверо больше протонного, а на самом деле он больше только в 2 раза.

Нельзя ли допустить (так сначала и сделали), что наряду с протонами в ядро входит некоторое число электронов. Избыток числа протонов над числом электронов равен заряду ядра и, значит, числу электронов в атомной оболочке.

Однако по многим причинам от этой мысли пришлось отказаться. Мы остановимся на одной из причин. Ядро очень мало по размерам (10^{-13} см). Значит, неопределенность координаты внутриядерной частицы имеет порядок $\Delta r \approx 10^{-13}$ см. Это дает возможность с помощью соотношения неопределенностей Гейзенберга оценить неопределенность импульса Δp , а следовательно, и разброс значений кинетической энергии электрона. Этот разброс обратно пропорционален массе частицы:

$$E = \frac{p^2}{2m} \approx \frac{(\Delta p)^2}{2m} \gtrsim \frac{\hbar^2}{2mr^2}. \quad (7.11.1)$$

Для электронов в ядре кинетическая энергия, согласно (7.11.1), имеет порядок $E \approx 10^{11}$ эВ. Эта кинетическая энергия настолько велика, что никакие силы не способны удерживать электрон внутри ядра. Как мы увидим в дальнейшем, энергия связи, приходящаяся на одну частицу в ядре, имеет порядок 10^7 эВ.

Протонно-нейтронная модель ядра

Соотношение неопределенностей не запрещает находиться внутри ядра тяжелым частицам. Поэтому сразу же после того, как в опытах Чедвика был открыт нейтрон, советский физик Д. Д. Иваненко (1904—1994) и немецкий ученый В. Гейзенберг предложили протонно-нейтронную модель ядра. Она была подтверждена последующими исследованиями ядерных превращений и в настоящее время является бесспорной.

Согласно протонно-нейтронной модели ядра состоят из элементарных частиц двух сортов: протонов и нейтронов.

Число протонов в ядре равняется числу электронов в атомной оболочке, так как в целом атом нейтрален. Следовательно, число протонов в ядре равно атомному номеру элемента Z в таблице Менделеева.

Сумму числа протонов Z и числа нейтронов N в ядре называют массовым числом A :

$$A = Z + N. \quad (7.11.2)$$

Так как массы протона и нейтрона близки друг к другу, то массовое число равно округленной до целого числа относительной атомной массе элемента. Массовые числа могут быть определены путем грубого измерения масс ядер приборами, не обладающими особо большой точностью.

Ядра изотопов имеют одно и то же значение Z , но различные массовые числа A , т. е. различное число нейтронов N .

Для протонов и нейтронов ввели новое название — нуклоны, т. е. ядерные частицы.

Размеры атомных ядер

Ядра, как и все микрообъекты, для которых существенны квантовые законы поведения, не имеют четко определенных границ. В соответствии с соотношением неопределенностей граница области, в которой находятся составляющие ядро час-

тицы, размыта. Можно говорить только о некотором среднем радиусе ядра. Этот радиус определяется экспериментально по рассеянию ядром падающих на него частиц. С увеличением массового числа радиус ядра увеличивается:

$$R \approx 1,2 \sqrt[3]{A} \cdot 10^{-13} \text{ см.} \quad (7.11.3)$$

Для ядра урана радиус приближается к 10^{-12} см.

Из формулы (7.11.3) следует, что объем ядра пропорционален числу нуклонов. В результате плотность ядерного вещества постоянна и одинакова для всех ядер:

$$\rho = \frac{M_{\text{я}}}{\frac{4}{3}\pi R^3} \approx 10^{14} \text{ г/см}^3. \quad (7.11.4)$$

Ядерная плотность чудовищно велика и превосходит плотность воды в сто тысяч миллиардов раз.

§ 7.12. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Так как ядра весьма устойчивы, то протоны и нейтроны должны удерживаться внутри ядра какими-то силами, причем очень большими.

Что это за силы? Заведомо можно сказать, что это не гравитационные силы, которые слишком слабы. Устойчивость ядра не может быть объяснена также электромагнитными силами по той причине, что между одноименно заряженными протонами действует электрическое отталкивание, а нейтроны лишены электрического заряда.

Значит, между ядерными частицами — протонами и нейтронами (нуклонами) — действуют особые силы. Название для них нашлось само собой — *ядерные силы*. Каковы основные свойства ядерных сил?

Основные свойства ядерных сил

Ядерные силы примерно в 100 раз превосходят электромагнитные. Это самые мощные силы из всех, которыми располагает природа. Поэтому взаимодействия ядерных частиц часто называют **сильными взаимодействиями**.

Сильные взаимодействия не сводятся только к взаимодействию нуклонов в ядре. Это особый тип взаимодействия, присутствующий многим элементарным частицам наряду с электромагнитными взаимодействиями.

Другая важная особенность ядерных сил — это их короткодействующий характер. Электромагнитные силы сравнительно медленно убывают с расстоянием. Ядерные силы заметно проявляются, как показали уже опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц ядрами, лишь на расстояниях, равных по порядку величины размерам ядра (10^{-12} — 10^{-13} см). Ядерные силы, так сказать, «богатырь с очень короткими руками».

Квантовая картина электромагнитных взаимодействий*

Частицы в ядре движутся в очень малой области пространства. Классическая физика для описания их движения и взаимодействия непригодна. Теория движения и взаимодействия протонов и нейтронов в ядре должна быть квантовой. Сначала мы очень кратко остановимся на квантовой картине знакомых нам электромагнитных взаимодействий и лишь после этого перейдем к сильным взаимодействиям.

Согласно классической электродинамике Фарадея—Максвелла электромагнитные взаимодействия выглядят так: электрический заряд создает в окружающем пространстве поле, которое действует на другие заряды; это поле считается непрерывным.

Однако корпускулярно-волновой дуализм заставляет искать черты прерывного в непрерывном. Поэтому электромагнитное взаимодействие нужно осмыслить с корпускулярной точки зрения, характерной для квантовой теории. Это взаимодействие будет выглядеть так: одна заряженная частица все время испускает фотоны, которые затем поглощаются другой заряженной частицей, т. е. служат посредниками взаимодействия. Точно так же вторая заряженная частица испускает фотоны, которые поглощаются первой частицей. Этот обмен промежуточными частицами, как механизм взаимодействия,

* Может быть, на квантовой теории электромагнитных взаимодействий следовало остановиться раньше. Но в этом особой необходимости не было, так как классическая электродинамика имеет очень обширную сферу применимости.

и является переводом на квантовый язык прежней классической картины.

Взаимодействующие частицы заняты чем-то, напоминающим игру в волейбол. И эта игра их так увлекает, что они, как, например, электрон с протоном в атоме водорода, образуют связанную систему, для разрушения которой нужна заметная энергия. Это один вывод. Другой вывод состоит в том, что никакой пропасти между веществом и полем, как думали раньше, нет. И то, что взаимодействует, и то, что переносит взаимодействие, предстает перед нами как обычная материя, в конечном итоге — как элементарные частицы.

Диаграммы Фейнмана

Процессы взаимодействия в квантовой теории наглядно изображаются с помощью *диаграмм Фейнмана*. На этих диаграммах электрон или другая заряженная частица изображаются сплошной линией, а фотон — пунктирной.

На рисунке 7.14 вы видите фейнмановскую диаграмму взаимодействия двух электронов. Диаграмма имеет две вершины *A* и *B*. Вершины — это точки, в которых происходит взаимодействие. В вершине *A* один из электронов испускает фотон

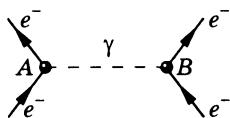


Рис. 7.14

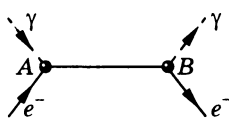


Рис. 7.15

и переходит в новое состояние, т. е. изменяются его энергия, импульс и момент импульса. В вершине *B* фотон поглощается другим электроном и изменяет его состояние. Теория позволяет вычислять вероятность этих взаимодействий.

Рассеяние фотона на электроне изображается диаграммой Фейнмана похожего вида (рис. 7.15). В вершине *A* электрон поглощает фотон и переходит в новое, промежуточное, состояние. В вершине *B* происходит рождение нового фотона, а электрон переходит в конечное состояние.

Виртуальные частицы*

Как можно представить себе испускание фотона заряженной частицей? Фотона до его испускания внутри электрона не

* Виртуальный означает «возможный».

было; он рождается в самом акте излучения. Однако до испускания фотона энергия электрона была минимально возможной и равнялась энергии покоя $m_0 c^2$. Уменьшиться эта энергия не может. А тем не менее электрон рождает фотон, тоже обладающий энергией. Как это согласовать с законом сохранения энергии? С точки зрения классической физики такой процесс невозможен.

Но для микрочастиц существенным является соотношение неопределенностей Гейзенберга. Вспомните, согласно этому соотношению на интервале времени Δt энергия не может быть зафиксирована с точностью, превышающей $\Delta E \approx \frac{\hbar}{\Delta t}$. Если процесс длится малое время, то неопределенность энергии любой системы достаточно велика и испускание электроном фотона оказывается в принципе возможным процессом.

Фотон испускается и вновь поглощается за столь малое время, что выигрыш в энергии остается незамеченным и в общем-то можно считать энергию сохраняющейся.

Такую картину рисует современная квантовая теория поля. Наблюдать эти промежуточные фотоны, переносящие взаимодействия между заряженными частицами, нельзя. Поэтому подобные фотоны называют **виртуальными**, чтобы как-то отличить их от обычных реальных частиц, которые можно регистрировать подходящими устройствами. Виртуальные фотоны ведут свое существование на грани бытия и небытия. Они появляются в теории, чтобы сделать, хотя бы в некоторой степени, процессы, происходящие в микромире, наглядными.

Итак, электромагнитное взаимодействие — это результат того, что одна заряженная частица испускает фотоны, а другая их поглощает.

«Образ жизни» заряженной частицы

Может ли заряженная частица сама поглощать испущенные ею же кванты? Оказалось, что может. Более того, процесс непрерывного излучения и поглощения виртуальных фотонов составляет суть «жизнедеятельности» любой заряженной частицы. Частица взаимодействует как бы сама с собой.

Значение электрического заряда как раз определяет интенсивность процесса рождения и поглощения фотонов. Так как фотоны переносят взаимодействия, то значение электромагнитных сил будет определяться тем, за какое время происходит

рождение и поглощение фотона. Это время составляет всего лишь 10^{-21} с. Таково характерное время электромагнитных процессов.



Рис. 7.16

Процесс излучения и поглощения виртуального фотона одним и тем же электроном изображается диаграммой Фейнмана с петлей. В вершине A фотон излучается, а в вершине B поглощается тем же электроном (рис. 7.16). Такова квантовая модель электростатического поля заряженной частицы.

Можно подсчитать энергию взаимодействия частицы самой с собой через виртуальные кванты. Однако такой подсчет привел к удручающе нелепому результату. Эта энергия, а значит, и собственная масса заряженной частицы получилась бесконечно большой. Фотонная «шуба» электрона, а значит, и он сам весят бесконечно много!

Несомненно, взаимодействие с собственным полем должно вносить какой-то вклад в массу частицы. Но не бесконечный же!

Полностью удовлетворительный выход из этих трудностей до сих пор не найден.

Сильные взаимодействия и их переносчики — мезоны

Заряженные частицы обмениваются частицами промежуточного поля — фотонами.

Если не пытаться при исследовании ядерных сил возвращаться к отвергнутой еще в XIX в. концепции дальнего действия, то нужно признать, что взаимодействие между протонами и нейтронами осуществляется посредством особого поля.

Раз есть поле, значит, есть и кванты этого поля, т. е. особые элементарные частицы. Взаимодействие нуклонов внутри ядра должно определяться тем, что они перебрасываются какими-то частицами, являющимися переносчиками взаимодействия.

Первым к такому заключению пришел в 1935 г. японский физик Х. Юкава (1907—1981). Принимая во внимание известный факт, что внутриядерные силы являются короткодействующими и на расстояниях, превышающих размеры ядра, практически никак не сказываются, Юкава сумел оценить массу частиц — квантов ядерного поля. С помощью соотноше-

ния неопределенностей это сделать настолько несложно, что мы сейчас это тоже сделаем.

Испускание протоном или нейтроном кванта промежуточного поля является виртуальным процессом. Энергия кванта ϵ должна укладываться в рамки того разброса энергий, который допускается соотношением неопределенностей:

$$\epsilon \approx \Delta E \approx \frac{\hbar}{\Delta t}. \quad (7.12.1)$$

Время Δt , очевидно, есть не что иное, как время пребывания частицы-переносчика взаимодействия в пути, т. е. промежуток между моментом испускания и моментом поглощения (время взаимодействия). Но это время равно пройденному пути l , деленному на скорость. Пройденный же путь по порядку величины просто равен радиусу действия ядерных сил ($l \approx 10^{-13}$ см), а скорость без большой ошибки можно считать равной скорости света. Поэтому

$$\Delta t = \frac{l}{c}. \quad (7.12.2)$$

Следовательно, искомая энергия кванта ядерного взаимодействия выразится так:

$$\epsilon = \frac{\hbar c}{l}. \quad (7.12.3)$$

Понятно, что масса, эквивалентная этой энергии, определится по формуле

$$m = \frac{\epsilon}{c^2} = \frac{\hbar}{lc}. \quad (7.12.4)$$

Здесь все величины уже известны из опыта. Подставив значения постоянной Планка $\hbar$, радиуса взаимодействия l и скорости света c , мы обнаружим, что масса m должна равняться примерно двумстам—тремстам массам электрона. Эта масса является промежуточной между массами электрона и протона. Поэтому новые гипотетические частицы получили название **мезонов**, что означает «промежуточная частица».

Пи-мезоны

После того как Юкава предсказал мезоны, экспериментаторы энергично принялись за поиски этих частиц. В конце концов эти частицы были открыты в 1947 г. с помощью ускорителей элементарных частиц. Название их было уточнено: они

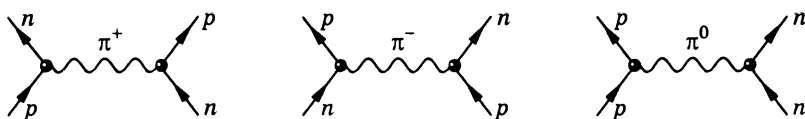


Рис. 7.17

стали называться **π -мезонами** или **пионами**. Взаимодействовали эти частицы с ядрами очень энергично. Как и предсказывала теория, оказалось, что есть π -мезоны трех сортов: положительно заряженные, отрицательно заряженные и нейтральные. Масса нейтрального π^0 -мезона равна $264,1$ электронной массы, а положительных и отрицательных π -мезонов — $273,1 m_e$.

Все π -мезоны активно участвуют в ядерных взаимодействиях. Но лишь π^0 -мезонами свободно обмениваются как протоны, так и нейтроны, π^+ -мезон виртуально может быть испущен только протоном, а поглощен только нейтроном, π^- -мезоны, напротив, могут испускаться только нейтронами, а поглощаться только протонами. При обмене заряженными мезонами протон и нейтрон превращаются друг в друга.

На рисунке 7.17 показаны диаграммы Фейнмана, изображающие взаимодействия между нуклонами посредством заряженных и нейтральных π -мезонов. Пионы изображены волнистыми линиями.

Мезонная «шуба» нуклонов

Итак, нуклоны взаимодействуют посредством ядерного поля, состоящего из виртуальных π -мезонов. Одиночный нуклон также создает вокруг себя мезонное поле. Говоря иными словами, он непрерывно испускает и поглощает виртуальные π -мезоны. Этот процесс является основой «жизнедеятельности» как протонов, так и нейтронов, подобно тому как испускание и поглощение фотонов — основа «жизнедеятельности» электрически заряженных частиц.

Каждый нуклон обладает ядерным зарядом, точнее, константой сильных взаимодействий, значение которой характеризует быстроту процесса испускания и поглощения мезонов и определяет значение ядерных сил. Как уже было отмечено, ядерные взаимодействия в 100 раз интенсивнее электромагнитных. Соответственно мезоны поглощаются и испускаются

нуклонами в 100 раз быстрее, чем фотоны электрическими рядами. Характерное ядерное время составляет 10^{-23} с.

Нуклон всегда окружен довольно плотным облаком заряженных и нейтральных мезонов, как говорят физики, мезонной «шубой».

Если нуклону сообщить энергию, то часть виртуальных фотонов «шубы» станет реальными.

§ 7.13. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР

Важнейшую роль во всей ядерной физике играет понятие энергии связи ядра. Энергия связи позволяет объяснить устойчивость ядер, выяснить, какие процессы ведут к выделению ядерной энергии.

Под энергией связи ядра понимают ту энергию, которая необходима для полного расщепления ядра на отдельные частицы. На основании закона сохранения энергии можно также утверждать, что энергия связи равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц. Энергия связи атомных ядер очень велика. Но как ее определить?

В настоящее время, когда отсутствует количественная теория ядерных сил, рассчитать энергию связи теоретически, подобно тому как это можно сделать для электронов в атоме, нельзя. Тем не менее энергия связи любого ядра поддается определению путем точного измерения его массы. Выполнить соответствующие расчеты можно, лишь применяя соотношение Эйнштейна между массой и энергией:

$$E = mc^2. \quad (7.13.1)$$

Точнейшие измерения масс ядер показывают, что масса покоя ядра $M_{\text{я}}$ всегда меньше суммы масс покоя слагающих его протонов и нейтронов:

$$M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n. \quad (7.13.2)$$

Существует, как говорят, дефект массы. Разность масс

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}} \quad (7.13.3)$$

положительна. В частности, для гелия масса ядра на один процент меньше суммы масс двух протонов и двух нейтронов. Соответственно для одного моля гелия $\Delta M = 0,286$ г.

Уменьшение массы при образовании ядра из частиц означает, что при этом уменьшается энергия этой системы частиц на значение энергии связи $\Delta E_{\text{св}}$:

$$\Delta E_{\text{св}} = \Delta M c^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}})c^2. \quad (7.13.4)$$

Но куда при этом деваются энергия $\Delta E_{\text{св}}$ и масса ΔM ?

При образовании ядра из частиц последние за счет действия ядерных сил на малых расстояниях устремляются с огромным ускорением друг к другу. Излучаемые при этом γ -кванты обладают энергией $\Delta E_{\text{св}}$ и массой

$$\Delta M = \frac{\Delta E_{\text{св}}}{c^2}.$$

О том, как велика энергия связи, можно судить по такому примеру: образование 4 г гелия сопровождается выделением такой же энергии, что и сгорание 1,5—2 вагонов каменного угля.

Удельная энергия связи

Важную информацию о свойствах ядер содержит экспериментально измеренная зависимость удельной энергии связи, т. е. энергии связи, приходящейся на одну ядерную частицу, от массового числа A . Из рисунка 7.18 хорошо видно, что, не считая самых легких ядер, удельная энергия связи примерно постоянна и равна 8 МэВ/нуклон. Отметим, что энергия связи электрона с ядром в атоме водорода, равная энергии ионизации, почти в миллион раз меньше.

Кривая зависимости удельной энергии связи от массового числа A имеет слабо выраженный максимум. Максимальную удельную энергию связи (8,6 МэВ/нуклон) имеют элементы с массовыми числами от 50 до 60, т. е. железо и близкие к нему по порядковому номеру элементы. Ядра этих элементов наиболее устойчивы.

Уменьшение удельной энергии связи у легких элементов объясняется поверхностными эффектами. Нуклоны, находящиеся на поверхности ядра, взаимодействуют с меньшим числом соседей, чем нуклоны внутри ядра, так как ядерные силы являются короткодействующими. Поэтому энергия связи нуклонов на поверхности меньше, чем у нуклонов внутри ядра. Чем меньше ядро, тем большая часть от общего числа нукло-

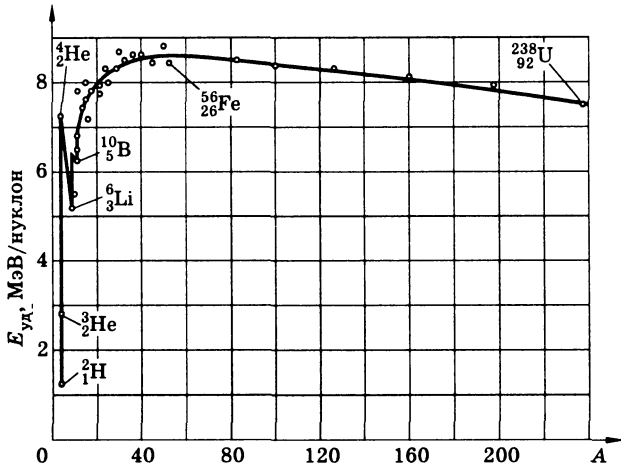


Рис. 7.18

нов оказывается на поверхности. Из-за этого энергия связи в среднем на один нуклон меньше у легких ядер.

У тяжелых ядер удельная энергия связи уменьшается за счет растущей с увеличением Z кулоновской энергии отталкивания протонов. Кулоновские силы стремятся разорвать ядро.

§ 7.14. ИСКУССТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

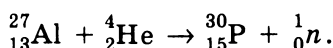
После того как мы познакомились с основами строения атомного ядра, возвратимся к превращениям атомных ядер, вызываемым искусственно.

Можно предположить, что при искусственно вызываемых превращениях атомных ядер возникают радиоактивные ядра, которых нет в природе. Могут быть получены неустойчивые изотопы тех химических элементов, которые в естественных условиях стабильны. Такое явление действительно было открыто супругами Фредериком и Ирен Жолио-Кюри в 1934 г. и названо ими **искусственной радиоактивностью**.

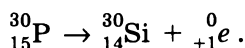
Ф. и И. Жолио-Кюри продолжали исследование превращений атомов под действием α -частиц. Бомбардируя алюминий и некоторые другие элементы, они обнаружили новый вид превращений. Под действием α -частиц излучались не электроны, как во многих других случаях, а **позитроны**. (Позитрон —

двойник электрона, отличающийся от него только знаком электрического заряда, — был открыт незадолго до этого.) Заинтересовавшись явлением, ученые решили его тщательно исследовать. Они поместили алюминиевую фольгу на небольшом расстоянии от источника α -частиц и подвергали ее облучению в течение нескольких минут. Затем препарат удалили и с помощью счетчика Гейгера обнаружили, что фольга стала радиоактивной. Она испускала позитроны в течение некоторого времени. Это было совершенно новое, неизвестное дотоле явление. Ядра испытывали превращения после того, как воздействие α -частиц прекратилось. Явление было истолковано следующим образом.

Ядра алюминия захватывают α -частицы, испуская одновременно нейтроны. При этом образуется изотоп фосфора $^{30}_{15}\text{P}$:



Полученный искусственным способом изотоп $^{30}_{15}\text{P}$ радиоактивен* и распадается с испусканием позитронов:



Это один из примеров образования искусственно радиоактивных ядер. Впоследствии было получено около тысячи радиоактивных изотопов, в то время как число естественных радиоактивных изотопов не превышает 40. Для каждого элемента в настоящее время известно несколько радиоактивных изотопов, получаемых искусственно. С помощью искусственной радиоактивности изготавливают трансурановые элементы — элементы с порядковым номером, большим 92.

§ 7.15. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Атомные ядра при взаимодействиях испытывают превращения. Эти превращения сопровождаются увеличением или уменьшением кинетической энергии участвующих в превращениях частиц.

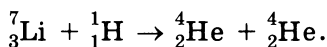
* Естественный изотоп фосфора $^{31}_{15}\text{P}$ стабилен.

Ядерными реакциями называют изменения атомных ядер при взаимодействии их с элементарными частицами или друг с другом. С примерами ядерных реакций вы уже познакомились в § 7.9.

Ядерные реакции происходят, когда частицы вплотную приближаются к ядру и попадают в сферу действия ядерных сил. Одноименно заряженные частицы отталкиваются друг от друга. Поэтому сближение положительно заряженных частиц с ядрами (или ядер друг с другом) возможно, если этим частицам (или ядрам) сообщена большая кинетическая энергия. Эта энергия сообщается протонам, ядрам дейтерия — дейтронам, α -частицам и другим более тяжелым ядрам с помощью ускорителей элементарных частиц и ионов.

Для осуществления ядерных реакций такой метод гораздо эффективнее, чем использование ядер гелия, испускаемых радиоактивными элементами. Во-первых, с помощью ускорителей частицам может быть сообщена энергия порядка 10^5 МэВ, т. е. гораздо больше той, которую имеют α -частицы (максимально 9 МэВ). Во-вторых, можно использовать протоны, которые в процессе радиоактивного распада не появляются (это целесообразно потому, что их заряд вдвое меньше заряда α -частиц, и поэтому действующая на них сила отталкивания со стороны ядер тоже в 2 раза меньше). В-третьих, можно ускорить ядра более тяжелые, чем ядра гелия.

Первая ядерная реакция на быстрых протонах была осуществлена в 1932 г. Удалось расщепить литий на две α -частицы:



Как видно из фотографии треков в камере Вильсона (рис. 7.19), ядра гелия разлетаются в разные стороны вдоль од-

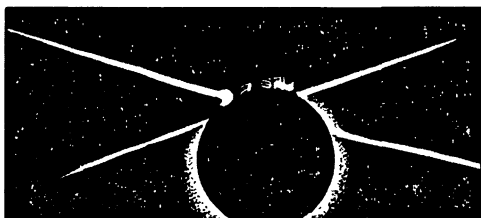


Рис. 7.19

ной прямой в соответствии с требованиями закона сохранения импульса (импульс протона много меньше импульса возникающих α -частиц).

Энергетический выход ядерных реакций

В описанной выше ядерной реакции кинетическая энергия двух образующихся ядер гелия оказалась больше кинетической энергии вступавшего в реакцию протона на 7,3 МэВ. Превращение ядер сопровождается изменением их внутренней энергии (энергия связи). В рассмотренной реакции удельная энергия связи в ядрах гелия больше удельной энергии связи в ядре лития. Поэтому часть внутренней энергии ядра лития превращается в кинетическую энергию разлетающихся α -частиц.

Изменение энергии связи ядер означает, что суммарная энергия покоя участвующих в реакциях частиц и ядер не остается неизменной. Ведь энергия покоя ядра $M_{\text{я}}c^2$, согласно формуле (7.13.4), непосредственно выражается через энергию связи. В соответствии с законом сохранения энергии изменение кинетической энергии в процессе ядерной реакции равно изменению энергии покоя участвующих в реакции ядер и частиц.

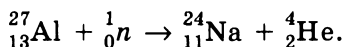
Энергетическим выходом ядерной реакции называется разность энергий покоя ядер и частиц до реакции и после реакции. Согласно сказанному ранее энергетический выход ядерной реакции равен также изменению кинетической энергии частиц — участников реакции.

Если кинетическая энергия ядер и частиц после реакции больше, чем до реакции, то говорят о выделении энергии. В противном случае реакция идет с поглощением энергии. Именно такого рода реакция происходит при бомбардировке азота α -частицами (см. § 7.8). Часть кинетической энергии (примерно $1,2 \cdot 10^6$ эВ) переходит в процессе этой реакции во внутреннюю энергию вновь образовавшегося ядра.

Выделяющаяся при ядерных реакциях энергия может быть огромной. Но использовать ее путем осуществления столкновений ускоренных частиц (или ядер) с неподвижными ядрами мишени практически нельзя. Ведь большая часть ускоренных частиц пролетает мимо ядер мишени, не вызывая реакции.

Ядерные реакции на нейтронах

Открытие нейтрона было поворотным пунктом в исследовании ядерных реакций. Так как нейтроны лишены заряда, то они беспрепятственно проникают в атомные ядра и вызывают их изменения. Например, наблюдается следующая реакция:



Великий итальянский физик Энрико Ферми (1901—1954) первым начал изучать реакции, вызываемые нейтронами. Он обнаружил, что ядерные превращения вызываются не только быстрыми, но и медленными нейтронами. Причем эти медленные нейтроны оказываются в большинстве случаев даже гораздо более эффективными, чем быстрые. Поэтому быстрые нейтроны целесообразно предварительно замедлять. Замедление нейтронов до тепловых скоростей происходит в обыкновенной воде. Этот эффект объясняется тем, что в воде содержится большое число ядер водорода — протонов, масса которых почти равна массе нейтронов. При столкновениях же шаров одинаковой массы происходит наиболее интенсивная передача кинетической энергии. При центральном соударении нейтрона с покоящимся протоном он целиком передает протону свою кинетическую энергию.

- ? 1. Объясните, используя рисунок 7.18, почему при ядерной реакции ${}_3^7\text{Li} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_2^4\text{He}$ энергия не поглощается, а выделяется.
2. В чем главное отличие ядерных реакций на нейтронах от ядерных реакций, вызванных заряженными частицами?

§ 7.16. ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА

Делиться на части могут только ядра некоторых тяжелых элементов. При делении ядер испускаются два-три нейтрона и γ -лучи. Одновременно выделяется большая энергия.

Открытие деления урана

Деление ядер урана было открыто в 1938 г. немецкими учеными О. Ганом (1879—1968) и Ф. Штрассманом (1902—1980). Они установили, что при бомбардировке урана нейтронами возникают элементы средней части периодической системы: барий, криптон и др. Однако правильное истолкование этого факта, именно как деления ядра урана, захватившего нейтрон, было дано в начале 1939 г. английским физиком О. Фришем (1904—1979) совместно с австрийским физиком Л. Мейтнер (1878—1968).

Деление ядра возможно благодаря тому, что масса покоя тяжелого ядра больше суммы масс покоя осколков, возникающих при делении. Из-за этого происходит выделение энергии, эквивалентной уменьшению массы покоя, сопровождающему деление. Но полная масса сохраняется, так как масса движущихся с большой скоростью осколков превышает их массу покоя.

Возможность деления тяжелых ядер можно также объяснить с помощью графика зависимости удельной энергии связи от массового числа A (см. рис. 7.18). Удельная энергия связи ядер атомов, занимающих в периодической системе последние места ($A \approx 200$), примерно на 1 МэВ/нуклон меньше удельной энергии связи в ядрах элементов, находящихся в середине периодической системы ($A \approx 100$). Поэтому процесс деления тяжелых ядер на ядра элементов средней части периодической системы является «энергетически выгодным». Система после деления переходит в состояние с минимальной внутренней энергией. Ведь чем больше энергия связи ядра, тем большая энергия должна выделяться при образовании ядра и, следовательно, тем меньше внутренняя энергия образовавшейся вновь системы.

При делении ядра энергия связи, приходящаяся на каждый нуклон, увеличивается на 1 МэВ и общая выделяющаяся энергия должна быть огромной — порядка 200 МэВ. Ни при какой другой ядерной реакции (не связанной с делением) столь больших энергий не выделяется.

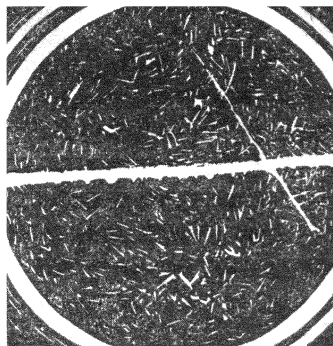


Рис. 7.20

Непосредственные измерения энергии, выделяющейся при делении ядра урана $^{235}_{92}\text{U}$, подтвердили приведенные соображения и дали значение ≈ 200 МэВ. Большая часть этой энергии (168 МэВ) приходится на кинетическую энергию осколков. На рисунке 7.20 вы видите треки осколков делящегося урана в камере Вильсона.

Выделяющаяся при делении ядра энергия имеет электростатическое, а не ядерное происхождение. Большая кинетическая энергия, которую имеют осколки, возникает вследствие их кулоновского отталкивания.

Механизм деления ядра

Процесс деления атомного ядра можно объяснить на основе капельной модели ядра. Согласно этой модели сгусток нуклонов напоминает капельку заряженной жидкости (рис. 7.21, а). Ядерные силы между нуклонами являются короткодействующими подобно силам, действующим между молекулами жидкости. Наряду с большими силами электростатического отталкивания между протонами, стремящимися разорвать ядро на части, действуют еще большие ядерные силы притяжения. Эти силы удерживают ядро от распада.

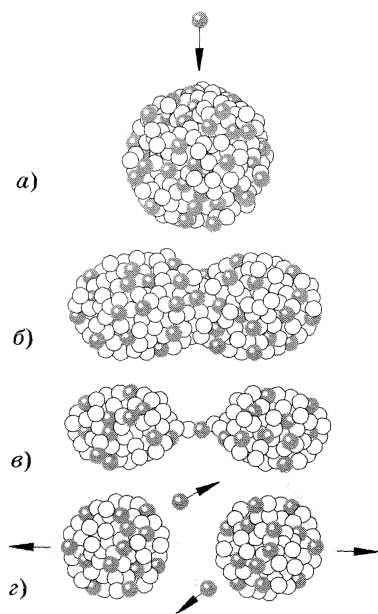


Рис. 7.21

Ядро урана-235 имеет форму шара. Поглотив лишний нейтрон, ядро возбуждается и начинает деформироваться, приобретая вытянутую форму (рис. 7.21, б). Ядро растягивается до тех пор, пока силы отталкивания между половинками вытянутого ядра не начинают преобладать над силами притяжения, действующими в перешейке (рис. 7.21, в). После этого ядро разрывается на две части (рис. 7.21, г). Под действием кулоновских сил отталкивания эти осколки разлетаются со скоростью, равной $1/30$ скорости света.

Испускание нейтронов в процессе деления

Фундаментальным фактом ядерного деления является испускание в процессе деления двух-трех нейтронов. Именно благодаря этому оказалось возможным практическое использование внутриядерной энергии.

Понять, почему происходит испускание свободных нейтронов, можно, исходя из следующих соображений. Известно, что отношение числа нейтронов к числу протонов в стабильных ядрах возрастает с повышением атомного номера. Поэтому у возникающих при делении осколков относительное число нейтронов оказывается большим, чем это допустимо для ядер атомов, находящихся в середине таблицы Менделеева. В результате несколько нейтронов освобождается в процессе деления. Их энергия имеет различные значения — от нескольких миллионов электронвольт до совсем малых, близких к нулю.

Деление обычно происходит на осколки неравной массы. Осколки эти сильно радиоактивны, так как содержат избыточное количество нейтронов. В результате серии последовательных β -распадов в конце концов получаются стабильные изотопы.

В заключение отметим, что существует спонтанное деление ядер урана. Оно было открыто советскими физиками Г. Н. Флеровым и К. А. Петржаком в 1940 г. Период полураспада для спонтанного деления равен 10^{16} лет. Это в два миллиона раз больше периода полураспада при α -распаде урана.

§ 7.17. ЦЕПНЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

При делении ядра урана освобождаются два-три нейтрона. Это позволяет осуществлять цепную реакцию деления урана.

Любой из нейтронов, вылетающих из ядра в процессе деления, может в свою очередь вызвать деление соседнего ядра, которое также испускает нейтроны, способные вызвать дальнейшее деление. В результате число делящихся ядер очень быстро увеличивается. Возникает цепная реакция. **Ядерной цепной реакцией называется реакция, в которой частицы, вызывающие ее (нейтроны), образуются как продукты этой же реакции.**

Цепная реакция сопровождается выделением огромной энергии. При делении каждого ядра выделяется около 200 МэВ. При полном же делении всех ядер, имеющихся в 1 г урана, выделяется энергия $2,3 \cdot 10^4$ кВт · ч. Это эквивалентно энергии, получаемой при сгорании 3 т угля или 2,5 т нефти.

Но для осуществления цепной реакции нельзя использовать любые ядра, делящиеся под влиянием нейтронов. В силу ряда причин из ядер, встречающихся в природе, пригодны лишь ядра изотопа урана с массовым числом 235, т. е. $^{235}_{92}\text{U}$.

Изотопы урана

Естественный уран состоит в основном из двух изотопов: $^{235}_{92}\text{U}$ и $^{238}_{92}\text{U}$. Но изотоп $^{235}_{92}\text{U}$ составляет всего 1/140 долю от более распространенного изотопа $^{238}_{92}\text{U}$.

Ядра $^{235}_{92}\text{U}$ делятся под влиянием как быстрых, так и медленных нейтронов. Ядра $^{238}_{92}\text{U}$ могут делиться лишь под влиянием нейтронов с энергией более 1 МэВ. Такую энергию имеют примерно 60% нейтронов, появляющихся при делении. Однако примерно лишь один нейтрон из пяти производит деление $^{235}_{92}\text{U}$. Остальные нейтроны захватываются этим изотопом, не производя деления. В результате цепная реакция с использованием чистого изотопа $^{238}_{92}\text{U}$ невозможна.

Коэффициент размножения нейтронов

Для течения цепной реакции нет необходимости, чтобы каждый нейтрон обязательно вызывал деление ядра. Необходимо лишь, чтобы среднее число освобожденных нейтронов в данной массе урана не уменьшалось с течением времени.

Это условие будет выполнено, если коэффициент размножения нейтронов k больше или равен единице. Коэффициентом размножения нейтронов называют отношение числа нейтронов в каком-либо «поколении» к числу нейтронов предшествующего «поколения». Под сменой поколений понимают деление ядер, при котором поглощаются нейтроны ста-

рого «поколения» и рождаются новые нейтроны (рис. IV на форзаце, где изображены первые четыре «поколения» нейтронов, рождающихся при ядерной реакции).

Если $k \geq 1$, то число нейтронов увеличивается с течением времени или остается постоянным и цепная реакция идет. При $k < 1$ число нейтронов убывает и цепная реакция невозможна.

Коэффициент размножения определяется следующими четырьмя факторами:

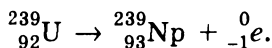
- 1) захватом медленных нейтронов ядрами $^{235}_{92}\text{U}$ с последующим делением и захватом быстрых нейтронов ядрами $^{235}_{92}\text{U}$ и $^{238}_{92}\text{U}$ также с последующим делением;
- 2) захватом нейтронов ядрами урана без деления;
- 3) захватом нейтронов продуктами деления, замедлителем (о нем сказано дальше) и конструктивными элементами установки;
- 4) вылетом нейтронов из делящегося вещества наружу.

Лишь первый процесс сопровождается увеличением числа нейтронов (в основном за счет деления $^{235}_{92}\text{U}$). Все остальные приводят к их убыли. Цепная реакция в чистом изотопе $^{238}_{92}\text{U}$ невозможна, так как в этом случае $k < 1$ (число нейтронов, поглощаемых ядрами без деления, больше числа нейтронов, вновь образующихся за счет деления ядер).

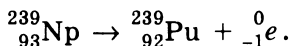
Для стационарного течения цепной реакции коэффициент размножения нейтронов должен быть равен единице. Это равенство необходимо поддерживать с большой точностью. Уже при $k = 1,01$ почти мгновенно произойдет взрыв.

Образование плутония

Важное значение имеет не вызывающий деления захват нейтронов ядрами изотопа урана $^{238}_{92}\text{U}$. После захвата образуется радиоактивный изотоп $^{239}_{92}\text{U}$ с периодом полураспада 23 мин. Распад происходит с испусканием электрона и возникновением первого трансуранового элемента — нептуния:



Нептуний в свою очередь β -радиоактивен с периодом полураспада около двух дней. В процессе распада нептуния образуется следующий трансурановый элемент — плутоний:



Плутоний относительно стабилен, так как его период полураспада велик — порядка 24 000 лет. Важнейшее свойство плутония состоит в том, что он делится под влиянием медленных нейтронов, так же как и изотоп ${}_{92}^{235}\text{U}$. Поэтому с помощью плутония также может быть осуществлена цепная реакция, которая сопровождается выделением громадной энергии.

§ 7.18. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

Ядерным (или атомным) реактором называется устройство, в котором осуществляется управляемая реакция деления ядер.

Ядра урана, особенно ядра изотопа ${}_{92}^{235}\text{U}$, наиболее эффективно захватывают медленные нейтроны. Вероятность захвата медленных нейтронов с последующим делением ядер в сотни раз больше, чем быстрых. Поэтому в ядерных реакторах, работающих на естественном уране, используются замедлители нейтронов для повышения коэффициента размножения нейтронов. Процессы в ядерном реакторе схематически изображены на рисунке 7.22.

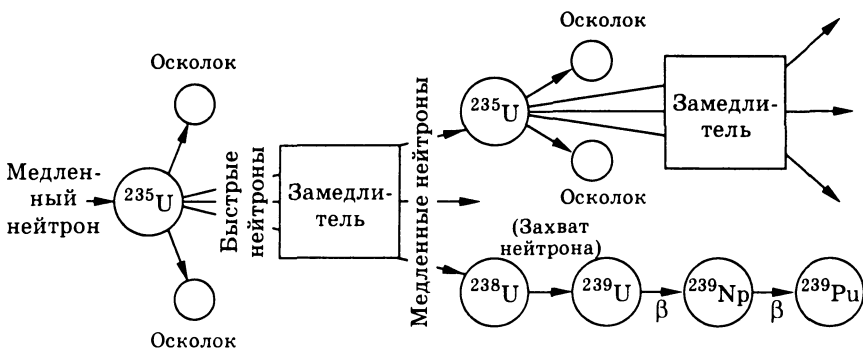


Рис. 7.22

Основные элементы ядерного реактора

На рисунке 7.23 приведена схема энергетической установки с ядерным реактором.

Основными элементами ядерного реактора являются: ядерное горючее ($^{235}_{92}\text{U}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$, $^{238}_{92}\text{U}$ и др.), замедлитель нейтронов (тяжелая или обычная вода, графит и др.), теплоноситель для вывода энергии, образующейся при работе реактора (вода, жидкий натрий и др.) и устройство для регулирования скорости реакции (вводимые в рабочее пространство реактора стержни, содержащие кадмий или бор — вещества, которые хорошо поглощают нейтроны).

Снаружи реактор окружают защитной оболочкой, задерживающей γ -излучение и нейтроны. Оболочку выполняют из бетона с железным заполнителем.

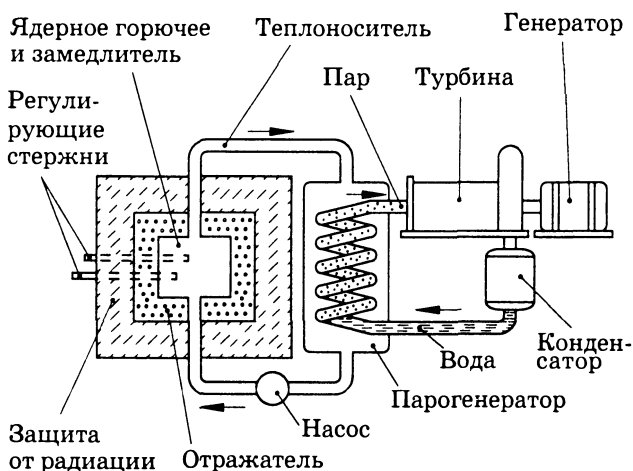


Рис. 7.23

Лучшим замедлителем является тяжелая вода. Обычная вода сама захватывает нейтроны и превращается в тяжелую воду. Хорошим замедлителем считается также графит, ядра которого не поглощают нейтронов.

Критическая масса

Коэффициент размножения k может стать равным единице лишь при условии, что размеры реактора и соответственно масса урана превышают некоторые критические значения. *Критиче-*

ской массой называют наименьшую массу делящегося вещества, при которой может протекать цепная ядерная реакция.

При малых размерах слишком велика утечка нейтронов через поверхность активной зоны реактора (объем, в котором располагаются стержни с ураном).

С увеличением размеров системы число ядер, участвующих в делении, растет пропорционально объему, а число нейтронов, теряемых вследствие утечки, увеличивается пропорционально площади поверхности. Поэтому, увеличивая систему, можно достичь значений коэффициента размножения $k \approx 1$. Система будет иметь критические размеры, если число нейтронов, потерянных вследствие захвата и утечки, равно числу нейтронов, полученных в процессе деления. Критические размеры и соответственно критическая масса определяются типом ядерного горючего, замедлителем и конструктивными особенностями реактора.

Для чистого (без замедлителя) урана $^{235}_{92}\text{U}$, имеющего форму шара, критическая масса приблизительно равна 50 кг. При этом радиус шара равен примерно 9 см (уран — очень тяжелое вещество). Применяя замедлители нейтронов и отражающую нейтроны оболочку из бериллия, удалось снизить критическую массу до 250 г.

Управление реактором осуществляется при помощи стержней, содержащих кадмий или бор. При выдвинутых из активной зоны реактора стержнях $k > 1$, а при полностью вдвинутых стержнях $k < 1$. Вдвигая стержни внутрь активной зоны, можно в любой момент времени приостановить развитие цепной реакции. Управление ядерными реакторами осуществляется дистанционно с помощью ЭВМ.

Реакторы на быстрых нейтронах

Построены реакторы, работающие без замедлителя на быстрых нейтронах. Так как вероятность деления, вызванного быстрыми нейтронами, мала, то такие реакторы не могут работать на естественном уране. Реакцию можно поддерживать лишь в обогащенной смеси, содержащей на менее 15% изотопа

$^{235}_{92}\text{U}$. Преимущество реакторов на быстрых нейтронах в том, что при их работе образуется значительное количество плутония, который затем можно использовать в качестве ядерного топлива. Эти реакторы называют *реакторами-размножителями*.

ми, так как они воспроизводят делящийся материал. Строятся реакторы с коэффициентом воспроизводства до 1,5. Это значит, что в реакторе при делении 1 кг изотопа $^{235}_{92}\text{U}$ получается до 1,5 кг плутония. В обычных реакторах коэффициент воспроизводства достигает 0,6—0,7.

Первые ядерные реакторы

Впервые цепная ядерная реакция деления урана была осуществлена в США коллективом ученых под руководством Энрико Ферми в декабре 1942 г.

В нашей стране первый ядерный реактор был запущен 25 декабря 1946 г. коллективом физиков, который возглавлял наш замечательный ученый Игорь Васильевич Курчатов (1903—1960).

В настоящее время созданы различные типы реакторов, отличающихся друг от друга как по мощности, так и по своему назначению. Наиболее перспективными являются реакторы-размножители на быстрых нейтронах.

§ 7.19. ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Легкие ядра могут сливаться с выделением энергии.

Масса покоя ядра урана больше суммы масс покоя осколков, на которые делится ядро. Для легких ядер дело обстоит как раз наоборот. Так, масса покоя ядра гелия значительно меньше суммы масс покоя двух ядер тяжелого водорода, на которые можно разделить ядро гелия.

Это означает, что при слиянии легких ядер масса покоя уменьшается и, следовательно, должна выделяться значительная энергия. Подобного рода реакции слияния легких ядер могут протекать только при очень высоких температурах. Поэтому они называются термоядерными.

Термоядерные реакции — это реакции слияния легких ядер при очень высокой температуре.

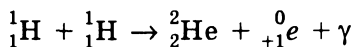
Для слияния ядер необходимо, чтобы они сблизились на расстояние около 10^{-12} см, т. е. чтобы они попали в сферу действия ядерных сил. Этому сближению препятствует кулоновское отталкивание ядер, которое может быть преодолено лишь за счет большой кинетической энергии теплового движения ядер.

Энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях в расчете на один нуклон, превышает удельную энергию, выделяющуюся при цепных реакциях деления ядер. Так, при слиянии тяжелого водорода — дейтерия — со сверхтяжелым изотопом водорода — тритием — выделяется около 3,5 МэВ на один нуклон. При делении же урана выделяется примерно 1 МэВ энергии на один нуклон.

Термоядерные реакции в звездах

Термоядерные реакции играют решающую роль в эволюции Вселенной. Энергия излучения Солнца и звезд имеет термоядерное происхождение.

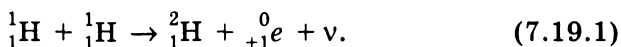
По современным представлениям на ранней стадии развития звезды она в основном состоит из водорода. Температура внутри звезды столь велика, что в ней протекают реакции слияния протонов с образованием гелия. Однако реакция слияния сразу четырех протонов чрезвычайно маловероятна. Реакции происходят при соударениях пар частиц. При этом реакция



невозможна из-за того, что изотоп гелия ${}^2_2\text{He}$ не существует.

На разных стадиях развития звезд на первый план выдвигаются различные циклы реакций, конечным результатом которых является образование гелия ${}^4_2\text{He}$ из четырех протонов.

Условия внутри нашего Солнца (температура $1,3 \cdot 10^7$ К, плотность водорода 100 г/см^3) таковы, что основную роль играет так называемый протон-протонный (или водородный) цикл. Он начинается со слияния двух протонов с образованием дейтрона, позитрона и нейтрино:



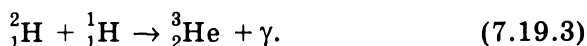
В этой реакции в числе конечных продуктов появляется элементарная частица нейтрино (символ ν). (Об открытии нейтрино мы будем говорить в следующей главе.) Реакция (7.19.1) вызвана слабыми взаимодействиями, о которых упоминалось во введении к «Электродинамике». Вероятность этой реакции мала из-за того, что слабые взаимодействия уступают

по интенсивности ядерным в 10^{14} раз. В лаборатории реакцию (7.19.1) не удалось осуществить до сих пор. Однако число подобных реакций внутри Солнца велико из-за того, что масса Солнца огромна и число сталкивающихся протонов также огромно.

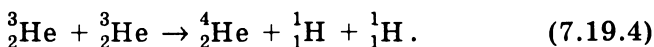
Возникший в реакции (7.19.1) позитрон сталкивается с электроном и превращается в два гамма-кванта^{*}:



При столкновении дейтронов с протонами образуется устойчивый изотоп гелия ${}^3_2\text{He}$:



Далее при столкновении двух ядер изотопа гелия ${}^3_2\text{He}$ образуется обычный гелий ${}^4_2\text{He}$ и два протона:



Последние две реакции обусловлены ядерными силами.

Все четыре реакции идут с выделением энергии, и в результате цикла превращения четырех протонов в ядро гелия ${}^4_2\text{He}$ освобождается энергия 26,7 МэВ, часть которой (около 19%) уносится с нейтрино.

Ежесекундно в Солнце около 600 млрд т водорода превращается в гелий. Но запаса водорода в Солнце достаточно для того, чтобы оно непрерывно светило с той же мощностью, что и сейчас, на протяжении еще 10^{10} лет.

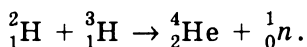
При слиянии ядер гелия образуются более тяжелые элементы. Термоядерные реакции играют решающую роль в эволюции химического состава вещества во Вселенной.

Управляемые термоядерные реакции

Осуществление управляемых термоядерных реакций на Земле сулит человечеству новый, практически неисчерпаемый

^{*} Об этом будет рассказано в главе 8.

источник энергии. Наиболее перспективной в этом отношении реакцией является реакция слияния дейтерия с тритием:



В этой реакции выделяется энергия 17,6 МэВ. Поскольку трития в природе нет, он должен вырабатываться в самом термоядерном реакторе из лития.

Экономически выгодная реакция, как показывают расчеты, может идти только при нагревании реагирующих веществ до температуры порядка сотен миллионов кельвин при большой плотности вещества (10^{14} — 10^{15} частиц в 1 см^3). Такие температуры могут быть в принципе достигнуты путем создания в плазме мощных электрических разрядов. Основная трудность на этом пути состоит в том, чтобы удержать плазму столь высокой температуры внутри установки на протяжении 0,1—1 с.

Никакие стенки из вещества здесь не годятся, так как при столь высокой температуре они сразу же превратятся в пар. Единственным возможным является метод удержания высокотемпературной плазмы в ограниченном объеме с помощью очень сильных магнитных полей. Однако до сих пор решить эту задачу не удалось из-за неустойчивости плазмы. Неустойчивость приводит к диффузии части заряженных частиц сквозь магнитные «стенки».

Ученые нашей страны достигли больших успехов в создании управляемых термоядерных реакций. Эти работы были начаты под руководством академиков Л. А. Арцимовича и М. А. Леонтовича и продолжают их учениками.

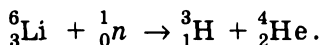
Лазерный термоядерный синтез

Параллельно ведутся работы по осуществлению управляемого термоядерного синтеза за счет нагрева мишени мощными лазерными импульсами. Термоядерная мишень представляет собой полый стеклянный шарик диаметром 0,1—1 мм с очень тонкими стенками. Шарик наполнен смесью дейтерия и трития.

На мишень фокусируются излучения десятков мощнейших лазерных импульсов. Оболочка мишени испаряется и разлетается в стороны. Одновременно внутренние слои мишени согласно закону сохранения импульса устремляются к центру.

Вещество сжимается и нагревается до температур, при которых возможен термоядерный синтез.

Разрабатываются проекты лазерных реакторов, работающих в импульсном режиме. Наиболее перспективны гибридные реакторы, в которых наряду с реакцией синтеза используется цепная реакция деления ядер урана под действием нейтронов, возникающих при термоядерном синтезе. При этом тритий воспроизводится из дешевого лития согласно реакции:



Несколько раз в секунду термоядерная мишень должна вводиться в реактор и обстреливаться лазерными импульсами.

На каком пути удастся создать промышленный термоядерный реактор, пока не ясно.

Пока же удалось осуществить лишь неуправляемую реакцию синтеза взрывного типа в водородной (или термоядерной) бомбе.

§ 7.20. ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

Развитие ядерной энергетики

Применение ядерной энергии для преобразования ее в электрическую впервые было осуществлено в нашей стране в 1954 г. В г. Обнинске была введена в действие первая атомная электростанция (АЭС) мощностью 5000 кВт. Энергия, выделяющаяся в ядерном реакторе, использовалась для превращения воды в пар, который вращал затем связанную с генератором турбину.

По такому же принципу действуют введенные в эксплуатацию Нововоронежская, Ленинградская, Курская, Кольская и другие АЭС. Реакторы этих станций имеют мощность 500—1000 МВт.

Атомные электростанции строятся прежде всего в европейской части страны. Это связано с преимуществами АЭС по сравнению с тепловыми электростанциями, работающими на органическом топливе. Ядерные реакторы не потребляют дефицитного органического топлива и не загружают перевозками угля железнодорожный транспорт. Атомные электростанции не потребляют атмосферный кислород и не засоряют среду

золой и продуктами сгорания. Однако размещение АЭС в густонаселенных областях таит в себе потенциальную угрозу.

В реакторах на тепловых (т. е. медленных) нейтронах уран используется лишь на 1—2%. Полное использование урана достигается в реакторах на быстрых нейтронах, в которых обеспечивается также воспроизводство нового ядерного горючего в виде плутония. В 1980 г. на Белоярской АЭС состоялся пуск первого в мире реактора на быстрых нейтронах мощностью 600 МВт.

Ядерной энергетике, как и многим другим отраслям промышленности, присущи вредные или опасные факторы воздействия на окружающую среду. Наибольшую потенциальную опасность представляет радиоактивное загрязнение. Сложные проблемы возникают с захоронением радиоактивных отходов и демонтажем отслуживших свой срок АЭС. Срок их службы около 20 лет, после чего восстановление станций из-за многолетнего воздействия радиации на материалы конструкций невозможно.

АЭС проектируется с расчетом на максимальную безопасность персонала станции и населения. Опыт эксплуатации АЭС во всем мире показывает, что биосфера надежно защищена от радиационного воздействия предприятий ядерной энергетике в нормальном режиме эксплуатации. Однако взрыв четвертого реактора на Чернобыльской АЭС показал, что риск разрушения активной зоны реактора из-за ошибок персонала и просчетов в конструкции реакторов остается реальностью, поэтому принимаются строжайшие меры для снижения этого риска.

Ядерные реакторы устанавливаются на атомных подводных лодках и ледоколах.

Ядерное оружие

Неуправляемая цепная реакция с большим коэффициентом размножения нейтронов осуществляется в атомной бомбе.

Для того чтобы происходило почти мгновенное выделение энергии (взрыв), реакция должна идти на быстрых нейтронах (без применения замедлителей). Взрывчатым веществом слу-

жит чистый уран $^{235}_{92}\text{U}$ или плутоний $^{239}_{94}\text{Pu}$.

Чтобы мог произойти взрыв, размеры делящегося материала должны превышать критические. Это достигается либо пу-

тем быстрого соединения двух кусков делящегося материала с докритическими размерами, либо же за счет резкого сжатия одного куска до размеров, при которых утечка нейтронов через поверхность падает настолько, что размеры куска оказываются надкритическими. То и другое осуществляется с помощью обычных взрывчатых веществ.

При взрыве бомбы температура достигает десятков миллионов кельвин. При такой температуре резко повышается давление и образуется мощная взрывная волна. Одновременно возникает мощное излучение. Продукты цепной реакции при взрыве бомбы сильно радиоактивны и опасны для живых организмов.

Атомные бомбы были применены США в конце Второй мировой войны против Японии. В августе 1945 г. были сброшены атомные бомбы на японские города Хиросима и Нагасаки.

В термоядерной (водородной) бомбе источником энергии, которая необходима для термоядерного синтеза, служит взрыв атомной бомбы (урановой или плутониевой), помещенной внутри термоядерной.

Нетривиальным решением оказалось то, при котором взрыв атомной бомбы используется не для повышения температуры, а для сильнейшего сжатия термоядерного топлива излучением, образующимся при взрыве атомной бомбы.

В нашей стране основные идеи создания термоядерного взрыва были выдвинуты А. Д. Сахаровым.

С появлением ядерного оружия победа в войне стала невозможной. Ядерная война способна привести человечество к гибели, поэтому народы всего мира настойчиво борются за запрещение ядерного оружия.

§ 7.21. ПОЛУЧЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

В атомной индустрии все возрастающую ценность для человечества представляют радиоактивные изотопы.

Элементы, не существующие в природе

С помощью ядерных реакций можно получить радиоактивные изотопы всех химических элементов, встречающихся в природе только в стабильном состоянии. Элементы под номе-

рами 43, 61, 85 и 87 вообще не имеют стабильных изотопов и впервые были получены искусственно. Так, например, элемент с порядковым номером $Z = 43$, названный *технецием*, имеет самый долгоживущий изотоп с периодом полураспада около миллиона лет.

С помощью ядерных реакций получены также трансурановые элементы. О *нептунии* и *плутонии* вы уже знаете. Кроме них получены еще следующие элементы: *америций* ($Z = 95$), *кюри* ($Z = 96$), *берклий* ($Z = 97$), *калифорний* ($Z = 98$), *эйнштейний* ($Z = 99$), *фермий* ($Z = 100$), *менделевий* ($Z = 101$), *нобелий* ($Z = 102$), *лоуренсий* ($Z = 103$), *резерфордий* ($Z = 104$), *дубний* ($Z = 105$), *сиборгий* ($Z = 106$), *борий* ($Z = 107$), *гассий* ($Z = 108$), *мейтнерий* ($Z = 109$), а также элементы 110, 111 и 112, не имеющие пока общепризнанных названий. Элементы, начиная со 104, впервые синтезированы либо в подмосковной Дубне, либо в Германии.

Меченые атомы

В настоящее время как в науке, так и в производстве все более широко начинают применяться радиоактивные изотопы различных химических элементов. Наибольшее применение имеет метод *меченых атомов*. Метод основан на том, что химические свойства радиоактивных изотопов не отличаются от свойств нерадиоактивных изотопов тех же элементов.

Обнаружить радиоактивные изотопы можно очень просто по их излучению. Радиоактивность является своеобразной меткой, с помощью которой можно проследить за поведением элемента при различных химических реакциях и физических превращениях веществ. Метод меченых атомов стал одним из наиболее действенных методов при решении многочисленных проблем биологии, физиологии, медицины и т. д.

Радиоактивные изотопы — источники излучений

Радиоактивные изотопы широко применяются в науке, медицине и технике как компактные источники излучений большой энергии. Главным образом используются радиоактивный кобальт ${}^{60}_{27}\text{Co}$ и другие изотопы в качестве источников γ -лучей.

Получение радиоактивных изотопов

Получают радиоактивные изотопы в атомных реакторах и на ускорителях элементарных частиц. В настоящее время производством изотопов занята большая отрасль промышленности.

Радиоактивные изотопы в биологии и медицине

Одним из наиболее выдающихся исследований, проведенных с помощью меченых атомов, явилось исследование обмена веществ в организмах. Было доказано, что за сравнительно небольшое время организм подвергается почти полному обновлению. Слагающие его атомы заменяются новыми.

Лишь железо, как показали опыты по изотопному исследованию крови, является исключением из этого правила. Железо входит в состав гемоглобина красных кровяных шариков.

При введении в пищу радиоактивных атомов железа $^{57}_{26}\text{Fe}$ было обнаружено, что они почти не поступают в кровь. Только в том случае, когда запасы железа в организме иссякают, железо начинает усваиваться организмом.

Если не существует достаточно долгоживущих радиоактивных изотопов, как, например, у кислорода и азота, меняют изотопный состав стабильных элементов. Так, добавлением к

кислороду избытка изотопа $^{18}_8\text{O}$ было установлено, что свободный кислород, выделяемый при фотосинтезе, первоначально входил в состав воды, а не углекислого газа.

Радиоактивные изотопы применяются в медицине как для постановки диагноза, так и для терапевтических целей.

Радиоактивный натрий, вводимый в небольших количествах в кровь, используется для исследования кровообращения.

Иод интенсивно отлагается в щитовидной железе, особенно при базедовой болезни. Наблюдая с помощью счетчика за отложением радиоактивного иода, можно быстро поставить диагноз. Большие дозы радиоактивного иода вызывают частичное разрушение аномально развивающихся тканей, и поэтому радиоактивный иод используют для лечения базедовой болезни.

Интенсивное γ -излучение кобальта используется при лечении раковых заболеваний (кобальтовая пушка).

Радиоактивные изотопы в промышленности

Не менее обширны применения радиоактивных изотопов в промышленности. Одним из примеров этого может служить следующий способ контроля износа поршневых колец в двигателях внутреннего сгорания. Облучая поршневое кольцо нейтронами, вызывают в нем ядерные реакции и делают его радиоактивным. При работе двигателя частички материала кольца попадают в смазочное масло. Исследуя уровень радиоактивности масла после определенного времени работы двигателя, находят износ кольца.

Радиоактивные изотопы позволяют судить о диффузии металлов, процессах в доменных печах и т. д. Мощное γ -излучение радиоактивных препаратов используют для исследования внутренней структуры металлических отливок с целью обнаружения в них дефектов.

Радиоактивные изотопы в сельском хозяйстве

Все более широкое применение получают радиоактивные изотопы в сельском хозяйстве. Облучение семян растений (хлопчатника, капусты, редиса и др.) небольшими дозами γ -лучей от радиоактивных препаратов приводит к заметному увеличению урожайности.

Большие дозы радиации вызывают мутации у растений и микроорганизмов, что в отдельных случаях приводит к появлению мутантов с новыми ценными свойствами (радиоселекция). Так выведены ценные сорта пшеницы, фасоли и других культур, а также получены высокопродуктивные микроорганизмы, применяемые в производстве антибиотиков. Используется γ -излучение радиоактивных изотопов также для борьбы с вредными насекомыми и для консервации пищевых продуктов.

Широкое применение получили меченые атомы в агротехнике. Например, чтобы выяснить, какое из фосфорных удобрений лучше усваивается растением, помечают различные удобрения радиоактивным фосфором $^{31}_{15}\text{P}$. Исследуя затем растения на радиоактивность, можно определить количество усвоенного ими фосфора из разных сортов удобрения.

Интересное применение для определения возраста древних предметов органического происхождения (древесины, древесного угля, тканей и т. д.) получил метод радиоактивного углерода. В растениях всегда имеется β -радиоактивный изотоп углерода $^{14}_6\text{C}$ с периодом полураспада $T = 5700$ лет. Он образуется в атмосфере Земли в небольшом количестве из азота под действием нейтронов. Последние же возникают за счет ядерных реакций, вызванных быстрыми частицами, которые поступают в атмосферу из космоса (космические лучи). Соединяясь с кислородом, этот углерод образует углекислый газ, поглощаемый растениями, а через них и животными. Один грамм углерода из образцов молодого леса испускает около пятнадцати β -частиц в секунду.

После гибели организма пополнение его радиоактивным углеродом прекращается. Имеющееся же количество этого изотопа убывает за счет радиоактивности. Определяя процентное содержание радиоактивного углерода в органических остатках, можно определить их возраст, если он лежит в пределах от 1000 до 50 000 и даже до 100 000 лет. Таким методом узнают возраст египетских мумий, остатков доисторических костров и т. д.

§ 7.22. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Излучения радиоактивных веществ оказывают очень сильное воздействие на все живые организмы. Даже сравнительно слабое излучение, которое при полном поглощении повышает температуру тела лишь на $0,001^\circ\text{C}$, нарушает жизнедеятельность клеток.

Живая клетка — это сложный механизм, не способный продолжать нормальную деятельность даже при малых повреждениях отдельных его участков. Между тем даже слабые излучения способны нанести клеткам существенные повреждения и вызвать опасные заболевания (лучевая болезнь). При большой интенсивности излучения живые организмы погибают. Опасность излучений усугубляется тем, что они не вызывают никаких болевых ощущений даже при смертельных дозах.

Механизм поражающего биологические объекты действия излучения еще недостаточно изучен. Но ясно, что оно сводится к ионизации атомов и молекул и это приводит к изменению их химической активности. Наиболее чувствительны к излучениям ядра клеток, особенно клеток, которые быстро делятся. Поэтому в первую очередь излучения поражают костный мозг, из-за чего нарушается процесс образования крови. Далее наступает поражение клеток пищеварительного тракта и других органов.

Сильное влияние оказывает облучение на наследственность. В большинстве случаев это влияние является неблагоприятным.

Облучение живых организмов может оказывать и определенную пользу. Быстро размножающиеся клетки в злокачественных (раковых) опухолях более чувствительны к облучению, чем нормальные. На этом основано подавление раковой опухоли γ -лучами радиоактивных препаратов, которые для этой цели более эффективны, чем рентгеновские лучи.

Доза излучения

Воздействие излучений на живые организмы характеризуется *дозой излучения*. Поглощенной дозой излучения D называется отношение поглощенной энергии E ионизирующего излучения к массе m облучаемого вещества:

$$D = \frac{E}{m}. \quad (7.22.1)$$

В СИ поглощенную дозу излучения выражают в *греях* (сокращенно: Гр). *Грей равен поглощенной дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж:*

$$1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Естественный фон радиации (космические лучи, радиоактивность окружающей среды и человеческого тела) составляет за год дозу излучения около $2 \cdot 10^{-3}$ Гр на человека. Международная комиссия по радиационной защите установила для лиц, работающих с излучением, предельно допустимую за год дозу 0,05 Гр. Доза излучения в 3—10 Гр, полученная за короткое время, смертельна.

На практике широко используется другая единица дозы излучения — рентген (Р). Эта единица является мерой ионизирующей способности рентгеновского и гамма-излучений. Доза излучения равна 1 Р, если в 1 см³ сухого воздуха при температуре 0 °С и давлении 760 мм рт. ст. образуются ионы, несущие одну абсолютную единицу заряда каждого знака. При этом образуется примерно $2 \cdot 10^9$ пар ионов. Число образующихся ионов связано с поглощаемой веществом энергией. В практической дозиметрии можно считать 1 Р приблизительно эквивалентным поглощенной дозе излучения 0,01 Гр.

Защита от излучения

При работе с любым источником радиации (радиоактивные изотопы, реакторы и др.) необходимо принимать меры по радиационной защите всех людей, могущих попасть в зону действия излучения.

Самый простой метод защиты — это удаление персонала от источника излучения на достаточно большое расстояние. Даже без учета поглощения в воздухе интенсивность радиации убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Поэтому ампулы с радиоактивными препаратами не следует брать руками. Надо пользоваться специальными щипцами с длинной ручкой.

В тех случаях, когда удаление от источника излучения на достаточно большое расстояние невозможно, используют для защиты от излучения преграды из поглощающих материалов.

Наиболее сложна защита от γ -лучей и нейтронов из-за их большой проникающей способности. Лучшим поглотителем γ -лучей является свинец. Медленные нейтроны хорошо поглощаются бором и кадмием. Быстрые нейтроны предварительно замедляются с помощью графита.

- ? 1. Что такое критическая масса?
2. Почему реакция слияния легких ядер происходит только при очень высоких температурах?
3. Как объяснить с точки зрения закона сохранения энергии, что энергия выделяется как при делении тяжелых ядер, так и при слиянии легких ядер?

§ 7.23. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

При решении задач на ядерную физику надо знать правила смещения (см. § 7.7) и законы сохранения, выполняющиеся при радиоактивном распаде и других ядерных реакциях. Кроме того, надо уметь пользоваться законом радиоактивного распада (7.6.1) и определять энергию связи атомных ядер по формуле (7.13.4). Определение энергии связи даст возможность решать задачи на вычисление энергетического выхода ядерных реакций.

Задача 1

В природе существует три радиоактивных семейства, родоначальниками которых являются изотопы урана ${}^{238}_{92}\text{U}$, тория ${}^{232}_{90}\text{Th}$ и актиния ${}^{235}_{89}\text{Ac}$. В результате последовательной серии радиоактивных распадов ${}^{238}_{92}\text{U}$ превращается в изотоп свинца ${}^{206}_{82}\text{Pb}$; ${}^{232}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{208}_{82}\text{Pb}$, ${}^{235}_{89}\text{Ac} \rightarrow {}^{207}_{82}\text{Pb}$. Определите, сколько α - и β -распадов испытывают исходные изотопы в каждом радиоактивном семействе при их превращении в соответствующие изотопы свинца.

Решение. Найдем сначала, сколько α - и β -распадов испытывает ядро урана ${}^{238}_{92}\text{U}$, чтобы превратиться в ядро свинца ${}^{206}_{82}\text{Pb}$.

Число α -распадов n_α найдем, разделив разность массовых чисел начального и конечного ядер на четыре, так как массовое число изменяется только при α -распаде. При одном распаде оно уменьшается на 4. Для нашего примера

$$n_\alpha = \frac{M_1 - M_2}{4} = 8.$$

Для нахождения числа β -распадов n_β надо учесть, что при α -распаде заряд ядра уменьшается на 2 единицы, а при β -распаде увеличивается на 1 единицу. Так как при превращении ядра урана в ядро свинца заряд уменьшился на $92 - 82 = 10$, то

$$2n_\alpha - n_\beta = 10.$$

Отсюда, учитывая, что $n_\alpha = 8$, получим $n_\beta = 6$.

Аналогично найдем:

для второго семейства $n_\alpha = 6$; $n_\beta = 4$ и

для третьего семейства $n_\alpha = 7$; $n_\beta = 7$.

Задача 2

Натрий $^{23}_{11}\text{Na}$, облучаемый дейтронами, превращается в радиоактивный изотоп натрия $^{24}_{11}\text{Na}$ с периодом полураспада $T = 15,5$ ч. Какая доля первоначального количества радиоактивного натрия останется через сутки, если прекратить облучение дейтронами?

Решение. Согласно закону радиоактивного распада (7.6.1) спустя время t число нераспавшихся ядер натрия

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}},$$

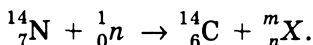
где N_0 — первоначальное количество ядер $^{24}_{11}\text{Na}$. Так как $t = 24$ ч, то доля оставшихся ядер

$$\frac{N}{N_0} = 2^{-\frac{t}{T}} \approx 0,34.$$

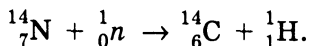
Задача 3

При бомбардировке изотопа азота $^{14}_7\text{N}$ нейтронами получается изотоп углерода $^{14}_6\text{C}$, который оказывается β -радиоактивным. Запишите уравнения протекающих при этом ядерных реакций.

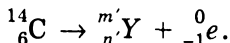
Решение. Первая ядерная реакция имеет вид:



Согласно закону сохранения электрического заряда $n = 1$. Так как массовое число также сохраняется, то $m = 1$. Следовательно, ${}^m_n\text{X}$ — это протон: ${}^1_1\text{H}$. Таким образом, первая реакция выглядит так:

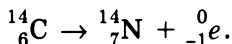


Вторая реакция имеет вид:



Отсюда, согласно законам сохранения заряда и массового числа, имеем $m' = 14$, $n' = 7$. Следовательно, ${}_{n'}^{m'}Y$ — это изотоп азота: ${}_{7}^{14}\text{N}$.

Таким образом,



Задача 4

Вычислите дефект массы и энергию связи ядра кислорода ${}_{8}^{17}\text{O}$. Известно, что $m_p = 1,00728$ а. е. м., $m_n = 1,00866$ а. е. м., $M_{\text{я}} = 16,99913$ а. е. м.

Решение. Дефект массы, согласно (7.13.3), равен

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}.$$

Так как $Z = 8$, а $N = A - Z = 17 - 8 = 9$, то

$$\begin{aligned}\Delta M &= (8 \cdot 1,00728 + 9 \cdot 1,00866 - 16,99913) \text{ а. е. м.} = \\ &= 0,13705 \text{ а. е. м.}\end{aligned}$$

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,6605655(86) \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Следовательно,

$$\Delta M = 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 0,13705 \text{ кг} = 2,28 \cdot 10^{-28} \text{ кг}.$$

Энергию связи ядра найдем по формуле (7.13.4):

$$\begin{aligned}\Delta E_{\text{св}} &= \Delta M c^2 = 2,28 \cdot 10^{-28} \text{ кг} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 = 2,05 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = \\ &= 1,28 \cdot 10^2 \text{ МэВ} = 128 \text{ МэВ}.\end{aligned}$$

Ответ «128 МэВ» можно получить короче, если воспользоваться тем, что энергетический эквивалент 1 а. е. м. равен 931,5 МэВ:

$$\Delta E_{\text{св}} = 0,13705 \text{ а. е. м.} \cdot 931,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{а. е. м.}} \approx 128 \text{ МэВ}.$$

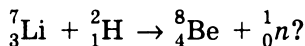
П р и м е ч а н и е. В этой задаче мы пользовались числовыми значениями некоторых постоянных, которые можно использовать при решении других задач:

$$1) 1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг};$$

$$2) \text{ энергетический эквивалент } 1 \text{ а. е. м. равен } 931,5 \text{ МэВ}.$$

Задача 5

Какая энергия выделяется при ядерной реакции



Массы ядер соответственно равны:

$${}^2_1\text{H} \text{ — } 2,01355 \text{ а. е. м.}; \quad {}^7_3\text{Li} \text{ — } 7,01436 \text{ а. е. м.}; \quad {}^8_4\text{Be} \text{ — } 8,00311 \text{ а. е. м.}$$

Решение. Вычислим сначала дефект массы исходных ядер:

$$\begin{aligned} \Delta M_1 &= (3 \cdot 1,00728 + 4 \cdot 1,00866 - 7,01436) \text{ а. е. м.} + \\ &+ (1,00728 + 1,00866 - 2,01355) \text{ а. е. м.} = 0,045589 \text{ а. е. м.} \end{aligned}$$

Теперь найдем дефект массы ядер, получившихся в результате ядерной реакции:

$$\begin{aligned} \Delta M_2 &= (4 \cdot 1,00728 + 4 \cdot 1,00866 - 8,00311) \text{ а. е. м.} + 0 = \\ &= 0,06065 \text{ а. е. м.} \end{aligned}$$

Дефект массы увеличился на

$$\Delta M = \Delta M_2 - \Delta M_1 = 0,01476 \text{ а. е. м.}$$

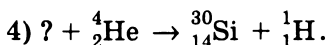
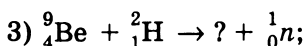
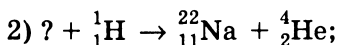
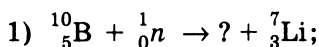
Следовательно, увеличилась энергия связи. Это и есть выделившаяся энергия. Она равна

$$931,5 \text{ МэВ} \cdot 0,01476 \approx 14 \text{ МэВ.}$$

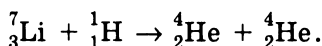
Упражнение 9

1. Кроме трех естественных радиоактивных семейств, о которых шла речь в задаче 1 § 7.23, существует еще одно радиоактивное семейство, полученное искусственно. Оно начинается трансурановым элементом нептунием ${}^{237}_{93}\text{Np}$ и заканчивается висмутом ${}^{209}_{83}\text{Bi}$. Определите число α - и β -распадов в этом радиоактивном семействе.
2. Относительная атомная масса хлора равна 35,5. Хлор имеет два изотопа: ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ и ${}^{37}_{17}\text{Cl}$. Найдите их процентное содержание.
3. Радиоактивный изотоп углерода ${}^{14}_6\text{C}$ в старом куске дерева составляет 0,312 массы этого изотопа в живых растениях. Каков возраст этого куска дерева? Период полураспада изотопа ${}^{14}_6\text{C}$ равен 5570 годам.

4. Активность радиоактивного элемента (число распадов в единицу времени) уменьшилась за 100 сут в 16 раз. Определите период полураспада.
5. Как изменяется активность препарата кобальта в течение трех лет? Период полураспада 5,2 года.
6. Допишите ядерные реакции:

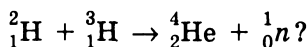


7. Вычислите энергию связи ядра алюминия ${}^{27}_{13}\text{Al}$. $m_p = 1,00728$ а. е. м.; $m_n = 1,00866$ а. е. м.; $M_{\text{я}} = 26,98146$ а. е. м.
8. Вычислите удельную энергию связи ядра урана ${}^{238}_{92}\text{U}$. $m_p = 1,00728$ а. е. м.; $m_n = 1,00866$ а. е. м.; $M_{\text{я}} = 238,03$ а. е. м.
9. Определите энергию, которая выделяется (или поглощается) в реакции



Масса ядра ${}^7_3\text{Li}$ равна 7,01436 а. е. м., а ядра ${}^4_2\text{He}$ — 4,00150 а. е. м.

10. Какая энергия выделяется при термоядерной реакции



Массы изотопов водорода соответственно равны:

дейтерия ${}^2_1\text{H}$ — 2,01355 а. е. м.; трития ${}^3_1\text{H}$ — 3,01550 а. е. м.

11. Карманный дозиметр радиоактивного облучения представляет собой миниатюрную (типа авторучки) ионизационную камеру емкостью $C = 3,0$ пФ. Начальное напряжение на камере $U_1 = 180$ В. Под влиянием облучения напряжение снизилось до $U_2 = 160$ В. Объем воздуха в камере дозиметра $V = 1,8$ см³. Определите дозу облучения в рентгенах.