

В начале XX в. благодаря опытам Резерфорда возникло представление о том, что в центре атома находится крохотное по своим размерам, но массивное ядро. Одновременно с созданием квантовой теории и попытками объяснить строение атома и его электронной оболочки начались исследования и атомного ядра. В этой главе мы дадим краткий обзор *ядерной физики*.

### 42.1. Структура ядра

У физиков начала XX в. существовала важная проблема: обладает ли атомное ядро структурой и какой эта структура могла бы быть? Оказалось, что ядро достаточно сложно, и в его структуре остается много неясного и по сей день. Тем не менее в начале 30-х годов была разработана модель атомного ядра, которая по-прежнему находит широкое применение. Согласно этой модели, ядро состоит из частиц двух типов – протонов и нейтронов. (Не следует забывать о том, что эти «частицы» обладают волновыми свойствами, но для большей наглядности мы будем говорить о протонах и нейтронах просто как о частицах.) **Протон** представляет собой ядро простейшего атома – водорода. Он имеет положительный заряд ( $+e = +1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл) и массу

$$m_p = (1,6726485 \pm 0,0000086) \cdot 10^{-27} \text{ кг},$$

или округленно

$$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

**Нейтрон**, существование которого было установлено только в 1932 г. англичанином Джеймсом Чедвиком (1891–1974), электрически нейтрален ( $q = 0$ ), чем и объясняется его название. Масса нейтрона почти совпадает с массой протона:

$$m_n = (1,674954 \pm 0,000009) \cdot 10^{-27} \text{ кг},$$

или округленно

$$m_n = 1,6750 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Нейтроны и протоны, представляющие собой два составных элемента атомного ядра, объединяют общим наименованием **нуклонов**.

Ядро атома водорода состоит из одного протона, тогда как ядра атомов других химических элементов содержат и нейтроны, и протоны. Различные типы ядер часто называют **нуклидами**. Число протонов в ядре (или в нуклиде) называется **атомным номером** и обозначается буквой  $Z$ . Общее число нуклонов, т.е. нейтронов и протонов, обозначается буквой  $A$  и называется **массовым числом**. Такое название это число получило потому, что произведение  $A$  на массу отдельного нуклона очень близко к массе ядра. У нуклида с 7 протонами и 8 нейтронами  $Z = 7$  и  $A = 15$ . Число нейтронов в ядре  $N = A - Z$ .

Чтобы характеризовать данный нуклид, необходимо указать только  $A$  и  $Z$ . Обычно химические элементы принято обозначать символом



где  $X$  – символ химического элемента (табл. 41.3),  $A$  – массовое число,  $Z$  – атомный номер. Например,  ${}^{15}_7\text{N}$  означает ядро атома азота, содержащее 7 протонов и 8 нейтронов, т.е. всего 15 нуклонов. У нейтрального атома число электронов, обращающихся вокруг ядра, равно атомному номеру  $Z$  (так как заряд электрона по величине равен заряду протона, но противоположен по знаку). Основные свойства атома определяются числом электронов. Следовательно,  $Z$  характеризует атом данного химического элемента: углерода, кислорода, золота или какого-нибудь другого элемента. Указывать наряду с символом химического элемента его атомный номер  $Z$ , как это сделано выше, излишне. Если это ядро азота, то ясно, что  $Z = 7$ . Поэтому индекс  $Z$  иногда опускают и вместо  ${}^{15}_7\text{N}$  записывают просто  ${}^{15}\text{N}$  (читается: «азот пятнадцать»). Однако довольно часто для удобства индекс  $Z$  указывают.

В ядрах одного химического элемента (например, углерода) число нейтронов может быть различным, а число протонов всегда одно и то же. Например, в ядрах углерода число протонов всегда равно 6, а число нейтронов может быть равно 5, 6, 7, 8, 9 или 10. Ядра, содержащие одинаковое число протонов, но различное число нейтронов, называются **изотопами**. Например,  ${}^{11}_6\text{C}$ ,  ${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^{13}_6\text{C}$ ,  ${}^{14}_6\text{C}$ ,  ${}^{15}_6\text{C}$  и  ${}^{16}_6\text{C}$  – изотопы углерода. Разумеется, распространенность изотопов одного и того же элемента неодинакова. Например, 98,9% встречающегося в природных условиях (на Земле) углерода приходится на изотоп  ${}^{12}_6\text{C}$  и только примерно 1,1% – на изотоп  ${}^{13}_6\text{C}$ . Приведенные данные (в процентах) называются **распространенностью** соответствующего изотопа в природе<sup>1)</sup>. Многие изотопы не встречаются в природе, но могут быть получены в

<sup>1)</sup> Приведенные в периодической системе (табл. 41.3) массы элементов получены усреднением масс изотопов по их распространенности в природе.

лаборатории с помощью ядерных реакций (о которых мы расскажем позднее). Более того, все трансураниевые элементы (с  $Z > 92$ ) не встречаются в природе и могут быть получены только искусственно.

Приблизительно размеры ядер были впервые определены Резерфордом в опытах по рассеянию заряженных частиц. Разумеется, мы не можем говорить о точных размерах ядра из-за корпускулярно-волнового дуализма: пространственные размеры ядра будут несколько размыты. Тем не менее грубо «размеры» ядра поддаются измерению, и наиболее точные из последних измерений были проведены путем рассеяния быстрых электронов на ядрах. Оказалось, что ядра имеют примерно сферическую форму, причем радиус возрастает в зависимости от  $A$  приближенно согласно формуле:

$$r \approx (1,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}) A^{1/3} \quad (42.1)$$

Так как объем сферы равен  $V = 4/3 \pi r^3$ , мы заключаем, что объем ядра пропорционален числу нуклонов:  $V \sim A$ . Такую зависимость следовало ожидать, если бы нуклоны были похожи на твердые бильярдные шары: удваивая число шаров, вы тем самым удваиваете объем. Следовательно, все ядра имеют примерно одинаковую плотность.

Один из способов определения масс ядер основан на измерении с помощью масс-спектрометра радиуса кривизны быстро движущихся ядер в магнитном поле (разд. 28.7). Мы уже упоминали о том, что с помощью именно этого прибора было установлено существование различных изотопов одного и того же элемента. Массы ядер принято измерять в *унифицированных атомных единицах массы* (а. е. м.). В этой шкале масса нейтрального атома  ${}^1_6\text{C}$  принята за 12,000000 а. е. м. Соответственно измеренная масса нейтрона составляет 1,008665 а. е. м., протона – 1,007276 а. е. м., а нейтрального атома водорода  ${}^1_1\text{H}$  (протон плюс электрон) – 1,007825 а. е. м. Массы многих нуклидов приведены в приложении Г. (Следует подчеркнуть, что в таблицах приведены, как обычно, массы *нейтральных атомов*, а не голых ядер.)

Массы часто выражают в единицах энергии электрон-вольт. Использование единиц энергии возможно из-за того, что масса и энергия взаимосвязаны и точная связь между ними описывается формулой Эйнштейна  $E = mc^2$  (гл. 39). Так как масса нейтрального атома водорода  ${}^1_1\text{H}$  равна  $1,6736 \cdot 10^{-27}$  кг, или 1,007825 а. е. м., справедливо равенство  $1,0000 \text{ а. е. м.} = (1,0000/1,007825) \cdot (1,6736 \times 10^{-27} \text{ кг}) = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ . Эта масса эквивалентна энергии  $E = mc^2 = (1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ кг})(2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 / (1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/эВ}) = 931,5 \text{ МэВ}$ . Точные современные значения равны

$$1 \text{ а. е. м.} = (1,6605655 \pm 0,0000086) \cdot 10^{-27} \text{ кг} = (931,5016 \pm \pm 0,0026) \text{ МэВ}/c^2;$$

Таблица 42.1. Массы покоя в килограммах, атомных единицах массы и МэВ/c<sup>2</sup>

Частица	Масса		
	кг	а. е. м.	МэВ/c <sup>2</sup>
Электрон	$9,1095 \cdot 10^{-31}$	0,00054858	0,51100
Протон	$1,67265 \cdot 10^{-27}$	1,007276	938,28
Атом ${}^1_1\text{H}$	$1,67356 \cdot 10^{-27}$	1,007825	938,79
Нейтрон	$1,67500 \cdot 10^{-27}$	1,008665	939,57

их можно округлить до

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 931,5 \text{ МэВ}/c^2.$$

Массы покоя некоторых частиц приведены в табл. 42.1.

## 42.2. Энергия связи и ядерные силы

Общая масса ядра, как показывает следующий пример, всегда меньше суммы масс составляющих его протонов и нейтронов.

**Пример 42.1.** Сравните массу ядра  ${}^4_2\text{He}$  с массой составляющих его нуклонов.

**Решение.** Масса нейтрального атома  ${}^4_2\text{He}$ , как видно из приложения Г, равна 4,002603 а. е. м. Суммарная масса двух нейтронов и двух протонов (включая массу двух электронов) равна

$$2m_n = 2,017330 \text{ а. е. м.}$$

$$2m({}^1_1\text{H}) = 2,015650 \text{ а. е. м.}$$

$$4,032980 \text{ а. е. м.}$$

(Нам почти всегда приходится иметь дело с массами нейтральных атомов, т. е. ядер с  $Z$  электронами, так как на опыте измеряются массы нейтральных атомов. Следовательно, при сравнении масс ядер необходимо учитывать массы электронов. Именно поэтому мы используем в нашем примере массу нейтрального атома  ${}^1_1\text{H}$ , а не массу одного протона.)

Мы видим, что измеренная масса  ${}^4_2\text{He}$  на величину 4,032980 а. е. м. — 4,002603 а. е. м. = 0,030377 а. е. м. меньше суммарной массы нуклонов, входящих в состав ядра  ${}^4_2\text{He}$ . Как это может быть? На что пошла часть массы?

В действительности она превратилась в энергию (излучения, кинетическую энергию и т. п.). Разность масс (или энергий) для  ${}^4_2\text{He}$  равна (0,030377 а. е. м.) (931,5 МэВ/а. е. м.) = 28,30 МэВ. Эта разность называется **полной энергией связи** ядра. Она показывает, какую энергию необходимо затратить, чтобы разделить ядро на составляющие его протоны и нейтроны. Если бы масса ядра  ${}^4_2\text{He}$  была в точности равна массе двух нейтронов и двух протонов, то ядро распадалось бы самопроизвольно без сообщения ему дополнительной энергии. Для обеспечения стабильности ядра его масса *должна* быть меньше массы составляющих его нуклонов. Заметим, что энергия связи не содержится в

самом ядре – это энергия, которой недостает ядру по сравнению с суммарной массой составляющих его нуклонов.

Энергию связи ядра уместно сравнить с энергией связи электронов в атоме. В гл. 40 мы видели, что энергия связи электрона, например, в атоме водорода равна 13,6 эВ. Масса атома водорода  ${}^1_1\text{H}$  меньше суммарной массы одного протона и одного электрона на 13,6 эВ. По сравнению с полной массой атома водорода (938 МэВ) это – очень малая величина (примерно  $10^{-8}$ ), и для практических целей разностью масс можно пренебречь. Энергии связи ядер примерно в  $10^6$  раз больше энергий связи атомов и поэтому оказываются гораздо более важными.

**Удельной энергией связи** (или **средней энергией связи на нуклон**) по определению называют полную энергию связи ядра, деленную на число нуклонов в ядре  $A$ . Для  ${}^4_2\text{He}$  эта величина составляет  $28,3 \text{ МэВ}/4 = 7,1 \text{ МэВ}$ . На рис. 42.1 показана зависимость средней энергии связи на нуклон от  $A$  для стабильных ядер. С увеличением  $A$  кривая сначала возрастает и выходит на насыщение (примерно 8 МэВ на нуклон) при  $A \approx 15$ . При  $A > 60$  кривая медленно спадает. Это означает, что более тяжелые ядра оказываются менее прочными, нежели ядра элементов в середине периодической системы. (Как мы видим, это обстоятельство обеспечивает высвобождение ядерной энергии в процессах деления и синтеза ядер.)

Ядра атомов можно анализировать не только с точки зрения энергии, но и с точки зрения тех сил, которые удерживают нуклоны в ядре. Протоны и нейтроны не могли бы самопроизвольно образовать ядро, так как все протоны положительно заряжены и поэтому между ними существует отталкивание. Возникает вопрос: почему ядро не разлетается на части, несмотря на силы отталкивания между протонами, стремящиеся развалить его? Так как стабильные ядра *существуют*, ясно, что должна действо-

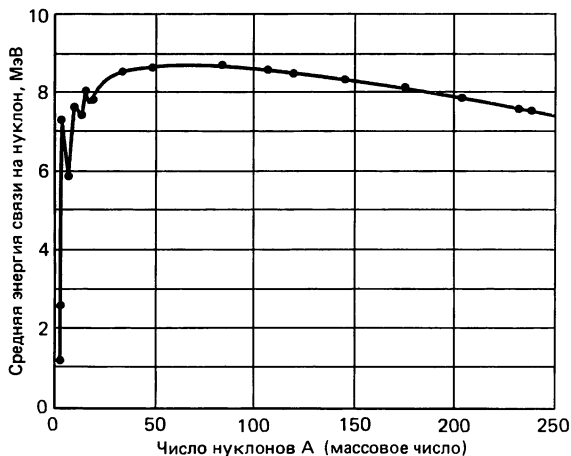


Рис. 42.1. Средняя энергия связи на нуклон как функция массового числа  $A$  для стабильных ядер.

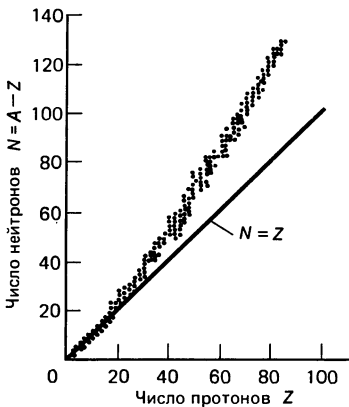


Рис. 42.2. Число нейтронов как функция числа протонов в стабильных ядрах (обозначены точками).

вать какая-то другая сила. Так как эта новая сила превосходит кулоновскую (которая в свою очередь превосходит гравитационное взаимодействие), она получила название **сильного (ядерного) взаимодействия**. Сильное (ядерное) взаимодействие — это притяжение, действующее между всеми нуклонами (в равной степени как протонами, так и нейтронами). Таким образом, протоны благодаря ядерным силам притягивают друг друга и в то же время благодаря кулоновскому взаимодействию отталкивают друг друга. Нейтроны не имеют электрического заряда и поэтому лишь притягивают другие нейтроны или протоны благодаря сильному взаимодействию (ядерным силам).

Сильное взаимодействие оказалось более сложным, чем гравитационное и электромагнитное взаимодействия. Точное математическое описание его пока неизвестно. Тем не менее затрачено немало усилий, чтобы понять природу этого взаимодействия. Одной из важных особенностей сильного взаимодействия является его *короткодействие*: сильное взаимодействие проявляется только на очень малых расстояниях. Сильное взаимодействие двух нуклонов оказывается очень большим, если расстояние между нуклонами меньше  $10^{-15}$  м, но падает практически до нуля, если расстояние между нуклонами превышает  $10^{-15}$  м. Электромагнитные и гравитационные силы действуют на больших расстояниях и называются поэтому *дальнодействующими*. Сильное взаимодействие обладает и другими особенностями. Например, если нуклид содержит слишком много или слишком мало нейтронов по сравнению с числом протонов, то сильное взаимодействие ослабевает: при нарушении баланса между протонами и нейтронами нуклиды становятся нестабильными. Как показано на рис. 42.2, стабильные ядра обнаруживают тенденцию к выравниванию числа протонов и нейтронов ( $N = Z$ ) вплоть до  $A \approx 30$  или  $A \approx 40$ . За этой областью стабильные ядра содержат больше нейтронов, чем протонов. Этот факт отражает рост кулоновского отталкивания с увеличением атомного номера  $Z$ . Поэтому для поддержания стабильности ядер требуется большее число нейтронов, у которых имеется лишь ядерное притяжение. При очень больших  $Z$  избыток нейтронов уже не в состоянии скомпенсировать сильно возросшее кулоновское отталкивание и при  $Z > 82$  стабильных нуклидов не существует.

Под стабильным ядром мы понимаем ядро, которое существует сколь угодно долго. Что же тогда такое нестабильное ядро? Это ядро, которое превращается в другое ядро в результате радиоактивного распада. Прежде чем перейти к рассмотрению радиоактивности, необходимо упомянуть о существовании еще одного типа ядерных сил, существенно уступающих по своей величине сильному взаимодействию. Они получили название **слабого взаимодействия**. Это взаимодействие проявляется в

существовании определенных типов радиоактивного распада. Два вида ядерных сил – сильное и слабое взаимодействия – вместе с гравитационным и электромагнитным взаимодействиями образуют четыре известных фундаментальных взаимодействия в природе (подробнее см. гл. 43).

### 42.3. Радиоактивность

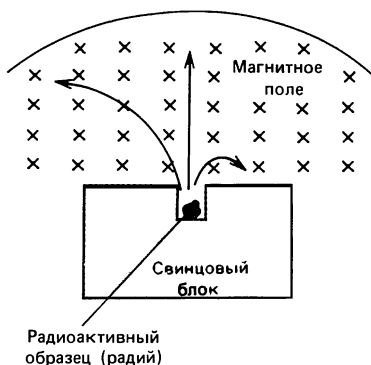
Историю ядерной физики принято отсчитывать с 1896 г. В этом году Анри Беккерель (1852–1908) сделал важное открытие: занимаясь исследованием фосфоресценции, он обнаружил, что один из минералов (это был образец, содержащий уран) обладает способностью засвечивать фотопластинку, даже если та завернута в светонепроницаемую бумагу. Было ясно, что минерал испускает какое-то новое излучение, причем самопроизвольно в отличие от рентгеновского излучения. Новое явление получило название **радиоактивности**.

Вскоре после открытия Беккереля Мария Кюри (1867–1934) и ее муж Пьер Кюри (1856–1906) выделили два ранее неизвестных химических элемента, обладавших высокой радиоактивностью. Эти элементы получили названия полоний и радий. Вскоре затем были открыты и другие радиоактивные элементы. Во всех случаях на радиоактивность не влияли самые интенсивные физические и химические воздействия, в том числе сильный нагрев или охлаждение, обработка сильнодействующими химическими реагентами. Вскоре стало ясно, что источником радиоактивности являются недра атома – атомное ядро. Стало ясно также, что радиоактивность возникает в результате *распада* нестабильного ядра. Ядерные силы вызывают нестабильность некоторых изотопов, и они распадаются с испусканием того или иного излучения.

Многие нестабильные изотопы встречаются в природе. Их радиоактивность называется *естественной радиоактивностью*. Другие нестабильные изотопы могут быть созданы в лабораторных условиях как продукты ядерных реакций (разд. 42.11). Такие изотопы называются *искусственными*, а их радиоактивность – *искусственной радиоактивностью*.

Около 1898 г. Резерфорд и другие исследователи изучали природу излучений, возникающих при радиоактивном распаде. Они обнаружили, что по проникающей способности излучение можно разделить на три различных вида. Излучение одного вида едва проникало сквозь лист бумаги. Излучение второго вида проходило сквозь алюминиевую пластинку толщиной до 3 мм. Излучение третьего вида было особенно проникающим: оно проходило сквозь слой свинца толщиной в несколько сантиметров и могло быть обнаружено с помощью детектора. Эти три вида излучения были названы первыми тремя буква-

**Рис. 42.3.** В магнитном поле (направленном от читателя перпендикулярно плоскости рисунка)  $\alpha$ - и  $\beta$ -лучи изгибаются в противоположные стороны;  $\gamma$ -лучи в магнитном поле не изгибаются.



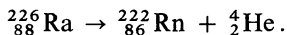
ми греческого алфавита соответственно: альфа ( $\alpha$ )-, бета ( $\beta$ )- и гамма ( $\gamma$ )-излучением (лучами).

Оказалось, что все три вида излучений имеют различный электрический заряд и, следовательно, по-разному отклоняются магнитным полем (рис. 42.3):  $\alpha$ -лучи заряжены положительно,  $\beta$ -лучи заряжены отрицательно, а  $\gamma$ -лучи нейтральны. Было обнаружено, что радиоактивные излучения всех трех видов представляют собой уже известные частицы. Гамма-лучи представляют собой фотоны очень высокой энергии, значительно превышающей энергию фотонов рентгеновского излучения. Бета-лучи состоят из электронов, идентичных электронам на орбитах вокруг ядра (хотя электроны  $\beta$ -лучей испускаются ядром). Альфа-лучи (или  $\alpha$ -частицы) — это ядра атомов гелия  ${}^4_2\text{He}$ , т. е. каждая  $\alpha$ -частица состоит из двух протонов и двух нейтронов, связанных вместе.

Рассмотрим теперь эти виды радиоактивного распада более подробно.

## 42.4. Альфа-распад

Ядро, образующееся в результате испускания исходным ядром  $\alpha$ -частицы (ядра  ${}^4_2\text{He}$ ), должно отличаться от исходного, так как оно теряет два протона и два нейтрона. Например, известно, что радий-226 ( ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ ) является источником  $\alpha$ -частиц. При распаде он превращается в ядро с  $Z = 88 - 2 = 86$  и  $A = 226 - 4 = 222$ . Ядро с  $Z = 86$  — это радон (Rn) (табл. 41.3). Следовательно, при  $\alpha$ -распаде радий превращается в радон:



Ясно, что при  $\alpha$ -распаде всегда образуется новый химический элемент: дочернее ядро (в нашем примере  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ ) отличается от материнского ядра (в нашем примере  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ ). Превращение одного элемента в другой иногда называют **трансмутацией**.



Альфа-распад обусловлен тем, что сильное взаимодействие не в состоянии обеспечить стабильность очень тяжелых ядер. Вследствие короткодействия сильное взаимодействие связывает только соседние нуклоны, в то время как электростатическое отталкивание действует в объеме всего ядра. У очень тяжелых ядер (т.е. при больших  $Z$ ) кулоновское отталкивание сильно возрастает и действует между всеми протонами, тогда как сильное ядерное взаимодействие проявляется лишь между соседними нуклонами; оно не может противостоять кулоновскому отталкиванию и удержать нуклоны в ядре.

Нестабильность ядра можно характеризовать энергией связи: энергия связи радиоактивного ядра слишком мала, чтобы ядро было стабильным. Иначе говоря, масса материнского ядра оказывается больше суммарной массы дочернего ядра и  $\alpha$ -частицы. Разность масс выделяется в виде кинетической энергии, уносимой в основном  $\alpha$ -частицей. Если бы масса материнского ядра была меньше суммарной массы дочернего ядра и  $\alpha$ -частицы, то  $\alpha$ -распад не происходил бы, так как при этом нарушался бы закон сохранения энергии.

**Пример 42.2.** Вычислите кинетическую энергию  $\alpha$ -частицы, испускаемой при превращении ядра урана  ${}_{92}^{232}\text{U}$  (с массой 232,03714 а.е.м.) в ядро тория  ${}_{90}^{228}\text{Th}$  (с массой 228,02873 а.е.м.).

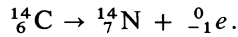
**Решение.** Так как масса  $\alpha$ -частицы (ядра гелия  ${}_{2}^4\text{He}$ ) равна 4,002603 а.е.м., полная масса продуктов распада равна 228,02873 а.е.м. + 4,002603 а.е.м. = 232,03133 а.е.м. Уменьшение массы при распаде ядра  ${}_{92}^{232}\text{U}$  составляет 232,03714

а.е.м. — 232,03133 а.е.м. = 0,00581 а.е.м. Эта масса переходит в кинетическую энергию. Так как 1 а.е.м. = 931,5 МэВ, при распаде высвобождается энергия (0,00581 а.е.м.) (931,5 МэВ)  $\approx 5,4$  МэВ. (С помощью закона сохранения импульса можно показать, что кинетическая энергия  $\alpha$ -частицы равна примерно 5,3 МэВ. Следовательно, дочернее ядро, испытывающее при вылете  $\alpha$ -частицы отдачу в противоположном направлении, обладает кинетической энергией около 0,1 МэВ.)

Вас может заинтересовать, почему ядра испускают именно комбинацию четырех нуклонов, называемую  $\alpha$ -частицей. Почему, например, ядро не испускает просто четыре нуклона или даже один нуклон? Ответ заключается в том, что  $\alpha$ -частица сильно связана и ее масса значительно меньше массы четырех отдельных нуклонов. Как было показано в примере 42.1, два протона и два нейтрона в отдельности имеют общую массу 4,03298 а.е.м. Ядро тория  ${}_{90}^{228}\text{Th}$  и четыре нуклона имеют общую массу 232,06171 а.е.м., что превышает массу материнского ядра. Такой распад невозможен, так как он нарушал бы закон сохранения энергии. По соображениям сохранения энергии испускание одного нуклона также почти всегда невозможно.

## 42.5. Бета-распад

Превращение элементов происходит и при  $\beta$ -распаде ядра, т.е. испускании электрона или  $\beta$ -частицы. Например,  $\beta$ -распад ядра  $^{14}_6\text{C}$  происходит следующим образом:



(Символом  $^0_{-1}e$  здесь обозначен электрон, так как его заряд соответствует  $Z = -1$ , а поскольку он не является нуклоном и имеет очень малую массу, мы считаем  $A = 0$ .) При испускании электрона ядро не теряет нуклонов, и полное число нуклонов  $A$  в дочернем ядре такое же, как в материнском. Но поскольку был испущен электрон, электрический заряд дочернего ядра отличается от заряда материнского ядра. В нашем примере у материнского ядра  $Z = +6$ . При  $\beta$ -распаде оно теряет заряд  $-1$ , поэтому (согласно закону сохранения заряда) заряд дочернего ядра должен быть на единицу больше материнского, т.е. равен  $+7$ . Следовательно, у дочернего ядра  $Z = 7$ , что соответствует ядру атома азота.

Необходимо подчеркнуть, что испускаемый при  $\beta$ -распаде электрон не имеет отношения к орбитальным электронам. Он рождается *внутри самого ядра*: один из нейтронов превращается в протон и при этом (для сохранения заряда) испускает электрон. Свободные нейтроны действительно распадаются подобным образом:  $n \rightarrow p + e^-$ . Чтобы подчеркнуть ядерное происхождение электронов, испускаемых при  $\beta$ -распаде, их часто называют не электронами, а  $\beta$ -частицами. Тем не менее  $\beta$ -частицы ничем не отличаются от орбитальных электронов.

**Пример 42.3.** Какая энергия выделяется при  $\beta$ -распаде ядра углерода  $^{14}_6\text{C}$  и его превращении в ядро азота  $^{14}_7\text{N}$ ? Необходимые данные возьмите из приложения Г.

**Решение.** В приложении Г приведены массы нейтральных атомов, поэтому необходимо учитывать число электронов в атоме. У материнского атома шесть орбитальных электронов, поэтому атом нейтрален и имеет массу  $14,003242$  а.е.м. Дочерний атом в этом распаде  $^{14}_7\text{N}$  не будет нейтральным, так как у него те же шесть орбитальных электронов, а ядро имеет заряд  $+7e$ . Но суммарная масса дочерне-

го атома с шестью электронами и испущенного электрона (общее число электронов равно семи) равна массе нейтрального атома азота. Таким образом, масса продуктов распада составляет

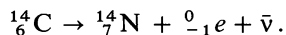
$$\begin{aligned} & (\text{масса ядра } ^{14}_7\text{N} + 6 \text{ электронов}) + (\text{масса} \\ & \quad 1 \text{ электрона}) = \text{масса нейтрально-} \\ & \quad \text{го атома } ^{14}_7\text{N} \text{ (с 7 электронами)} = \\ & \quad = 14,003074 \text{ а.е.м.} \end{aligned}$$

Следовательно, масса до распада равна  $14,003242$  а.е.м., а после распада  $14,003074$  а.е.м., поэтому разность масс составляет  $0,000168$  а.е.м., что соответствует энергии  $0,156$  МэВ, или  $156$  кэВ.

Как видно из примера, электрон должен обладать кинетической энергией  $156$  кэВ. (Дочернее ядро, поскольку его масса во много раз больше массы электрона, при отдаче движется очень медленно и приобретает очень небольшую кинетическую энергию.) В действительности,

тщательные измерения показали, что лишь небольшое число  $\beta$ -частиц обладает кинетической энергией, близкой к этому вычисленному значению; подавляющее большинство испущенных электронов имеет несколько меньшую энергию. Было установлено, что энергия испускаемого электрона может принимать любые значения от нуля до вычисленного выше максимального значения. Это происходит во всех  $\beta$ -распадах. Все выглядело так, как если бы нарушался закон сохранения энергии! Как показали тщательно проведенные эксперименты, импульс и момент импульса также не сохраняются при  $\beta$ -распаде. Физиков встревожила перспектива отказа от законов сохранения, которые так хорошо зарекомендовали себя во всех предыдущих случаях. В 1930 г. Вольфганг Паули предложил выход из создавшегося положения: он высказал гипотезу о том, что при  $\beta$ -распаде помимо электрона испускается еще одна частица, которую очень трудно обнаружить. Гипотетическая частица могла уносить энергию, импульс и момент импульса, что обеспечивало выполнение законов сохранения. Новая частица была названа **нейтрино** (т.е. маленькая нейтральная) выдающимся итальянским физиком Энрико Ферми (1901–1954), разработавшим в 1934 г. детальную теорию  $\beta$ -распада. (Именно в этой теории Ферми постулировал существование четвертого фундаментального взаимодействия, которое получило название «слабое взаимодействие».) Нейтрино имело нулевой заряд и, по-видимому, нулевую массу покоя, хотя по последним данным не исключено, что масса покоя мала, но отлична от нуля. Если масса покоя нейтрино равна нулю, то эта частица очень напоминает по своим свойствам фотон: она нейтральна и движется со скоростью света (или почти со скоростью света, если масса покоя нейтрино отлична от нуля), но обнаружить нейтрино гораздо труднее. В 1956 г. с помощью сложных экспериментов существование нейтрино было подтверждено; но к тому времени у большинства физиков это не вызывало сомнения.

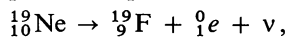
Нейтрино принято обозначать греческой буквой «ню» ( $\bar{\nu}$ ). С учетом нейтрино  $\beta$ -распад ядра углерода  $^{14}_6\text{C}$  запишется в виде



Черта над символом нейтрино означает, что речь идет об «антинейтрино». (Подробнее об античастицах мы расскажем позднее; почему среди продуктов  $\beta$ -распада фигурирует не нейтрино, а антинейтрино, сейчас не важно – это обсуждается в гл. 43.)

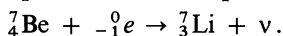
Многие изотопы распадаются с испусканием электрона. Все они обладают избытком нейтронов по сравнению с числом протонов. На графике, представленном на рис. 42.2, эти изотопы расположены над стабильными изотопами. А что можно сказать о нестабильных изотопах с дефицитом нейтронов по сравнению с числом

протонов, которые на рис. 42.2 расположены ниже стабильных изотопов? Эти изотопы в свою очередь претерпевают распад с испусканием не электрона, а **позитрона**. Позитрон (обозначаемый  $e^+$ - или  $\beta^+$ -частица) имеет такую же массу, как и электрон, но положительный заряд равен  $+1e$ . Так как по всем свойствам, кроме заряда, позитрон тождествен электрону, он называется *античастицей* электрона<sup>1)</sup>. Примером  $\beta^+$ -распада может служить распад ядра неона  ${}_{10}^{19}\text{Ne}$ :



где  ${}_1^0e$  обозначает позитрон ( $e^+$ ). (Обратите внимание на то, что при  $\beta^+$ -распаде испускается нейтрино, тогда как при  $\beta^-$ -распаде – антинейтрино. Таким образом, вместе с нейтрино испускается антиэлектрон (или позитрон), а вместе с антинейтрино – электрон. Подробнее об античастицах см. гл. 43.)

Наряду с испусканием  $\beta^-$ - и  $\beta^+$ -частиц существует и третий процесс того же типа. Он называется *захватом электрона* и состоит в поглощении ядром одного из орбитальных электронов. Например, ядро бериллия  ${}_{4}^7\text{Be}$  при захвате электрона превращается в ядро лития  ${}_{3}^7\text{Li}$ :



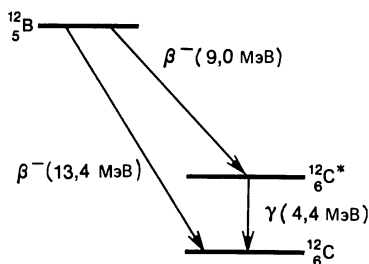
Обычно захват электрона происходит с самой внутренней *K*-оболочки, отсюда и название процесса «*K*-захват». При *K*-захвате исчезает один электрон, в ядре один протон превращается в нейтрон и испускается нейтрино. Экспериментально *K*-захват регистрируется косвенным путем – по рентгеновскому излучению соответствующей длины волны (которое возникает при заполнении электронами вакантного в результате *K*-захвата состояния).

В  $\beta$ -распаде решающую роль играет слабое взаимодействие. Уникальная особенность нейтрино заключается в том, что оно взаимодействует с веществом только благодаря слабому взаимодействию, что существенно затрудняет его регистрацию.

## 42.6. Гамма-распад

Гамма-излучение представляет собой фотоны очень высокой энергии. Распад ядра с испусканием  $\gamma$ -излучения во многом напоминает испускание фотонов возбужденными атомами. Подобно атому, ядро может находиться в возбужденном состоянии. При переходе в состояние с более низкой энергией, или основное состояние, ядро испускает фотон. Разрешенные энергетические уровни яд-

<sup>1)</sup> Подробнее об античастицах см. гл. 43. Кратко античастицу можно определить как частицу, имеющую такую же массу, как и частица, но противоположный ей заряд.



**Рис. 42.4.** Схема уровней энергии, показывающая, что ядро  $^{12}_5\text{B}$  при  $\beta^-$ -распаде может переходить в основное состояние ядра  $^{12}_6\text{C}$  (при этом выделяется полная энергия 13,4 МэВ) или в возбужденное состояние (отмеченное знаком \*) ядра  $^{12}_6\text{C}$  с последующим распадом в его основное состояние с испусканием  $\gamma$ -лучей с энергией 4,4 МэВ.

ра разнесены по энергии значительно сильнее, чем энергетические уровни атома: расстояние между соседними уровнями в ядре имеет порядок  $10^3$  или  $10^6$  эВ по сравнению с несколькими электрон-вольт в случае энергетических уровней атома. Следовательно, энергии испускаемых фотонов могут изменяться от нескольких килоэлектрон-вольт до нескольких мегаэлектрон-вольт. Отвечающее данному распаду  $\gamma$ -излучение имеет всегда одну и ту же энергию. Так как  $\gamma$ -излучение не несет заряда, при  $\gamma$ -распаде не происходит превращения одного химического элемента в другой.

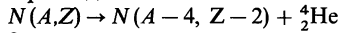
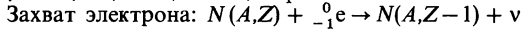
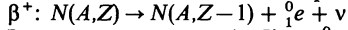
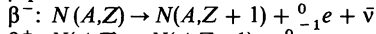
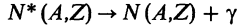
Каким образом атомное ядро переходит в возбужденное состояние? Это может произойти в результате неупругого столкновения с другой частицей. Дочернее ядро, возникающее в результате радиоактивного распада, довольно часто образуется в возбужденном состоянии. Типичный пример показан на схеме уровней энергии, изображенной на рис. 42.4. Ядро бора  $^{12}_5\text{B}$  в результате  $\beta^-$ -распада может перейти либо непосредственно в основное состояние ядра  $^{12}_6\text{C}$ , либо в возбужденное состояние ядра  $^{12}_6\text{C}$  с последующим переходом в основное состояние с испусканием  $\gamma$ -излучения с энергией 4,4 МэВ<sup>1)</sup>.

Иногда ядро в течение некоторого промежутка времени остается в возбужденном состоянии, прежде чем испускает  $\gamma$ -излучение (как на рис. 42.4). В этом случае говорят, что ядро находится в *метастабильном состоянии*, а само ядро называется *изомером*.

## 42.7. Сохранение числа нуклонов и другие законы сохранения

При радиоактивном распаде всех трех видов выполняются классические законы сохранения. Энергия, импульс, момент импульса и электрический заряд сохраняются, т. е. эти величины после распада остаются такими же, как до распада. Установлен и еще один закон сохранения. Это **закон сохранения числа нуклонов**. Согласно этому закону, полное число нуклонов ( $A$ ) остается неизменным при любом радиоактивном распаде, хотя нуклоны одного вида могут превращаться в нуклоны другого вида (протоны — в нейтроны или наоборот). Закон сохранения числа нуклонов выполняется при радиоактивном распаде всех трех видов. Общие схемы  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -распада приведены в табл. 42.2.

<sup>1)</sup> Возбужденное ядро иногда переходит в основное состояние в результате другого процесса, называемого *внутренней конверсией*. В таком процессе возбужденное ядро взаимодействует с одним из орбитальных электронов и выбивает его из атома с кинетической энергией, которую имело бы  $\gamma$ -излучение при переходе ядра из возбужденного состояния в основное.

Таблица 42.2. Три вида радиоактивного распада<sup>1)</sup> $\alpha$ -распад $\beta^-$ -распад $\gamma$ -распад

<sup>1)</sup>  $N(A, Z)$  означает ядро с атомным номером  $Z$  и массовым числом  $A$ ; \* означает возбужденное состояние ядра.

## 42.8. Скорость распада и период полураспада

Макроскопический образец любого радиоактивного изотопа содержит огромное число радиоактивных ядер. Эти ядра распадаются не одновременно, а на протяжении некоторого времени. Процесс распада является случайным процессом: мы не можем точно предсказать, когда произойдет распад данного ядра. Но мы можем, используя теорию вероятностей, приблизительно предсказать, сколько ядер образца распадется за данный промежуток времени.

Число распадов  $\Delta N$ , происходящих за очень короткий промежуток времени  $\Delta t$ , пропорционально  $\Delta t$  и полному числу радиоактивных ядер  $N$ :

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t. \quad (42.2)$$

Коэффициент пропорциональности  $\lambda$  в этом уравнении называется **постоянной распада**. Эта постоянная различна у разных изотопов. Чем больше  $\lambda$ , тем выше скорость распада и активность изотопа. Величина  $\Delta N$  в уравнении (42.2) равна числу распадов, происходящих за короткий промежуток времени  $\Delta t$ ; мы обозначили эту величину  $\Delta N$ , так как каждый распад соответствует уменьшению числа имеющихся в наличии ядер  $N$  на единицу. Иначе говоря, радиоактивный распад – «однократный» процесс (рис. 42.5): после распада материнского ядра и его превращения в дочернее ядро повторный распад невозможен. Знак минус в соотношении (42.2) указывает на то, что  $N$  уменьшается.

Если в соотношении (42.2) перейти к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$ , то величина  $\Delta N$  будет мала по сравнению с  $N$ , и мы можем записать уравнение в дифференциальной форме

$$dN = -\lambda N dt. \quad (42.3)$$

Преобразовав это уравнение к виду

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt,$$

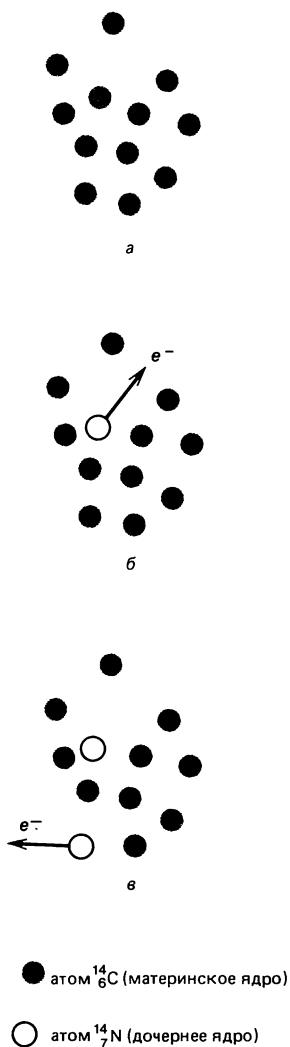


Рис. 42.5. Радиоактивные ядра распадаются по одному. Число материнских ядер в образце постоянно убывает. Испуская электрон, ядро  $^{14}_6\text{C}$  превращается в ядро  $^{14}_7\text{N}$ .

мы сможем найти  $N$  как функцию времени  $t$ . Для этого проинтегрируем уравнение от  $t = 0$  до  $t = t$ :

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_0^t \lambda dt,$$

где  $N_0$  — число материнских ядер при  $t = 0$ , а  $N$  — число ядер, оставшихся к моменту времени  $t$ . Интегрируя, получаем

$$\ln \frac{N}{N_0} = - \lambda t,$$

или

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (42.4)$$

Соотношение (42.4) называется **законом радиоактивного распада**. Оно показывает, что число радиоактивных ядер в данном образце экспоненциально убывает со временем. На рис. 42.6, а эта зависимость изображена для ядер  $^{14}_6\text{C}$  с постоянной распада  $\lambda = 3,8 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-1}$ .

Скорость распада, или число распадов в секунду, в чистом образце равна

$$\frac{dN}{dt}.$$

Эта величина называется также *активностью* данного образца. Из соотношений (42.3) и (42.4) следует, что

$$\frac{dN}{dt} = - \lambda N = - \lambda N_0 e^{-\lambda t}.$$

При  $t = 0$  активность равна

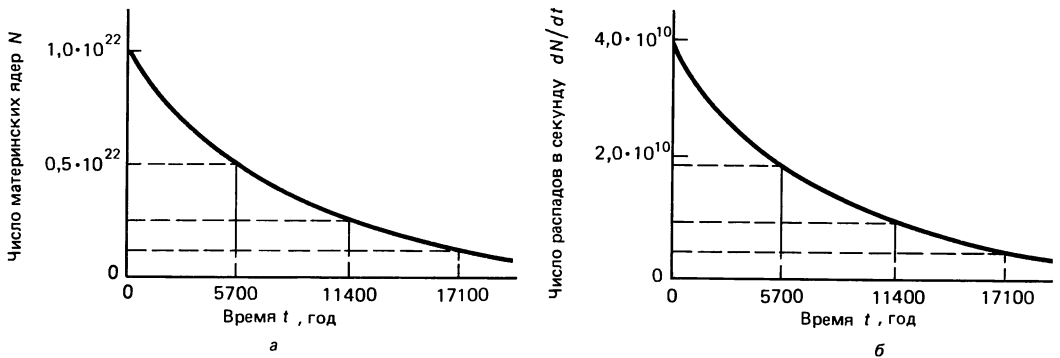
$$\left( \frac{dN}{dt} \right)_0 = - \lambda N_0,$$

поэтому

$$\frac{dN}{dt} = \left( \frac{dN}{dt} \right)_0 e^{-\lambda t}. \quad (42.5)$$

Таким образом, активность также экспоненциально убывает со временем с той же скоростью, что и число радиоактивных ядер  $N$  (рис. 42.6, б).

Скорость распада любого изотопа часто характеризуют не постоянной распада  $\lambda$ , а его периодом полураспада. **Периодом полураспада** изотопа называется промежуток времени, за который распадается половина исходного количества изотопа в данном образце. Например, период полураспада изотопа  $^{14}_6\text{C}$  составляет примерно 5730 лет. Если в какой-то момент времени кусок окаменевшего дерева содержит  $1,00 \cdot 10^{22}$  ядер  $^{14}_6\text{C}$ , то через 5700 лет он будет содержать только  $0,50 \cdot 10^{22}$  ядер. Еще через 5700 лет в том же куске дерева останется только  $0,25 \cdot 10^{22}$  ядер и т. д. Это убывание числа ядер показано на рис. 42.6, а. Так как скорость распада  $dN/dt$  пропорциональна  $N$ , то



**Рис. 42.6.** *а*—число материнских ядер  $N$  в выбранном образце  $^{14}_6\text{C}$  убывает экспоненциально; *б*—число распадов в секунду также убывает экспоненциально. Период полураспада для  $^{14}_6\text{C}$  составляет около 5700 лет. Это означает, что каждые 5700 лет число материнских ядер  $N$  и скорость распада  $dN/dt$  убывают наполовину.

$dN/dt$  также убывает вдвое на протяжении каждого периода полураспада (рис. 42.6, *б*).

Периоды полураспада известных радиоактивных изотопов изменяются в диапазоне от  $10^{-22}$  до  $10^{28}$  с (около  $10^{21}$  лет). Периоды полураспада многих изотопов приведены в приложении Г. Нетрудно видеть, что период полураспада (который мы обозначим  $T_{1/2}$ ) обратно пропорционален постоянной распада. Чем больше период полураспада изотопа, тем медленнее распадается данный изотоп и тем меньше  $\lambda$ . Точная зависимость может быть получена из соотношения (42.4), если положить  $N = N_0/2$  при  $t = T_{1/2}$ :

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}},$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (42.6)$$

**Пример 42.4.** Период полураспада изотопа  $^{14}_6\text{C}$  составляет 5730 лет. В какой-то момент времени образец содержит  $1,0 \times 10^{22}$  ядер углерода-14. Чему равна активность образца?

**Решение.** Вычислим прежде всего постоянную распада  $\lambda$ . Из формулы (42.6) получаем

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{(5730 \text{ лет})(3,15 \cdot 10^7 \text{ с/год})} = 3,84 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-1},$$

так как продолжительность года составляет  $(60)(60)(24)(365) = 3,15 \cdot 10^7$  с. По формуле (42.3) активность, или скорость распада (знак минус мы опускаем), равна

$$\frac{dN}{dt} = \lambda N = (3,84 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-1})(1,0 \cdot 10^{22}) = 3,8 \cdot 10^{10} \text{ расп./с.}$$

Обратите внимание на то, что график на рис. 42.6, *б* начинается с этого значения, соответствующего начальному значению  $N = 1,0 \cdot 10^{22}$  ядер на рис. 42.6, *а*.

**Пример 42.5.** В лаборатории имеется 1,49 мкг чистого  $^{13}_7\text{N}$  с периодом полураспада 10,0 мин. *а*) Сколько ядер  $^{13}_7\text{N}$  содержалось первоначально в образце? *б*) Чему равна начальная активность? *в*) Чему равна активность через 1,00 ч? *г*) Через какое время (примерно) активность упадет менее чем до одного распада в секунду?

**Решение.** *а*) Так как атомная масса изотопа  $^{13}_7\text{N}$  равна 13, то 13 г его содержат  $6,02 \cdot 10^{23}$  ядер (число Авогадро). Масса лабораторного образца составляет всего лишь  $1,49 \cdot 10^{-6}$  г, поэтому число ядер азота-13 в нем определяется пропор-



цией

$$\frac{N}{6,02 \cdot 10^{23}} = \frac{1,49 \cdot 10^{-6} \text{ г}}{13,0 \text{ г}},$$

т. е.  $N = 6,90 \cdot 10^{16}$  ядер.

б) Из формулы (42.6) получаем  $\lambda = (0,693)/(600 \text{ с}) = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Следовательно, при  $t = 0$

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_0 = \lambda N = 8,00 \cdot 10^{13} \text{ расп./с.}$$

в) Через  $1,00 \text{ ч} = 3600 \text{ с}$  активность понизится до

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= \left(\frac{dN}{dt}\right)_0 e^{-\lambda t} = \\ &= (8,00 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}) e^{-(1,16 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1})(3600 \text{ с})} = \\ &= 1,23 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}. \end{aligned}$$

Тот же результат можно получить иначе: так как  $1,00 \text{ ч}$  соответствует шести пе-

риодам полураспада ( $6 \cdot 10,0 \text{ мин}$ ), активность понизится до  $(1/2)(1/2)(1/2)(1/2) \times (1/2)(1/2) = (1/2)^6 = 1/64$  ее начального значения, или  $(800 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1})/64 = 1,25 \times 10^{12} \text{ с}^{-1}$ . [Расхождение между результатами возникает из-за ошибок округления (мы удерживаем только три значащие цифры).]

г) Определим время  $t$ , по истечении которого

$$\frac{dN}{dt} = 1,00 \text{ с}^{-1}.$$

Из соотношения (42.5) имеем

$$e^{-\lambda t} = \frac{1,00 \text{ с}^{-1}}{8,00 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}} = 1,25 \cdot 10^{-14}.$$

Следовательно,

$$t = -\frac{\ln(1,25 \cdot 10^{-14})}{\lambda} = 2,76 \cdot 10^4 \text{ с},$$

или  $7,66 \text{ ч}$ .

## 42.9. Стабильность и туннельный эффект

Мы видели, что радиоактивный распад происходит только в том случае, когда масса материнского ядра больше суммы масс дочернего ядра и всех испускаемых частиц. Так как системы стремятся перейти в состояние с меньшей внутренней или потенциальной энергией (шарик скатывается вниз, положительный заряд движется к отрицательному), вас может удивить, почему нестабильное ядро сразу не распадается. Иначе говоря, почему  ${}_{92}^{238}\text{U}$  ( $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$  лет) и другие изотопы имеют столь большие периоды полураспада?

Ответ на этот вопрос имеет отношение к квантовой механике и природе ядерных сил. Проанализировать ситуацию поможет график потенциальной энергии (рис. 42.7). Рассмотрим распад:  ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$ . Кривая изображает потенциальную энергию (с учетом массы покоя). Проще всего считать, что  $\alpha$ -частица самостоятельно существует внутри ядра  ${}_{92}^{238}\text{U}$ . Тогда кривую, изображенную на рис. 42.7, можно интерпретировать как энергию  $\alpha$ -частицы внутри ядра урана (точка A) и вне его (точка C). Чтобы попасть из точки A в точку C,  $\alpha$ -частица должна преодолеть барьер. В классической физике для этого  $\alpha$ -частица должна приобрести дополнительную энергию, равную высоте барьера над точкой A.

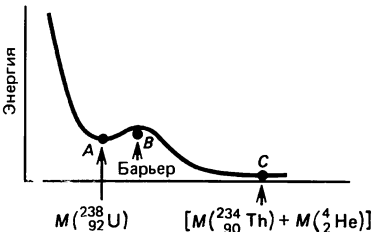


Рис. 42.7. Потенциальный барьер для распада  ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$ .

Согласно квантовой механике, ядра могут самопроизвольно распадаться без подвода дополнительной энергии

за счет проникновения сквозь барьер. Этот процесс получил название **туннельного эффекта**. С точки зрения классической физики туннельный переход невозможен, так как для  $\alpha$ -частицы в точке  $B$  происходило бы (внутри барьера) нарушение закона сохранения энергии. Однако согласно принципу неопределенности нарушение закона сохранения энергии на величину  $\Delta E$  возможно на протяжении промежутка времени  $\Delta t$ , удовлетворяющего соотношению  $(\Delta E)(\Delta t) \approx h/2\pi$ .

Таким образом, квантовая механика допускает кратковременное нарушение закона сохранения энергии, однако продолжительность этих промежутков времени может оказаться достаточной для проникновения  $\alpha$ -частицы сквозь барьер. Чем барьер выше и шире, тем меньше у  $\alpha$ -частицы времени для вылета из ядра и тем меньше вероятность такого процесса. Поэтому от высоты и ширины потенциального барьера зависят скорость распада и период полураспада изотопа.

## \* 42.10. Радиоактивное датирование

Радиоактивность имеет много интересных применений. К их числу относится метод *радиоактивного датирования*, позволяющий определять возраст древних материалов.

Возраст любого предмета, изготовленного из некогда живой ткани, например из дерева, можно определить по естественной радиоактивности изотопа углерода  $^{14}_6\text{C}$ . Все растения поглощают из воздуха двуокись углерода  $\text{CO}_2$ , ассимилируют углерод и выделяют кислород. Большинство атомов углерода – это изотоп  $^{12}_6\text{C}$ , а небольшая доля (около  $1,3 \cdot 10^{-12}$ ) – радиоактивный изотоп  $^{14}_6\text{C}$ . Отношение числа атомов  $^{14}_6\text{C}$  к числу атомов  $^{12}_6\text{C}$  в атмосфере на протяжении многих тысячелетий остается примерно постоянным, несмотря на то что изотоп  $^{14}_6\text{C}$  распадается с периодом полураспада около 5700 лет. Баланс изотопов углерода поддерживается нейтронами космического лучей, проникающих на Землю из космического пространства. При столкновении с ядрами азота эти нейтроны вызывают превращение  $n + ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{14}_6\text{C} + p$ . Нейтрон сталкивается с ядром азота  $^{14}_7\text{N}$  и поглощается им; в результате испускается протон и образуется ядро  $^{14}_6\text{C}$ . Непрерывное образование изотопа  $^{14}_6\text{C}$  в атмосфере в основном компенсирует его убыль за счет радиоактивного распада. Пока растение или дерево живет, оно постоянно восстанавливает углерод из двуоксида углерода и использует его в новых тканях и для замены старых. Животные поедают растения и поэтому также постоянно получают свежие порции углерода для своих тканей. Организмы не отли-

чают изотоп  $^{14}_6\text{C}$  от изотопа  $^{12}_6\text{C}$ <sup>1)</sup>, а так как отношение содержания изотопов  $^{14}_6\text{C}$  к  $^{12}_6\text{C}$  в атмосфере остается примерно постоянным, их относительное содержание в живом организме также примерно постоянно. После того как организм погибает, он перестает поглощать и утилизировать двуокись углерода, а так как изотоп  $^{14}_6\text{C}$  распадается, отношение содержания изотопов  $^{14}_6\text{C}$  к  $^{12}_6\text{C}$  в мертвом организме со временем убывает. Период полураспада изотопа  $^{14}_6\text{C}$  составляет примерно 5700 лет, поэтому отношение  $^{14}_6\text{C}/^{12}_6\text{C}$  убывает вдвое каждые 5700 лет. Если отношение  $^{14}_6\text{C}/^{12}_6\text{C}$  для древнего деревянного орудия составляет половину значения этого отношения в живом дереве, то орудие могло быть изготовлено из дерева, срубленного примерно 5700 лет назад. В действительности при датировании с помощью радиоуглеродного метода необходимо вводить поправки, учитывающие, что отношение  $^{14}_6\text{C}/^{12}_6\text{C}$  в атмосфере не остается строго постоянным. Определение этого отношения для различных исторических периодов было проведено путем сравнения ожидаемых значений с истинными для предметов, возраст которых точно известен (например, для деревьев, возраст которых устанавливается по годичным кольцам).

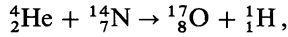
Радиоуглеродное датирование пригодно лишь для установления возраста предметов «не старше» 40 000 лет. Количество изотопа  $^{14}_6\text{C}$  в более старых предметах обычно слишком мало и не поддается точному измерению. Для датирования более старых предметов можно использовать радиоактивные изотопы с большим периодом полураспада. Например, изотоп урана  $^{238}_{92}\text{U}$  с периодом полураспада  $4,5 \cdot 10^9$  лет полезен для датирования возраста пород по геологической шкале.

## 42.11. Ядерные реакции и превращение элементов

При  $\alpha$ - или  $\beta$ -распаде дочернее ядро принадлежит химическому элементу, отличному от материнского. Превращение одного химического элемента в другой, называемое *трансмутацией*, происходит и в результате ядерных реакций. Мы говорим, что происходит **ядерная реакция**, если данное ядро сталкивается с другим ядром или какой-нибудь частицей (например,  $\gamma$ -квантом или нейтроном) и в результате между ними происходит взаимодействие. Первое сообщение о наблюдении ядерной реакции принадлежит Эрнесту Резерфорду. В 1919 г. он наблюдал, что при прохождении  $\alpha$ -частиц через газообразный азот некоторые частицы поглощались с испусканием протонов.

<sup>1)</sup> Организмы функционируют почти исключительно благодаря химическим реакциям, в которых участвуют только атомные электроны; лишние нейтроны в ядре изотопа практически не оказывают никакого эффекта.

Резерфорд пришел к выводу, что ядра азота превращаются в ядра кислорода в результате реакции



где  ${}^4_2\text{He}$  –  $\alpha$ -частица,  ${}^1_1\text{H}$  – протон. С тех пор наблюдалось множество ядерных реакций как в природе, так и в лабораторных условиях.

Уравнения ядерных реакций иногда записывают в сокращенном виде; например, реакцию  ${}_0^1n + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{H}$  записывают в виде  ${}^{14}_7\text{N}(n, p){}^{14}_6\text{C}$ . Символы химических элементов слева и справа от скобок указывают соответственно исходное и конечное ядра. Символы внутри скобок ( $n$  – нейтрон,  $p$  – протон) указывают налетающую или падающую (первый символ) и испускаемую (второй символ) частицы.

В любой ядерной реакции электрический заряд и число нуклонов сохраняются. Как показывает следующий пример, эти законы сохранения нередко оказываются весьма полезными.

**Пример 42.6.** В результате столкновения нейтрона с ядром  ${}^{16}_8\text{O}$  наблюдается испускание дейтерия. (*Дейтерием* называется изотоп водорода, содержащий один протон и один нейтрон,  ${}^2_1\text{H}$ .) Какое ядро возникает в результате реакции?

**Решение.** Столкновение приводит к реакции  ${}_0^1n + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow ? + {}^2_1\text{H}$ . Общее число нуклонов первоначально равно  $16 + 1 = 17$ , полный заряд  $8 + 0 = 8$ . Число ну-

клонов и заряд в правой части уравнения реакции должны иметь такие же значения. Следовательно, у образовавшегося в результате реакции ядра  $Z = 7$ ,  $A = 15$ . По периодической системе элементов находим, что  $Z = 7$  соответствует азоту. Таким образом, в результате реакции образовалось ядро азота  ${}^{15}_7\text{N}$ . Эту реакцию можно записать в виде  ${}^{16}_8\text{O}(n, d){}^{15}_7\text{N}$ , где  $d$  означает дейтерий  ${}^2_1\text{H}$ .

Энергия и импульс сохраняются в ядерных реакциях. Это обстоятельство полезно иметь в виду при решении вопроса о том, возможна ли данная ядерная реакция. Например, если суммарная масса продуктов реакции меньше суммарной массы исходных частиц, то реакция сопровождается выделением энергии – в виде кинетической энергии испускаемых частиц. Если же суммарная масса продуктов реакции больше суммарной массы исходных частиц, то реакция требует подвода энергии. Такая реакция происходит только при условии, что налетающая частица обладает достаточно большой кинетической энергией. Продемонстрируем это на следующем примере.

**Пример 42.7.** Может ли произойти реакция  ${}^{13}_6\text{C}(p, n){}^{13}_7\text{N}$  при бомбардировке ядра  ${}^{13}_6\text{C}$  протонами с энергией 2,0 МэВ?

**Решение.** Найдем массы ядер в положении Г. Суммарные массы до и после

реакции равны:

До реакции	После реакции
$m({}^{13}_6\text{C}) = 13,003355$	$m({}^{13}_7\text{N}) = 13,005739$
$m({}^1_1\text{H}) = 1,007825$	$m({}_0^1n) = 1,008665$

---

14,011180

14,014404

(Нам пришлось воспользоваться массой атома  ${}^1_1\text{H}$ , а не голого протона, так как массы атомов  ${}^{13}_6\text{C}$  и  ${}^{14}_7\text{N}$  включают в себя массы электронов, а число электронов в правой и левой частях уравнения реакции должно быть одинаковым, так как в ходе ядерной реакции электроны не рождаются и не уничтожаются.) Масса продуктов превышает массу исходных частиц на  $0,003224 \text{ а.е.м.} \cdot 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.} = 3,00 \text{ МэВ}$ . Следовательно, чтобы вызвать эту реакцию, необходима энергия; протоны с энергией  $2,0 \text{ МэВ}$  не могут инициировать такую реакцию. Следовательно, реакция не произойдет. Кинетическая энергия про-

тонов должна быть несколько больше  $3,00 \text{ МэВ}$ , чтобы реакция имела место:  $3,00 \text{ МэВ}$  достаточно для сохранения энергии, но протон с такой энергией привел бы к образованию ядра  ${}^{13}_7\text{N}$  и нейтрона  ${}^1_0\text{n}$  с нулевой кинетической энергией и, следовательно, нулевым импульсом. Так как импульс налетающего протона не равен нулю, нарушился бы закон сохранения импульса. Более сложные вычисления показывают, что для сохранения энергии и импульса минимальная энергия протона (называемая *пороговой энергией*) должна составлять в данном случае  $3,23 \text{ МэВ}$ . См. задачу 40.

Изучение искусственного превращения элементов испытало резкий подъем в 30-х годах нашего века, когда Энрико Ферми показал, что нейтроны наиболее эффективны для инициирования ядерных реакций, и в частности получения новых элементов. Так как нейтроны не имеют электрического заряда, они не отталкиваются положительными ядрами, как протоны или  $\alpha$ -частицы (которым приходится преодолевать так называемый кулоновский барьер). Следовательно, вероятность того, что нейтрон попадет в ядро и вызовет ядерную реакцию, гораздо выше, чем для заряженных частиц<sup>1)</sup>, особенно при низких энергиях. С 1934 по 1936 г. Ферми со своими сотрудниками в Риме получили много ранее неизвестных изотопов, бомбардируя различные элементы нейтронами. Ферми понял, что при бомбардировке нейтронами самого тяжелого из известных элементов — урана можно получить новые элементы с атомными номерами, большими, чем у урана. После нескольких лет упорной работы появились указания на то, что получены два новых элемента: нептуний ( $Z = 93$ ) и плутоний ( $Z = 94$ ). Окончательное подтверждение возможности получения этих «трансуранных» элементов было получено спустя несколько лет в Калифорнийском университете в Беркли. Соответствующие ядерные реакции приведены на рис. 42.8.

Вскоре обнаружилось, что при облучении урана Ферми в действительности наблюдал еще более необычный процесс, которому суждено было сыграть исключительно важную роль в судьбах всего мира.

В 1938 г. немецкие ученые Отто Ган и Фриц Штрассман сделали удивительное открытие. Вслед за работами Ферми они обнаружили, что при бомбардировке урана нейтронами иногда возникают ядра, примерно вдвое более

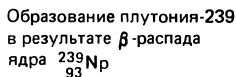
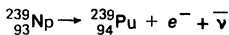
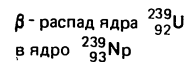
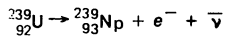
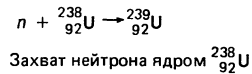


Рис. 42.8. Нептуний и плутоний образуются в серии реакций после бомбардировки  ${}^{238}_{92}\text{U}$  нейтронами.

## 42.12. Деление ядер

<sup>1)</sup> Мы имеем в виду положительно заряженные частицы. Электроны редко вызывают ядерные реакции, так как они не участвуют в сильном взаимодействии.

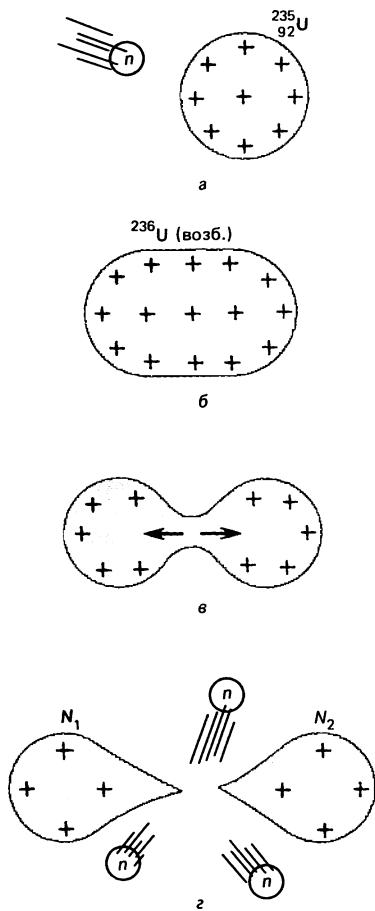
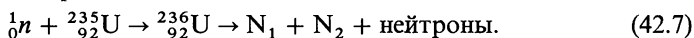


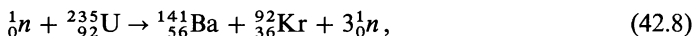
Рис. 42.9. Деление ядра  $^{235}_{92}\text{U}$  после захвата нейтрона.

легкие, чем исходное ядро урана. Эмигранты из нацистской Германии, работавшие в Скандинавии, — Лиза Мейтнер и Отто Фриш, быстро поняли, что происходило в этих экспериментах: ядро урана, поглотив нейтрон, распалось на две примерно равные части. Такое превращение выглядело весьма необычным, так как все известные ядерные реакции сопровождались вылетом из ядра лишь небольших осколков (например,  $n$ ,  $p$  или  $\alpha$ ).

Новое явление было названо **делением ядра** из-за сходства с делением клетки в биологии. Оказалось, что изотоп  $^{235}_{92}\text{U}$  делится легче, чем более распространенный изотоп  $^{238}_{92}\text{U}$ . Процесс деления можно наглядно изобразить, представив ядро урана в виде капли жидкости. Согласно этой **капельной модели** ядра, нейтрон при поглощении ядром  $^{235}_{92}\text{U}$  передает ему дополнительную внутреннюю энергию (подобно нагреву капли воды) (рис. 42,9, а). Образуется **промежуточное состояние**, или **составное ядро**  $^{236}_{92}\text{U}$  (напомним, что исходное ядро  $^{235}_{92}\text{U}$  поглотило один нейтрон). Избыточная энергия этого ядра (которое находится в возбужденном состоянии) приводит к более интенсивному движению отдельных нуклонов, в результате чего ядро приобретает удлинненную форму (рис. 42.9, б). Когда ядро принимает форму, изображенную на рис. 42.9, в, короткодействующее ядерное взаимодействие нуклонов ослабевает из-за возросшего расстояния между ними, а электростатическое отталкивание ослабевает лишь незначительно и становится доминирующим; в результате ядро расщепляется надвое. Образовавшиеся в результате этого процесса ядра  $N_1$  и  $N_2$  называются **осколками деления** (рис. 42.9, г). Деление ядра сопровождается испусканием (обычно двух или трех) нейтронов. Реакцию деления можно записать в виде



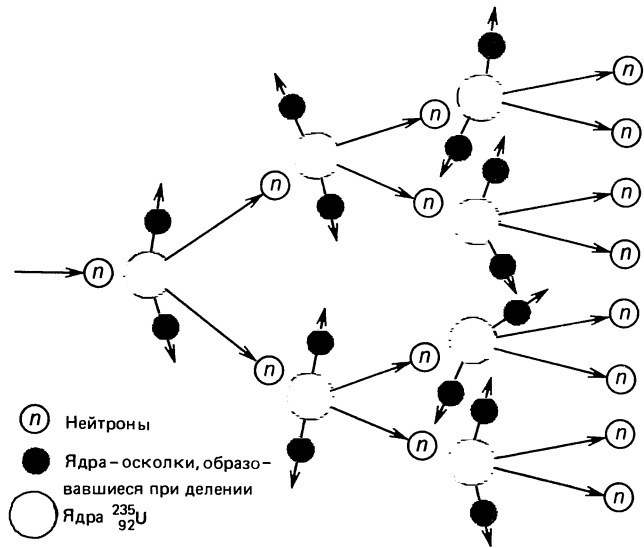
Промежуточное ядро  $^{236}_{92}\text{U}$  существует менее  $10^{-12}$  с, поэтому процесс деления протекает очень быстро. Масса каждого из осколков деления составляет примерно половину массы ядра урана, хотя массы осколков редко бывают одинаковыми. Типичной является реакция деления



хотя существует и немало других реакций.

В результате реакции деления высвобождается огромное количество энергии, так как масса ядра  $^{235}_{92}\text{U}$  значительно больше суммарной массы осколков деления. В этом нетрудно убедиться, если взглянуть на кривую удельной энергии связи (рис. 42.1): для урана удельная энергия связи (средняя энергия связи на один нуклон) составляет примерно 7,6 МэВ/нуклон, а у осколков деления с почти вдвое меньшей массой (в средней части графика  $A \approx 100$ ) удельная энергия связи составляет примерно 8,5 МэВ/нуклон. Так как осколки деления связаны

Рис. 42.10. Цепная реакция.



более прочно, они имеют меньшую массу. Разность масс (или энергий) между исходным ядром урана и осколками деления составляет примерно  $8,5 - 7,6 = 0,9$  МэВ на нуклон. Так как в каждом процессе деления участвует 236 нуклонов, выделяющаяся при делении ядра урана энергия равна  $0,9 \text{ МэВ/нуклон} (236 \text{ нуклонов}) \approx 200 \text{ МэВ}$ .

В ядерном масштабе это – огромное количество энергии. С практической точки зрения выделяющаяся в одном акте деления энергия ничтожно мала. Но если одновременно делится большое число ядер урана, то в макроскопических масштабах будет выделяться огромная энергия. Ряд физиков, включая и Ферми, поняли, что нейтроны, испускаемые в каждом акте деления, можно использовать для осуществления **цепной реакции**: один нейтрон первоначально вызывает деление одного ядра урана; два или три образовавшихся нейтрона вызовут дополнительные акты деления и т. д., так что процесс лавинообразно нарастает, как условно показано на рис. 42.10. Если бы удалось практически осуществить *самоподдерживающуюся цепную реакцию*, то можно было бы получать огромное количество энергии, выделяющейся в процессе деления. Ферми и его сотрудники в Чикагском университете доказали возможность такой реакции, построив в 1942 г. первый **ядерный реактор**.

При создании любого ядерного реактора приходится решать ряд проблем. Прежде всего вероятность поглощения нейтрона ядром  ${}_{92}^{235}\text{U}$  велика только для медленных нейтронов; нейтроны, испускаемые при делении и необходимые для поддержания цепной реакции, – это быстрые нейтроны. Для их замедления необходим материал, ко-

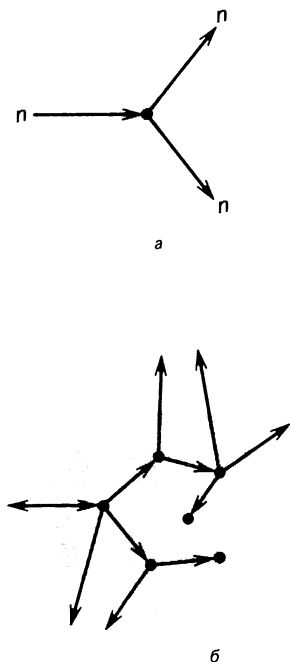


Рис. 42.11. Если масса урана превышает критическую (как в случае *б*), то становится возможной самоподдерживающаяся цепная реакция. Если масса урана меньше критической (как в случае *а*), то большинство нейтронов вылетает из образца до того, как происходят дополнительные деления, и цепная реакция затухает.

торый называется **замедлителем**. У наиболее эффективного замедлителя масса атомов должна как можно меньше отличаться от массы нейтронов, с тем чтобы потери энергии при столкновении были максимальными. (См. гл. 8, в частности пример 8.10.) Следовательно, наилучший замедлитель должен содержать атомы  ${}^1_1\text{H}$ . К сожалению, водород  ${}^1_1\text{H}$  поглощает нейтроны, однако *дейтерий*  ${}^2_1\text{H}$  поглощает нейтроны гораздо слабее и поэтому служит идеальным замедлителем. И водород  ${}^1_1\text{H}$ , и дейтерий  ${}^2_1\text{H}$  могут использоваться в реакторе в виде воды. Если в молекуле воды атомы водорода замещены атомами дейтерия, то такая вода называется *тяжелой*. Другим широко используемым замедлителем служит *графит*, состоящий из атомов углерода  ${}^{12}_6\text{C}$ .

Вторая проблема состоит в том, что возникающие при делении нейтроны могут поглощаться другими ядрами и вызывать иные ядерные реакции, а не дальнейшее деление. В реакторе на «легкой» воде нейтроны поглощаются ядрами  ${}^1_1\text{H}$  наряду с ядрами  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , которые в результате реакции  $n + {}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{239}_{92}\text{U} + \gamma$  превращаются в ядра  ${}^{239}_{92}\text{U}$ . Природный уран содержит 99,3% изотопа  ${}^{238}_{92}\text{U}$  и только 0,7% делящегося изотопа  ${}^{235}_{92}\text{U}$ . Чтобы повысить вероятность деления ядер  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , природный уран **обогащают**<sup>1)</sup> с целью повысить процентное содержание изотопа  ${}^{235}_{92}\text{U}$ . Для этого применяют диффузию или центрифугирование.

Третья проблема состоит в том, что часть нейтронов вылетает из активной зоны реактора, не успев вызвать дальнейшее деление (рис. 42.11). Поэтому для того, чтобы происходила самоподдерживающаяся цепная реакция, масса ядерного горючего должна быть достаточно большой. Минимальная масса урана, необходимая для возникновения самоподдерживающейся цепной реакции, называется **критической массой**. Величина критической массы зависит от замедлителя, вида горючего (вместо  ${}^{235}_{92}\text{U}$  может использоваться<sup>2)</sup>  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ ), степени его обогащения. Характерные значения составляют несколько килограммов (т. е. не граммы и не тысячи килограммов).

Для самоподдерживающейся цепной реакции в среднем по крайней мере один нейтрон, возникающий в каждом акте деления, должен вызвать деление одного ядра на следующем этапе. Среднее число нейтронов в каждом акте деления, вызывающих деление других ядер, называется **коэффициентом размножения нейтронов  $k$** . Для самоподдерживающейся цепной реакции должно вы-

<sup>1)</sup> Необходимость в обогащении урана обычно отпадает в случае реакторов на тяжелой воде.

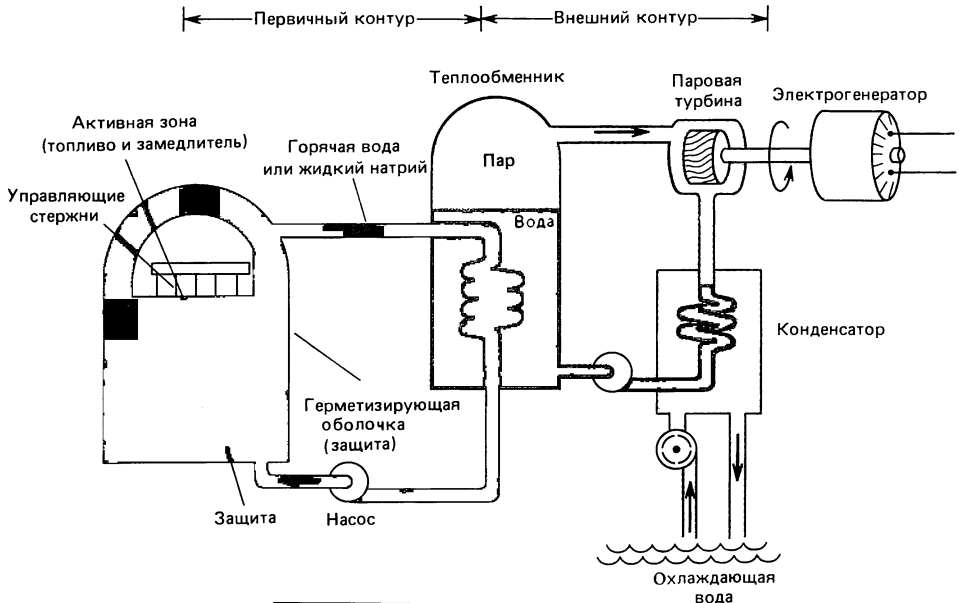
<sup>2)</sup>  ${}^{238}_{92}\text{U}$  также делится, но только быстрыми нейтронами ( ${}^{238}_{92}\text{U}$  более стабилен, чем  ${}^{235}_{92}\text{U}$ ). Для инициирования самоподдерживающейся цепной реакции вероятность поглощения быстрого нейтрона с последующим делением слишком мала.



полняться неравенство  $f \geq 1$ . При  $f < 1$  реактор называется *подкритическим*, при  $f > 1$  — *надкритическим*. В реакторах имеются подвижные *управляющие стержни* (обычно из кадмия), назначение которых состоит в том, чтобы поглощать нейтроны и поддерживать реактор в едва «критическом» состоянии с  $f = 1$ <sup>1)</sup>. Схема типичного энергетического ядерного реактора изображена на рис. 42.12. Энергия деления выделяется в виде тепла, которое используется для получения пара, вращающего турбину, которая соединена с электрогенератором.

Разница между ядерным реактором и атомной бомбой заключается в скорости высвобождения энергии: в реакторе коэффициент размножения нейтронов поддерживается близким к единице, тогда как в атомной бомбе этот коэффициент несколько превышает единицу, отчего цепная реакция развивается очень быстро и происходит взрыв. Чтобы произвести взрыв, достаточно сблизить две подкритические массы и образовать в момент детонации надкритическую массу. При взрыве ядерной бомбы не только выделяется огромное количество энергии, но и возникает интенсивная радиация, наносящая сильные поражения. Источниками ее являются осколки деления, у которых, как и у материнских ядер урана и плутония,

**Рис. 42.12.** Ядерный реактор. Тепло, выделяющееся в результате процесса деления в тепловыделяющих стержнях, отводится горячей водой или жидким натрием и используется для образования пара в теплообменнике. Пар вращает турбину, вырабатывающую электроэнергию, а затем охлаждается в конденсаторе.



<sup>1)</sup> Образование нейтронов и последующие деления происходят так быстро, что манипулировать управляющими стержнями для поддержания  $f = 1$  было бы невозможно, если бы не одно счастливое обстоятельство. Дело в том, что небольшой процент высвобождающихся нейтронов «запаздывает». Эти нейтроны образуются при распаде богатых нейтронами осколков деления (или их дочерних ядер) с временами жизни порядка секунд, что обеспечивает достаточное время для поддержания  $f = 1$ .

примерно на 50% больше нейтронов, чем протонов. Ядра с атомными номерами, характерными для осколков деления ( $Z$  от 30 до 60), стабильны, только когда числа протонов и нейтронов в них примерно равны (рис. 42.2). Поэтому осколки деления с большим избытком нейтронов чрезвычайно нестабильны и распадаются. При ядерных взрывах в атмосфере радиоактивные загрязнения носят характер *радиоактивных выпадений*. Такие же осколки деления образуются и в энергетическом ядерном реакторе. От этих радиоактивных отходов затем приходится избавляться.

### 42.13. Ядерный синтез

Масса любого стабильного ядра меньше суммы масс составляющих его протонов и нейтронов. Например, масса изотопа гелия  ${}^4_2\text{He}$  меньше суммы масс двух протонов и двух нейтронов. Следовательно, если два протона и два нейтрона привести в соприкосновение, чтобы образовалось ядро гелия, то это сопровождалось бы уменьшением массы. Уменьшение массы проявляется в выделении огромного количества энергии. Образование ядер в процессе слияния отдельных протонов и нейтронов или легких ядер называется **ядерным синтезом**. При взгляде на рис. 42.1 становится ясно, что легкие ядра могут сливаться в более сложное ядро с выделением энергии: такой процесс возможен потому, что удельная энергия связи (средняя энергия связи на один нуклон) у легких ядер меньше, чем у промежуточных ядер ( $A$  от 50 до 100). Согласно современным представлениям, все химические элементы в природе первоначально образовались в ходе ядерного синтеза. Ныне ядерный синтез происходит в недрах звезд, в том числе и нашего Солнца. Именно этот процесс и служит источником испускаемого ими мощного светового излучения.

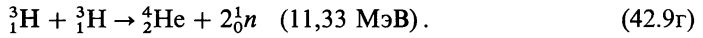
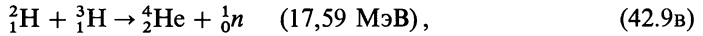
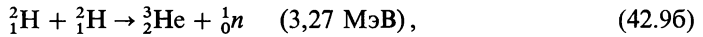
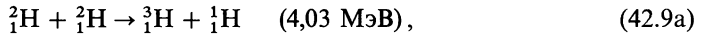
**Пример 42.8.** Одна из простейших реакций ядерного синтеза – образование дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  из нейтрона и протона:  ${}^1_0\text{n} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{H} + \gamma$ . Какая энергия выделяется в этой реакции?

**Решение.** Из приложения Г находим, что суммарная масса покоя исходных

частиц равна  $1,007825 \text{ а. е. м.} + 1,008665 \text{ а. е. м.} = 2,016490 \text{ а. е. м.}$  Масса продуктов реакции равна массе дейтерия  ${}^2_1\text{H}$ , т. е.  $2,014102 \text{ а. е. м.}$  Следовательно, при синтезе дейтерия выделяется энергия  $(0,002388 \text{ а. е. м.}) (931,5 \text{ МэВ/а. е. м.}) = 2,22 \text{ МэВ}$ . Ее уносят ядро дейтерия и  $\gamma$ -квант.

Возможность использования энергии ядерного синтеза и создания термоядерного реактора весьма заманчива, но до сих пор проблема построения термоядерного реактора до конца не решена. Наиболее вероятно осуществление термоядерного реактора на следующих реакциях синтеза с участием изотопов водорода  ${}^2_1\text{H}$  (дейтерий) и  ${}^3_1\text{H}$  (тритий)

(в скобках указано энергосвободное):



Энергия, выделяющаяся в реакции ядерного синтеза в расчете на данную массу горючего, больше, чем при делении ядра. Кроме того, при ядерном синтезе не столь остра проблема захоронения радиоактивных отходов. В качестве горючего термоядерного реактора можно использовать дейтерий, в изобилии встречающийся в воде океанов (распространенность  ${}^2_1\text{H}$  составляет 0,015%, или около 1 г дейтерия на 60 л воды).

К сожалению, на пути создания надежно действующего термоядерного реактора все еще стоят значительные трудности. Они обусловлены тем, что все ядра имеют положительный заряд и поэтому отталкивают друг друга. Если их сблизить настолько, чтобы в игру вступило сильное взаимодействие, то оно может обеспечить дальнейшее сближение ядер, и тогда произойдет ядерный синтез. Чтобы ядра могли сблизиться, они должны обладать очень высокими скоростями. Так как большие скорости соответствуют высокой температуре, для осуществления ядерного синтеза необходимы очень высокие температуры. Именно поэтому реакторы, в которых происходит ядерный синтез, называют *термоядерными установками*. Температура Солнца и других звезд очень высока, порядка многих миллионов кельвинов; поэтому ядра движутся достаточно быстро для того, чтобы мог произойти ядерный синтез, а высвобождающаяся энергия поддерживает высокую температуру и тем самым создает условия для непрерывного продолжения ядерного синтеза. Солнце и звезды представляют собой самоподдерживающиеся термоядерные реакторы, но в земных условиях достичь столь высоких температур в управляемой термоядерной установке весьма сложно.

После второй мировой войны стало ясно, что при взрыве атомной бомбы развиваются температуры около  $10^8$  К. Возникла идея использовать атомную бомбу в качестве запала бомбы другого типа, основанной на использовании гигантской энергии ядерного синтеза, — термоядерной, или водородной, бомбы. Получить неуправляемое выделение колоссальных количеств энергии при взрыве водородной бомбы оказалось достаточно просто. Однако осуществить медленный управляемый отвод энергии, высвобождающейся при ядерном синтезе, оказалось весьма сложной проблемой. Необходимых для ядерного синтеза высоких температур можно достичь накачкой энергии, например, с помощью мощных лазеров. Реальная трудность состоит в необходимости удержания

жать ядра достаточно долго для того, чтобы успело произойти достаточное количество реакций и выделилась достаточная энергия. При температурах, необходимых для ядерного синтеза (около  $10^8$  К), атомы ионизованы. Возникающая при этом среда состоит из ядер и электронов и называется **плазмой**. Обычные материалы испаряются при температуре в лучшем случае несколько тысяч кельвинов и, следовательно, не пригодны для удержания высокотемпературной плазмы. Один из методов заключается в удержании плазмы магнитным полем. К сожалению, во всех испробованных конфигурациях магнитных ловушек возникают «щели» и утечка заряженных частиц происходит до того, как ядерный синтез успеет произойти в требуемых масштабах. С помощью одной из многообещающих конфигураций магнитного поля (тороидальной), известной под названием «токамак»<sup>1)</sup>, удалось существенно увеличить время удержания плазмы. Чтобы за время удержания произошло большое число взаимодействий, плазма должна быть достаточно плотной. Как показал в 1957 г. Дж. Д. Лоусон, выход энергии в термоядерном реакторе превзойдет энергетические затраты, если произведение плотности ионов  $n$  на время удержания  $\tau$  будет удовлетворять неравенству

$$n\tau \gtrsim 3 \cdot 10^{14} \text{ с/см}^3.$$

Это неравенство известно как *критерий Лоусона*. В последние годы физикам удалось вплотную подойти к нему, но нужная величина  $n\tau$  все еще не достигнута.

Альтернативный метод состоит в использовании твердых гранул горючего, быстро разогреваемых интенсивным лазерным или электронным пучком. Метод *инерционного удержания* весьма перспективен, но осуществить управляемую термоядерную реакцию пока не удалось.

## \* 42.14. Измерение излучения – дозиметрия

Прохождение заряженных частиц (например,  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц), а также  $\gamma$ - и рентгеновского излучений через вещество, в том числе через ткани человеческого тела, приводит к ионизации атомов и молекул и может вызвать значительные поражения. Излучения применяются для лечения некоторых заболеваний, в частности рака. Поэтому важно уметь определять количество, или *дозу*, излучения, проходящего через то или иное вещество. Этим и занимается *дозиметрия*. Рассмотрим наиболее важные способы измерения доз.

Мощность (интенсивность) источника излучения в данный момент времени характеризуют его активностью, или числом распадов в секунду. Используется специаль-

<sup>1)</sup> Сокр. от «Тороидальная КАмера с МАгнитными Капсулами». – Прим. ред.

ная единица активности – *кюри* (Ки), определяемая следующим образом<sup>1)</sup>:

$$1 \text{ Ки} = 3,70 \cdot 10^{10} \text{ расп./с.}$$

Поставщики *радиоизотопов* (радиоактивных изотопов) указывают активность на определенную дату. Об этом не следует забывать, так как со временем активность снижается, особенно если речь идет о короткоживущих изотопах.

**Пример 42.9.** Пусть препарат  $^{32}_{15}\text{P}$  активностью 0,016 мКи введен в среду, содержащую культуру бактерий. Через 1 ч клетки промывают, и детектор с эффективностью 70% (т.е. регистрирующий 70%  $\beta$ -излучения) регистрирует от всех клеток 720 отсчетов в минуту. Какой процент первоначально введенного изотопа  $^{32}_{15}\text{P}$  оказался усвоен клетками?

**Решение.** Полное число распадов в секунду первоначально составляло  $(0,016 \cdot 10^{-6})(3,7 \cdot 10^{10}) = 590$ . Можно было бы ожидать, что счетчик зарегистрирует 70% этой величины, т.е. 410 расп./с. Поскольку он показал  $720/60 = 12$  расп./с,  $12/410 = 0,029$ , или 2,9%, препарата усвоено клетками.

Самой первой единицей дозы был *рентген* (Р); он определялся по ионизации, производимой излучением. В настоящее время 1 Р определяют как дозу рентгеновского или  $\gamma$ -излучения, при которой в 1 кг воздуха поглощается энергия  $0,878 \cdot 10^{-2}$  Дж.

Более удобной, чем рентген, единицей дозы, применимой к излучению любого типа, служит *рад*; 1 рад – это доза излучения, при которой 1 кг облучаемого вещества поглощает энергию  $1,00 \cdot 10^{-2}$  Дж<sup>2)</sup>. (Для рентгеновского и  $\gamma$ -излучений эта доза очень близка к рентгену.) Выраженная в радах доза излучения зависит не только от интенсивности излучения (числа частиц в секунду) и энергии частиц, но и от типа материала, поглощающего излучение. Например, так как кости плотнее мягких тканей и сильнее поглощают применяемое излучение, то при облучении тела одним пучком в костях поглощается большая доза (в радах), чем в мягких тканях.

Рад – физическая единица дозы. Это энергия, поглощаемая в 1 г вещества. Однако рад является не очень удобной единицей для характеристики биологической опасности излучения. Это объясняется тем, что одинаковые дозы излучений различного типа вызывают разные поражения тканей. Например, 1 рад  $\alpha$ -излучения причиняет в 10–20 раз больше повреждений, чем 1 рад  $\beta$ - или  $\gamma$ -излучения. Повышенная опасность  $\alpha$ -излучения обусловлена в основном тем, что  $\alpha$ -частицы (как и другие тяжелые частицы, например протоны и нейтроны) из-за

<sup>1)</sup> В системе СИ единицей активности служит беккерель (Бк):  $1 \text{ Бк} = 1/\text{с} = (1/3,7) \cdot 10^{-10} \text{ Ки}$ . – Прим. ред.

<sup>2)</sup> В системе СИ предусмотрена единица поглощенной дозы грэй (Гр):  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$ .

Таблица 42.3. ОБЭ различных излучений

Тип излучения	Коэффициент качества
Рентгеновское и $\gamma$ -излучения	$\sim 1$
$\beta$ -излучение (электроны)	$\sim 1$
Быстрые протоны	1
Медленные нейтроны	$\sim 3$
Быстрые нейтроны	$< 10$
$\alpha$ -частицы и тяжелые ионы	$< 20$

большой массы движутся гораздо медленнее, чем  $\beta$ -частицы или  $\gamma$ -кванты с той же энергией. Поэтому производимая ими ионизация оказывается более сильной и причиняет в большей степени непоправимый ущерб. *Относительная биологическая эффективность* (ОБЭ), или *коэффициент качества* ( $K$ ), данного типа излучения определяется как доза в радах рентгеновского или  $\gamma$ -излучения, производящего тот же биологический эффект, что и 1 рад данного излучения. Значения ОБЭ нескольких типов излучения приведены табл. 42.3. Это приближенные значения, так как они зависят от энергии частиц и от рассматриваемого типа повреждений.

Произведение дозы в радах на ОБЭ излучения дает единицу, известную под названием «рэм» (или бэр – биологический эквивалент рада):

$$1 \text{ рэм} = 1 \text{ рад} \cdot \text{ОБЭ}.$$

По определению 1 рэм излучения любого типа вызывает примерно одинаковый биологический эффект. Например, 50 рэм быстрых нейтронов вызывает такие же повреждения, как и 50 рэм  $\gamma$ -излучения. Но при этом 50 рэм быстрых нейтронов соответствует дозе только 5 рад, а 50 рэм  $\gamma$ -излучения – дозе 50 рад.

Мы постоянно подвергаемся слабому облучению естественных источников: космических лучей, естественной радиоактивности горных пород и почвы и попадающих в пищу естественно радиоактивных изотопов, например  $^{40}_{19}\text{K}$ . Естественный радиоактивный фон составляет в среднем около 0,13 рэм в год на человека. В среднем человек получает на медицинских рентгеновских установках около 0,07 рэм в год. В США существует рекомендуемый федеральным правительством допустимый верхний предел облучения, составляющий в среднем около 0,5 рэм на человека (имеются в виду только естественные источники излучения). Однако считается, что даже малые дозы излучения повышают вероятность раковых заболеваний и генетических эффектов, поэтому дозы излучения стремятся по возможности свести к минимуму.

Люди, работающие с излучением (в больницах, на атомных электростанциях, в лабораториях), довольно часто получают дозу, значительно превышающую 0,5 рэм/год. Верхний предел профессионального облучения установлен более высоким и составляет 5 рэм/год при облучении всего тела (преимущественно потому, что эти люди сознательно идут на риск).

**Пример 42.10.** Какую дозу при полном облучении тела получает большой весом 70 кг при облучении его кобальтовым источником ( $^{60}_{27}\text{Co}$ ) активностью 1000 Ки, если на него попадает 2%  $\gamma$ -излучения? Изотоп  $^{60}_{27}\text{Co}$  испускает  $\gamma$ -кванты с энергиями 1,33 и 1,17 МэВ (те и другие в равных

количествах). Примерно 50%  $\gamma$ -излучения взаимодействует с тканями тела и выделяет в них всю энергию. (Остальное излучение проходит, не вызывая биологического эффекта.)

**Решение.** Средняя энергия  $\gamma$ -квантов составляет 1,25 МэВ, поэтому полная

энергия, проходящая сквозь тело, равна (1000 Ки)  $(3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп./Ки} \cdot \text{с})(1,25 \text{ МэВ}) \times 0,020 = 9,3 \cdot 10^{11} \text{ МэВ/с}$ . (Множитель 0,020 соответствует тому, что до тела больного доходит лишь 2,0% испускаемого источником излучения.) Тело поглощает лишь половину энергии, поэтому

полученная большим дозой составляет  $\frac{1}{2} (9,3 \cdot 10^{11} \text{ МэВ/с})(1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж/МэВ}) = 7,4 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/с}$ . Так как  $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Дж/кг}$ , общая доза в расчете на полное облучение тела составляет  $(7,4 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/с}) / (10^{-2} \text{ Дж/кг} \cdot \text{рад}) (70 \text{ кг}) = 0,11 \text{ рад/с}$ .

## Заклучение

*Ядерная физика* занимается изучением атомных ядер. Ядра состоят из протонов и нейтронов, называемых общим термином *нуклоны*. Полное число нуклонов  $A$  в ядре называется *массовым числом*. Число протонов  $Z$  называется *атомным номером*. Число нейтронов равно  $A - Z$ . Изотопы — это ядра с одинаковым  $Z$ , но различным числом нейтронов. Изотоп химического элемента  $X$  с заданными  $Z$  и  $A$  принято обозначать  ${}^A_Z X$ . Радиус ядра пропорционален  $A^{1/3}$ , что свидетельствует о примерно одинаковой плотности всех ядер. Массы ядер принято измерять в атомных единицах массы (а.е.м.), выбранных таким образом, что масса изотопа углерода  ${}^{12}_6\text{C}$  в точности равна 12,000 а.е.м., или в их энергетическом эквиваленте (поскольку  $E = mc^2$ ): 1 а.е.м. = 931,5 МэВ/с<sup>2</sup>.

Масса ядра меньше суммы масс составляющих его нуклонов. Разность этих масс (умноженная на  $c^2$ ) равна *полной энергии связи ядра*. Эта величина характеризует энергию, которую необходимо затратить, чтобы разделить ядро на составляющие его нуклоны. *Удельная энергия связи* (энергия связи, приходящаяся на один нуклон) составляет в среднем около 8 МэВ и минимальна для очень легких и очень тяжелых ядер.

Нестабильные ядра претерпевают *радиоактивный*  $\alpha$ -,  $\beta$ - или  $\gamma$ -распад; при испускании  $\alpha$ - или  $\beta$ -частиц они превращаются в ядра других элементов;  $\alpha$ -частица представляет собой ядро  ${}^4_2\text{He}$ ;  $\beta$ -частица — электрон или позитрон;  $\gamma$ -квант — это фотон высокой энергии. При  $\beta$ -распаде испускается также *нейтрино*.

Нуклоны в ядре удерживаются *сильным (ядерным) взаимодействием*, обладающим малым радиусом действия (короткодействующие силы). *Слабое взаимодействие* проявляется в  $\beta$ -распаде. Сильное, слабое, а также гравитационное и электромагнитное взаимодействия образуют четыре известных фундаментальных взаимодействия.

Радиоактивный распад происходит по закону случая. Число распадов  $\Delta N$  за время  $\Delta t$  пропорционально числу  $N$  имеющихся материнских ядер:  $\Delta N = -\lambda N \Delta t$ ; коэффициент пропорциональности  $\lambda$  называется постоянной распада и служит характеристикой данного ядра. *Период полураспада*  $T_{1/2}$  — это время, в течение которого распадается половина ядер радиоактивного образца. Период полураспада связан с постоянной распада соотношением

$T_{1/2} = \ln 2/\lambda$ . Во всех распадах сохраняются электрический заряд, импульс, момент импульса, энергия-масса и число нуклонов. Радиоактивный распад происходит только при условии, если суммарная масса продуктов распада меньше массы материнского ядра. Уменьшение массы компенсируется кинетической энергией продуктов распада.

*Ядерная реакция* происходит при столкновении двух ядер (частиц) и приводит к образованию двух или большего числа новых ядер (частиц). В результате ядерных реакций, как и при радиоактивном распаде, происходит превращение одних элементов в другие.

При *делении* тяжелое ядро, например ядро урана, расщепляется на два ядра средних размеров. Изотоп  $^{235}_{92}\text{U}$  делится медленными нейтронами, в то время как некоторые ядра делятся только быстрыми нейтронами. При делении выделяется много энергии, так как удельная энергия связи у тяжелого ядра меньше, чем у средних ядер, а масса тяжелого ядра больше суммарной массы продуктов деления. Деление ядра сопровождается испусканием нейтронов, что делает возможной *цепную реакцию*. *Критической массой* называется минимальная масса горючего, необходимая для поддержания цепной реакции. В *ядерном реакторе* для замедления испущенных нейтронов необходим замедлитель.

*Ядерный синтез*, при котором из самых легких ядер образуются более тяжелые ядра, также сопровождается выделением энергии. Построить термоядерный реактор, который давал бы энергию в промышленных целях, пока не удалось из-за трудностей удержания термоядерного горючего в течение достаточно большого промежутка времени при высокой температуре.

## Вопросы

- Откуда мы знаем о существовании сильного (ядерного) взаимодействия?
- Что общего у различных изотопов одного и того же химического элемента? Чем они различаются?
- Какие элементы обозначены здесь символами  $X$ : а)  $^{232}_{92}X$ ; б)  $^{18}_7X$ ; в)  $^1_1X$ ; г)  $^{82}_{38}X$ ; д)  $^{247}_{97}X$ ?
- Сколько протонов и сколько нейтронов в ядре каждого из изотопов, перечисленных в вопросе 3?
- Почему массы атомов многих элементов (табл. 41.3) отличаются от целых чисел?
- Какие экспериментальные данные свидетельствуют о том, что радиоактивность – ядерный процесс?
- Изотоп  $^{64}_{29}\text{Cu}$  необычен тем, что может претерпевать  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  и  $\gamma$ -распад. Какие нуклиды образуются в результате каждого из распадов?

- Сколько нейтронов содержит дочернее ядро распада  $^{238}_{92}\text{U}$ ?
- Укажите как можно больше различий между  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучениями.
- Какой химический элемент образуется при радиоактивном распаде а)  $^{24}_{11}\text{Na}$  ( $\beta^-$ ); б)  $^{22}_{11}\text{Na}$  ( $\beta^+$ ); в)  $^{210}_{84}\text{Po}$  ( $\alpha$ )?
- Какой химический элемент образуется при радиоактивном распаде а)  $^{32}_{15}\text{P}$  ( $\beta^-$ ); б)  $^{35}_{16}\text{S}$  ( $\beta^-$ ); в)  $^{211}_{83}\text{Bi}$  ( $\alpha$ )?
- Впишите недостающую частицу или ядро:
  - $^{45}_{20}\text{Ca} \rightarrow ? + e^- + \bar{\nu}$ ;
  - $^{58}_{28}\text{Cu} \rightarrow ? + \gamma$ ;
  - $^{44}_{24}\text{Cr} \rightarrow ^{46}_{23}\text{V} + ?$ ;
  - $^{234}_{94}\text{Pu} \rightarrow ? + \alpha$ ;
  - $^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow ^{239}_{92}\text{U} + ?$ .
- Сразу после распада ядра  $^{238}_{90}\text{U}$  на  $^{234}_{90}\text{Th} + ^4_2\text{He}$  у дочернего ядра тория оказывается 92 электрона. Нормально торий имеет 90 электронов. Что, по-вашему, происходит с двумя лишними электронами?



14. Где на графике, изображенном на рис. 42.2, располагаются изотопы, претерпевающие захват электрона, — выше или ниже кривой стабильности?

15. Почему многие искусственные радиоактивные изотопы редко встречаются в природе?

16. Опишите, чем отличается кривая потенциальной энергии  $\alpha$ -частицы в ядре, претерпевающем  $\alpha$ -распад, от кривой для стабильного ядра.

17. Впишите недостающие частицы или ядра: а)  $^{137}_{54}\text{Ba}$  ( $n, \gamma$ )?; б)  $^{137}_{56}\text{Ba}$  ( $n, ?$ )  $^{137}_{55}\text{Cs}$ ; в)  $^2_1\text{H}$  ( $d, ?$ )  $^4_2\text{He}$ ; г)  $^{197}_{79}\text{Au}$  ( $\alpha, d$ )?.

18. Изотоп  $^{32}_{15}\text{P}$  образуется в результате ( $n, p$ )-реакции. Каким должно быть ядро-мишень?

19. При бомбардировке ядра  $^{22}_{11}\text{Na}$  дейтронами  $^2_1\text{H}$  испускается  $\alpha$ -частица. Какой нуклид при этом образуется?

20. Будут ли осколки деления  $\beta^+$ - или  $\beta^-$ -излучателями?

21. При делении ядра  $^{235}_{92}\text{U}$  в среднем образуется 2,5 нейтрона, при делении ядра  $^{239}_{94}\text{Pu}$  — 2,7 нейтрона. Если из ядер  $^{235}_{92}\text{U}$  и  $^{239}_{94}\text{Pu}$  изготовить чистые образцы, какой из них будет иметь меньшую критическую массу?

22. Если бы при делении урана  $^{235}_{92}\text{U}$  испускалось в среднем 1,5 нейтрона, была бы возможна цепная реакция? Что оказалось бы иным?

23. Обсудите сравнительные достоинства и недостатки, в том числе загрязнение окружающей среды и безопасность различных способов получения энергии: сжигание ископаемого горючего, деление ядра и ядерный синтез.

24. Для чего в схеме ядерного реактора на рис. 42.12 предусмотрен вторичный контур, т. е. почему вода, нагреваемая в ядерном реакторе, не используется непосредственно для вращения турбины?

25. Энергия деления ядер проявляется в форме тепловой энергии чего?

26. Почему вероятность взрыва пористого блока урана выше, если блок находится в водной, а не в воздушной среде?

27. Применима ли формула Эйнштейна а) к делению ядер; б) к ядерному синтезу; в) к ядерным реакциям?

28. Источником световой энергии, излучаемой Солнцем и звездами, служит ядерный синтез. Какие условия в недрах звезд делают возможным протекание термоядерного синтеза?

## Задачи

### Раздел 42.1

1. (I) Чему равна энергия покоя  $\alpha$ -частицы в единицах  $\text{МэВ}/c^2$ ?

2. (I)  $\pi$ -мезон имеет массу  $139 \text{ МэВ}/c^2$ . Чему она равна в атомных единицах массы?

3. (I) а) Чему (приближенно) равен радиус ядра  $^{69}_{29}\text{Cu}$ ? б) Чему (приближенно) равно значение  $A$  у ядра радиусом  $3,6 \cdot 10^{-15} \text{ м}$ ?

4. (II) Какой энергией должна обладать  $\alpha$ -частица, чтобы подойти вплотную к поверхности ядра  $^{238}_{92}\text{U}$ ?

5. (II) а) Определите плотность ядерной материи в единицах  $\text{кг}/\text{м}^3$ . б) Чему был бы равен радиус Земли, если бы наша планета со своей реальной массой имела плотность ядерной материи? в) Чему был бы равен радиус ядра  $^{238}_{92}\text{U}$ , если бы оно имело плотность Земли?

6. (II) У какого стабильного ядра радиус (примерно) равен половине радиуса урана?

### Раздел 42.2

7. (I) Оцените полную энергию связи ядра  $^{40}_{20}\text{Ca}$ .

8. (I) Пользуясь рис. 42.1, оцените полную энергию связи ядра а)  $^{238}_{92}\text{U}$ ; б)  $^{107}_{47}\text{Ag}$ .

9. (I) Пользуясь данными, приведенными в приложении Г, вычислите энергию связи ядра  $^2_1\text{H}$ .

10. (I) Вычислите полную и удельную энергию связи  $^6_3\text{Li}$ . Воспользуйтесь приложением Г.

11. (II) Вычислите энергию связи нейтрона в ядре  $^{12}_6\text{C}$ .

12. (II) а) Покажите, что ядро  $^8_4\text{Be}$  (с массой  $8,005308 \text{ а. е. м.}$ ) нестабильно и распадается на две  $\alpha$ -частицы. б) Стабильно ли ядро  $^{12}_6\text{C}$  относительно распада на три  $\alpha$ -частицы? Ответ обоснуйте.

### Разделы 42.3–42.7

13. (I) Возбужденное ядро  $^{60}_{27}\text{Co}$  испускает  $\gamma$ -квант с энергией  $1,33 \text{ МэВ}$  и переходит в основное состояние. Чему равна масса возбужденного атома кобальта?

14. (II) Покажите, что распад  $^1_0\text{C} \rightarrow ^1_0\text{B} + p$  невозможен, так как в этом случае нарушался бы закон сохранения энергии.

15. (II) Ядро  $^{232}_{90}\text{Th}$  испускает  $\alpha$ -частицу с кинетической энергией  $5,32 \text{ МэВ}$ . Что представляет собой конечное ядро и чему (приблизительно) равна масса (в а. е. м.) конечного атома?

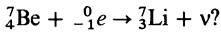
16. (II) При превращении  $^{23}_{10}\text{Ne}$  (с массой  $22,9945 \text{ а. е. м.}$ ) в результате распада в  $^2_1\text{H}$  (с массой  $2,0141 \text{ а. е. м.}$ ) чему равна энергия испущенного электрона? Чему равна его минимальная энергия? Чему равна в каждом случае энергия нейтрино?

17. (II) Нуклид  $^{32}_{15}\text{P}$  распадается, испуская электрон с максимальной кинетической энергией  $1,71 \text{ МэВ}$ . а) Укажите дочернее ядро. б) Вычислите массу дочернего атома (в а. е. м.).

18. (II) Изотоп  $^{218}_{84}\text{Po}$  (с массой  $218,008969 \text{ а. е. м.}$ ) может распасться с испусканием либо

$\alpha$ -, либо  $\beta$ -частицы. Какая энергия выделяется в каждом из этих случаев?

19. (II) Какая энергия выделяется при электронном захвате



20. (II) При  $\beta^-$ -распаде нуклида  ${}^{191}_{76}\text{Os}$  вылет электрона с энергией 0,14 МэВ сопровождается испусканием  $\gamma$ -квантов с энергиями 0,042 и 0,129 МэВ. а) Какое дочернее ядро образуется в результате распада? б) Начертите схему энергетических уровней, показав на ней основные состояния материнского и дочернего ядер и возбужденные состояния дочернего ядра. В каких из дочерних состояний происходит  $\beta$ -распад нуклида  ${}^{191}_{76}\text{Os}$ ?

21. (II) а) Покажите, что при  $\beta^+$ -распаде ядра выделяется полная энергия  $(M_P - M_D - 2m_e)c^2$ , где  $M_P$  и  $M_D$  – массы материнского и дочернего атомов (нейтральных),  $m_e$  – масса электрона или позитрона. б) Определите максимальную кинетическую энергию  $\beta^+$ -частиц, вылетающих при распаде  ${}^1_6\text{C}$  в  ${}^1_5\text{B}$ . Какова максимальная энергия нейтрино? Какова его минимальная энергия?

22. (III) Покажите, что при  $\alpha$ -распаде, например, ядра  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  дочернее ядро уносит  $1/(1 + A_D/4)$  общей энергии, где  $A_D$  – массовое число дочернего ядра. (Подсказка: воспользуйтесь законами сохранения импульса и энергии.) Какая доля энергии (в процентах) уносится при таком распаде  $\alpha$ -частицей?

Разделы 42.8–\* 42.10

23. (I) а) Чему равна постоянная распада ядра  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , если его период полураспада равен  $4,5 \cdot 10^9$  лет? б) Постоянная распада данного ядра равна  $6,2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ . Каков его период полураспада?

24. (I) Какая доля образца  ${}^{68}_{32}\text{Ge}$  с периодом полураспада около 9 месяцев сохранится через 4,5 года?

25. (II) В результате цепочки распадов нуклид  ${}^{235}_{92}\text{U}$  превращается в нуклид  ${}^{209}_{82}\text{Pb}$ . Сколько  $\alpha$ - и  $\beta^-$ -частиц испускается в этой цепочке?

26. (II) Период полураспада ядра  ${}^{135}_{55}\text{Cs}$  равен 30,8 с. а) Сколько ядер содержалось первоначально в образце  ${}^{135}_{55}\text{Cs}$ , если его масса равна 6,2 мкг? б) Сколько ядер останется через 1,2 мин? в) Какова к этому времени будет активность образца? г) За какое время его активность упадет до величины менее 1 расп./с?

27. (II) Активность образца  ${}^{35}_{16}\text{S}$  равна  $8,8 \cdot 10^6$  расп./с. Чему в этот момент равна масса образца?

28. (II) Счетчик Гейгера регистрирует активность радиоактивного нуклида на уровне 2880 расп./мин, а через 1,6 ч – 820 расп./мин. Чему равен период полураспада этого нуклида?

29. (II) Изотоп водорода  ${}^3_1\text{H}$  (третий) имеет период полураспада 12,33 года. Его можно использовать для датирования предметов, возраст которых не превышает 100 лет. Третий образуется в верхних слоях атмосферы под действием космических лучей и переносится на Землю с дождем. Определите возраст бутылки вина, если активность трития в нем составляет  $1/10$  активности в молодом вине.

30. (II) Изотоп рубидия  ${}^{87}_{37}\text{Rb}$  ( $\beta$ -излучатель с периодом полураспада  $4,9 \cdot 10^{10}$  лет) используется для определения возраста пород и ископаемых. В породах, содержащих останки древних животных, относительное содержание  ${}^{87}\text{Sr}/{}^{87}\text{Rb}$  составляет 0,018. Вычислите возраст ископаемых в предположении, что при формировании горных пород изотопа  ${}^{87}\text{Sr}$  не было.

31. (II) При  $t = 0$  чистый образец радиоактивного изотопа содержит  $N_0$  ядер с постоянной распада  $\lambda$ . Как зависит от времени число  $N_D$  дочерних ядер? Предполагается, что  $N_D = 0$  при  $t = 0$ .

32. (II) а) Покажите, что среднее время жизни радиоактивного нуклида, определяемое как

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} N(t) dt}{\int_0^{\infty} N(t) dt}$$

удовлетворяет соотношению  $\tau = 1/\lambda$ . б) Какая доля исходного числа ядер остается спустя среднее время жизни?

33. (II) Кусок ископаемого дерева содержит 240 г углерода и имеет активность 5,0 расп./с. Определите возраст дерева, если известно, что в живых деревьях отношение  ${}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}$  составляет около  $1,3 \cdot 10^{-12}$ .

34. (II) При  $t = 0$  чистый образец радиоактивного нуклида (материнского) содержит  $N_{P0}$  ядер с периодом полураспада  $T_P$ . Дочерний нуклид также радиоактивен и имеет период полураспада  $T_D$ . а) Определите число дочерних ядер  $N_D$  как функцию времени, предполагая, что  $N_D = 0$  при  $t = 0$ . б) Постройте график зависимости  $N_D$  от  $t$  для случаев  $T_P = T_D$ ,  $T_P = 3T_D$ ,  $T_P = 1/3 T_D$ . [Подсказка: воспользуйтесь для этого формулой (42.3), внося в нее необходимые изменения.]

Раздел 42.11

35. (I) Определите, существует ли у реакции  ${}^2_1\text{H}(d,n){}^3_2\text{He}$  пороговая энергия.

36. (I) Возможна ли реакция  ${}^{238}_{92}\text{U}(n,\gamma){}^{239}_{92}\text{U}$  на медленных нейтронах? Объясните.

37. (II) Требуется ли реакция  ${}^4_2\text{He}(p,\alpha){}^1_2\text{He}$  затрат энергии или идет с выделением энергии? Какая энергия требуется или выделяется?

38. (II) а) Может ли реакция  ${}^{24}_{12}\text{Mg}(n, d){}^{23}_{11}\text{Na}$  происходить при бомбардировке магния нейтронами с кинетической энергией 10,0 МэВ? б) Если может, то какая энергия при этом выделяется?

39. (II) В реакции  ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p){}^{17}_8\text{O}$  налетающие  $\alpha$ -частицы имеют кинетическую энергию 7,68 МэВ. а) Может ли происходить такая реакция? б) Если да, то чему равна полная кинетическая энергия продуктов? Масса  ${}^{17}_8\text{O}$  равна 16,999131 а. е. м.

40. (III) С помощью законов сохранения энергии и импульса покажите, что при реакции  ${}^{13}_6\text{C}(p, n){}^{13}_7\text{N}$  пороговая энергия налетающего протона равна 3,23 МэВ (пример 42.9).

41. (III) С помощью законов сохранения энергии и импульса покажите, что для ядерной реакции, идущей с поглощением энергии, минимальная кинетическая энергия налетающей частицы (*пороговая энергия*) равна  $Qm_{pr}/(m_{pr} - m_b)$ , где  $Q$  – необходимая энергия (разность суммарных масс продуктов и исходных частиц и ядер),  $m_b$  – масса покоя налетающей частицы,  $m_{pr}$  – суммарная масса покоя продуктов реакции. Предполагается, что перед столкновением с налетающей частицей ядро-мишень покоилось.

### Раздел 42.12

42. (I) Вычислите энергию, выделяющуюся при реакции деления  ${}^1_0n + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{88}_{38}\text{Sr} + {}^{136}_{54}\text{Xe} + 12{}^1_0n$ . Необходимые данные приведены в приложении Г. Предполагается, что кинетическая энергия налетающего нейтрона очень мала.

43. (I) Какая энергия выделяется в реакции деления 42.8? (Массы  ${}^{141}_{56}\text{Ba}$  и  ${}^{92}_{36}\text{Kr}$  равны соответственно 140,9141 и 91,9250 а. е. м.)

44. (I) Сколько реакций деления происходит в 1 с в ядерном реакторе мощностью 25 МВт, если при каждом акте деления выделяется энергия 200 МэВ?

45. (II) Один из методов обогащения урана основан на диффузии газа  $\text{UF}_6$ . Вычислите отношение скоростей молекул этого газа, содержащего изотопы  ${}^{235}_{92}\text{U}$  и  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , от которого зависит этот процесс.

46. (II) Предположим, что среднесуточное потребление мощности в среднем доме составляет 300 Вт. Какая масса  ${}^{235}_{92}\text{U}$  должна разделиться, чтобы удовлетворить годовую потребность такого дома в энергии? (Предполагается, что при каждом акте деления выделяется энергия 200 МэВ.) Какая для этого потребуется полная масса  ${}^{235}_{92}\text{U}$  ( $T_{1/2} = 7,0 \cdot 10^8$  лет)?

47. (II) Предположим, что коэффициент размножения нейтронов равен 1,0004, а среднее время между последовательными делениями в

цепной реакции составляет 1,0 мс. Как возрастает скорость реакции за 1,0 с?

48. (II) Рассмотрим сеть атомных электростанций общей мощностью 4000 МВт. а) Какая масса уранового горючего  ${}^{235}_{92}\text{U}$  может обеспечить работу этих станций в течение 1 года, если предположить, что при каждом акте деления выделяется энергия 200 МэВ? б) Обычно 3% массы  ${}^{235}_{92}\text{U}$  превращается в  ${}^{90}_{38}\text{Sr}$  –  $\beta^-$ -излучатель с периодом полураспада 29 лет. Чему равна полная активность (в кюри) изотопа  ${}^{90}_{38}\text{Sr}$  сразу после его наработки? (Пренебрегите расходом части стронция за год.)

### Раздел 42.13

49. (I) Чему равна средняя кинетическая энергия протонов в центре звезды при температуре  $10^7$  К?

50. (II) Сколько дейтерия понадобится в год для обеспечения электроэнергией среднего дома, если потребляемая мощность составляет в среднем 300 Вт? Предполагается, что энергия выделяется в результате реакции (42.96).

51. (II) Какая энергия выделяется на 1 г горючего в реакциях (42.9а) и (42.9в)? Сравните полученные величины с энергией, выделяющейся при делении 1 г урана.

52. (II) В так называемом углеродном цикле, происходящем на Солнце,  ${}^4_2\text{He}$  образуется из четырех протонов в результате длинной цепи превращений, которая начинается с  ${}^{12}_6\text{C}$ . Сначала  ${}^{12}_6\text{C}$  поглощает протон и переходит в ядро  $X_1$ .  $X_1$  распадается с испусканием позитрона  $\beta^+$  и превращается в ядро  $X_2$ .  $X_2$  поглощает протон и переходит в ядро  $X_3$ , которое также поглощает протон и превращается в ядро  $X_4$ .  $X_4$  претерпевает  $\beta^+$ -распад и превращается в ядро  $X_5$ , которое вступает в ядерную реакцию  $X_5(p, \alpha)X_6$ . а) Определите промежуточные ядра, выпишите подробно каждый этап цикла и покажите, что  $X_6$  это снова  ${}^{12}_6\text{C}$ . (Таким образом,  ${}^{12}_6\text{C}$  не расходуется в углеродном цикле.) б) Определите, сколько энергии выделяется на каждом этапе.

53. (II) Сколько энергии (в Дж) содержится в 1 кг воды, если природный дейтерий использовать в реакции ядерного синтеза (42.9а)? Сравните полученную величину с энергией, извлекаемой при сгорании 1 кг бензина (около  $5 \cdot 10^7$  Дж).

### \* Раздел 42.14

\* 54. (I) Животному сделана инъекция препарата  ${}^{32}_{15}\text{P}$  активностью 0,018 мкКи. Если в счетчик Гейгера попадает лишь 20% испускаемых  $\beta$ -частиц и его эффективность регистрации составляет 90%, то какой будет скорость счета?

\* 55. (I) Взрослый человек получает с пищей около  $0,10$  мкКи изотопа  $^{40}_{19}\text{K}$ . Сколько распадов происходит в  $1$  с?

\* 56. (I) а) Доза  $\gamma$ -излучения  $500$  рэм вызвала бы смертельный исход у половины получивших ее людей. Какому числу радов она соответствует? б) Какому числу радов рентгеновского излучения эквивалентна по биологическому воздействию доза  $50$  рад  $\alpha$ -излучения? в) Какому числу радов при облучении медленными нейтронами эквивалентны по биологическому воздействию  $50$  рад при облучении быстрыми нейтронами?

\* 57. (II) Источник  $\beta^-$ -излучателя  $^{32}_{15}\text{P}$  (в виде соли  $\text{NaHPO}_4$ ) имплантирован в орган, который должен получить в лечебных целях  $5000$  рад. Период полураспада изотопа  $^{32}_{15}\text{P}$  равен  $14,3$  сут;  $1$  мКи соответствует  $1$  рад/мин. На какое время следует имплантировать источник?

\* 58. (II) Нуклид  $^{57}_{27}\text{Co}$  испускает  $\gamma$ -кванты с энергией  $122$  кэВ. Человек с массой  $70$  кг проглатывает  $2,0$  мкКи  $^{57}_{27}\text{Co}$ . Какой дозе (рад/сут) это соответствует в расчете на облучение всего тела? Предполагается, что тело поглощает  $50\%$  энергии  $\gamma$ -излучения.

\* 59. (II) Экранированный источник  $\gamma$ -излучения создает на расстоянии  $1,0$  м дозу  $0,055$  рад/ч для среднего человека. Допустимая максимальная доза составляет  $5,0$  рэм/год. Как близко от источника можно работать, если продолжительность рабочей недели составляет  $35$  ч? Предполагается, что интенсивность излучения убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. (В действительности из-за поглощения в воздухе интенсивность излучения убывает еще быстрее, поэтому полученный вами ответ в действительности соответствует значению больше допустимого.)