

Следовательно, на каждый нуклон приходится удельная энергия связи ядра бериллия $\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{N} = 7,1 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$, что подтверждается экспериментальными данными.

Ответ: $E_{\text{св}} = 56,7 \text{ МэВ}$; $\varepsilon = 7,1 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$.

Упражнение 23

1. Определите дефект массы ядра алюминия $^{27}_{13}\text{Al}$. Масса ядра алюминия равна $m_{\text{Al}} = 26,97431 \text{ а.е.м.}$, масса нейтрона $m_n = 1,00866 \text{ а.е.м.}$ и масса протона $m_p = 1,00728 \text{ а.е.м.}$
2. Определите массу ядра атома лития ^7_3Li , если дефект массы ядра атома лития $\Delta m = 7,030 \cdot 10^{-30} \text{ кг}$, масса протона $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, масса нейтрона $m_n = 1,6750 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.
3. Определите удельную энергию связи ε ядра атома ртути $^{200}_{80}\text{Hg}$, если массы нейтрона $m_n = 1,00866 \text{ а.е.м.}$, протона $m_p = 1,00728 \text{ а.е.м.}$, ядра ртути $m_{\text{Hg}} = 200,028 \text{ а.е.м.}$
4. Вычислите удельную энергию связи ε для ядра гелия ^4_2He .
5. Определите дефект массы Δm изотопа азота $^{14}_7\text{N}$, масса ядра которого $m_{\text{N}} = 14,00307 \text{ а.е.м.}$ Найдите удельную энергию связи ε ядра данного изотопа, если масса нейтрона $m_n = 1,00866 \text{ а.е.м.}$ и масса протона $m_p = 1,00728 \text{ а.е.м.}$
6. Дана ядерная реакция $^{14}_7\text{N} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{p}$. Определите энергию связи $E_{\text{св}}$ данных ядер, если их удельные энергии связи $\varepsilon_{\text{N}} = 7,48 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$, $\varepsilon_{\text{He}} = 7,075 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$, $\varepsilon_{\text{O}} = 7,751 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$.



§ 38. Радиоактивность

- Некоторые ядра обладают способностью к самопроизвольному распаду, сопровождающемуся изменением физической структуры ядра, а следовательно, и химических свойств атома. Каковы же основные закономерности самопроизвольного распада атомов? Почему он происходит? Представляет ли он опасность для здоровья человека?

Историю ядерной физики принято отсчитывать с 1896 г. Именно в этом году французский физик Антуан Анри Беккерель обнаружил, что соли урана обладают способностью засвечивать фотопластинку, испуская самопроизвольно какое-то неизвестное излучение. Это новое явление получило название *радиоактивности* (от лат. *radio* — испускаю лучи, *action* — действенный).

Радиоактивность — явление самопроизвольного превращения ядер, сопровождающееся испусканием частиц или ядер и коротковолнового электромагнитного излучения.

В 1898 г. Пьер Кюри и Мария Склодовская-Кюри, исследуя это новое явление, открыли новые радиоактивные химические элементы — радий $^{226}_{88}\text{Ra}$ и полоний $^{210}_{84}\text{Po}$. Вскоре были открыты и другие радиоактивные элементы. В 1899 г. Э. Резерфорд выделил две составляющие радиоактивного излучения — α - и β -лучи. Он доказал, что α -лучи представляют собой ядра гелия, а Беккерель доказал, что β -лучи являются потоком электронов. В 1900 г. французский физик П. Виллард открыл γ -лучи, третью компоненту радиоактивного излучения, при исследовании излучения радия. Впервые такую терминологию использовал Резерфорд в 1903 г.

► Радий по-латыни означает «испускающий лучи», а полоний назвали в честь родины Марии Склодовской-Кюри — Польши.

В 1903 г. Э. Резерфорд и Ф. Содди обнаружили, что явление радиоактивности сопровождается превращением одного химического элемента в другой с выделением энергии, которая уносится излучением. Они выдвинули теорию, согласно которой радиоактивные излучения возникают при распаде ядер.

В 1898 г. Резерфорд обнаружил, что по проникающей способности излучение можно разделить на три различных вида. Излучение первого вида (α -частицы) не проходило даже сквозь лист бумаги (рис. 212), второго (β -частицы) — не проникало уже через алюминиевую пластинку толщиной несколько миллиметров, а третьего (γ -частицы) — проходило даже сквозь слой свинца толщиной в несколько сантиметров.

Эти три вида излучения были названы согласно первым трем буквам греческого алфавита: соответственно α -, β - и γ -излучением. Впослед-

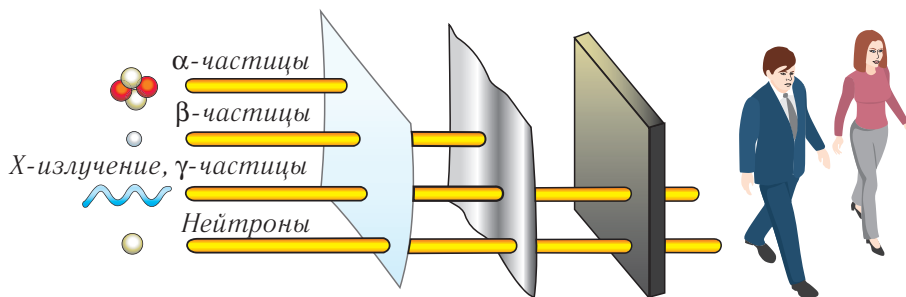


Рис. 212. Проникающая способность различных видов радиоактивных излучений

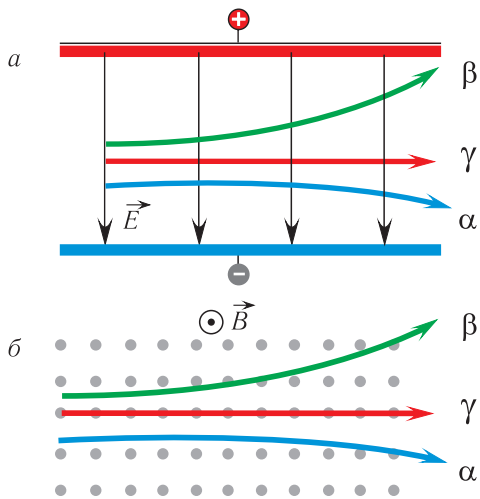


Рис. 213. Поведение радиоактивных излучений в электрическом (а) и магнитном полях (б)

ствии было обнаружено, что все эти виды излучения представляют собой известные частицы: α -излучение — это ядра атомов гелия ${}^4_2\text{He}$ (также обозначается ${}^4_2\alpha$), β -излучение — электроны, γ -излучение — электромагнитное излучение очень большой энергии.

Три составляющие радиоактивного излучения радия по-разному ведут себя в электрических и магнитных полях, отклоняясь в различных направлениях и на разные углы (рис. 213).

При α -распаде начального (так называемого материнского) ядра ${}^A_Z\text{X}$ продуктом распада оказывается изотоп Y с числом протонов $Z - 2$ и массовым числом $A - 4$:



Отметим основные особенности α -распада:

1) он наблюдается как у естественных (встречающихся в природе) ядер (при $Z > 83$), так и у искусственных изотопов (при $Z < 83$), поскольку при этом энергетически выгодно испускание α -частиц;

2) энергия α -частиц, вылетающих из различных ядер, находится в основном в пределах (1,1—11,8) МэВ;

3) вылетающие α -частицы имеют дискретный спектр значений энергии (при распаде данного ядра испускается α -частица с определенной энергией).

Примером α -распада является реакция ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$, в результате которой получается радон (рис. 214).

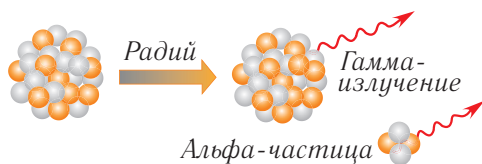


Рис. 214. Схема α -распада радия

При β -распаде ядра ${}^A_Z\text{X}$ образуется нуклид с атомным номером $Z + 1$ и таким же массовым числом, как материнское ядро, и испускается электрон. Для электронов в ядерной физике принято обозначение ${}^0_{-1}\text{e}$. С учетом этого реакцию β -распада можно записать следующим образом:



где $\tilde{\nu}$ — неизвестная в то время частица, зарядовое и массовое числа которой равны нулю (${}_0^0\tilde{\nu}$).

Отметим основные особенности β^- -распада:

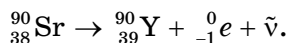
1) наблюдается при радиоактивном распаде ядер с избытком нейтронов;

2) вылетающие электроны имеют непрерывный спектр значений кинетической энергии от 0 до $E_{\max}$, значение которой зависит от вида распадающегося ядра.

Общим признаком ядерной реакции является превращение одного атомного ядра в другое. Но радиоактивный распад происходит *самопроизвольно*, без внешнего воздействия, а ядерная реакция вызывается воздействием бомбардирующей частицы.

Закономерности ядерных превращений (1) и (2) при α - и β^- -распадах, установленные в 1913 г. английским ученым Фредериком Содди и польским ученым Казимежем Фаянсом, называются *правилами смещения (сдвига)*.

Приведем пример β^- -распада — излучение электрона нуклидом стронция:



При β^- -распаде ядра, состоящего из нейтронов и протонов, испускаются электроны. Здесь возникает закономерный вопрос: «Откуда же они берутся?» И что это за частица $\tilde{\nu}$?

Согласно квантовой теории β^- -распада, разработанной в 1934 г. итальянским физиком Энрико Ферми, в момент распада ядра внутри него происходит превращение одного из нейтронов в протон, сопровождающееся в соответствии с законами сохранения электрического заряда и энергии возникновением еще двух частиц — электрона и частицы, зарядовое и массовое числа которой равны нулю. Эту частицу по предложению Ферми называли *нейтрино*, что в переводе с итальянского означает «нейтрончик». Нейтрино обозначается греческой буквой ν . Именно испускание антинейтрино вместе с электроном приводит к тому, что электрон при β^- -распаде может иметь любую энергию от 0 до $E_{\max}$.

► Существование нейтрино было предсказано В. Паули на основании закона сохранения энергии в 1931 г. Экспериментально нейтрино было зарегистрировано в 1956 г. в лаборатории Лос-Аламос (США) американскими физиками Ф. Райнесом и К. Коуном.

► О фантастической проникающей способности нейтрино можно судить по такому примеру. Если бы железная плита имела толщину, равную расстоянию от Земли до Солнца, то она задержала бы лишь одно из ста миллионов нейтрино, образующихся в ядерных реакторах.

Как одну из самых известных ядерных реакций отметим первое искусственное получение Фредериком и Ирен Жолио-Кюри в 1934 г. радиоактивного изотопа фосфора в ходе ядерной реакции (рис. 215):

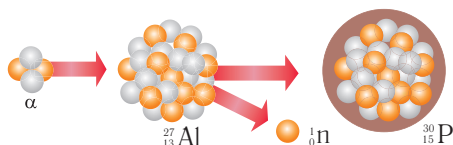
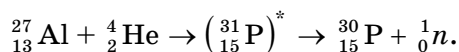
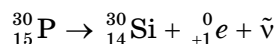


Рис. 215. Превращение алюминия в радиоактивный изотоп фосфора



Далее изотоп ${}_{15}^{30}\text{P}$ превращается в изотоп ${}_{14}^{30}\text{Si}$:



с испусканием позитрона ${}_{+1}^0e$ (рис. 216). Эта частица имеет все свойства (массу, спин, заряд) электрона, но отличается знаком заряда.

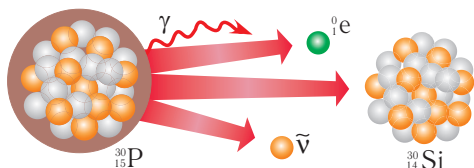


Рис. 216. Распад радиоактивного изотопа фосфора с образованием кремния и испусканием позитрона

Свойства нейтрино оказались удивительными. Из-за отсутствия электрического заряда и очень малой массы нейтрино очень слабо взаимодействует с веществом, и поэтому оно было экспериментально обнаружено

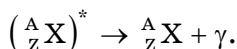
только в 1952—1956 гг. Фактически в любом веществе нейтрино ведет себя так, как будто вещества нет. Например, в свинце средняя длина пробега между взаимодействиями (проникающая способность) составляет величину порядка 10^{18} м. Поэтому нейтрино свободно пронизывают космическое пространство, пролетая сквозь Землю, Солнце и другие небесные тела.

Реакция β^- -распада нейтрона имеет вид:



где $\bar{\nu}$ обозначено антинейтрино. Эта β^- -реакция схематично изображена на рисунке 217.

Испускание γ -излучения, в отличие от α - и β -распадов ядер, не приводит к превращениям элементов:



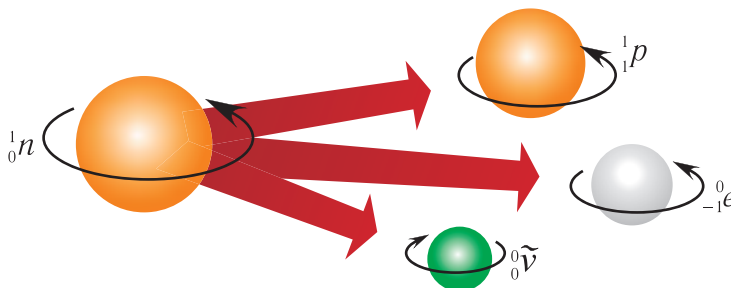


Рис. 217. Реакция распада нейтрона на протон, электрон и антинейтрино

Свойства γ -излучения:

- 1) коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны $\lambda \sim 10^{-10} - 10^{-13}$ м;
- 2) не имеет электрического заряда;
- 3) спектр γ -излучения непрерывный. Энергия излучения находится в пределах от ~ 10 МэВ до ~ 1 МэВ.

Обычно γ -излучение сопровождает радиоактивные превращения ядер при α - и β -распадах. Полученные при ядерных реакциях конечные ядра (их называют дочерними) оказываются в возбужденных состояниях с последующим переходом в основное состояние путем излучения γ -кванта.

Все радиоактивные распады происходят с выделением энергии, т. е. являются экзоэнергетическими, так как масса радиоактивного ядра превышает суммарную массу ядер продуктов распада.

Как объяснить стабильность одних ядер и нестабильность других? Для стабильности ядер необходим баланс между протонами и нейтронами. Среди элементов с маленькими номерами стабильные ядра состоят из равного или почти равного количества протонов и нейтронов. Так, например, ядро водорода ^1_1H содержит 1 протон, ядро гелия ^4_2He — 2 протона и 2 нейтрона, ядро кислорода $^{16}_8\text{O}$ — 8 нейтронов и 8 протонов, ядро кальция $^{40}_{20}\text{Ca}$ — 20 протонов и 20 нейтронов. Число нейтронов в них равно числу протонов и их соотношение $N/Z = 1$. В них ядерные силы притяжения компенсируют кулоновские силы отталкивания.

Стабильные ядра всех элементов тяжелее кальция содержат уже больше нейтронов, чем протонов. С увеличением атомного номера Z рост количества протонов уменьшает энергию связи вследствие увеличения силы их кулоновского отталкивания. Поэтому для стабильности ядер



вследствие короткодействия ядерных сил ($\sim 10^{-14}$ м) требуется больше нейтронов, чем протонов. Так, например, ядро самого распространенного изотопа железа $^{56}_{30}\text{Fe}$ состоит из 26 протонов и 30 нейтронов, т. е. $N/Z = 1,15$. Ядро изотопа висмута $^{209}_{83}\text{Bi}$ состоит из 126 нейтронов и 83 протонов, т. е. $N/Z = 1,52$. У ядра урана $^{238}_{92}\text{U}$ — $N/Z = 1,59$. Таким образом, чем больше протонов содержится в ядре, тем больше избыточных нейтронов необходимо для поддержания стабильности ядра. В то же время избыток нейтронов приводит к увеличению размеров ядра и в результате к уменьшению энергии связи. Поэтому для элементов с номером большим 83 ($Z > 83$), сколько бы нейтронов не было, стабильности добиться невозможно, так как увеличение количества нейтронов не может компенсировать возросшую силу отталкивания.

До урана $^{238}_{92}\text{U}$ радиоактивные ядра существуют в природе, а с номерами $Z > 92$ получены искусственно.

Неустойчивыми являются как ядра, у которых протонов намного больше, чем нейтронов, так и ядра, у которых число нейтронов намного больше числа протонов. Ядра с избыточным содержанием нейтронов часто оказываются β^- -радиоактивными.

Стабильность определенного нуклида зависит также от энергии этого нуклида по отношению к другим нуклидам с таким же количеством нуклонов. Например, нуклиды $^{24}_{11}\text{Na}$ и $^{24}_{12}\text{Mg}$ содержат одинаковое количество нуклонов, но соотношение нейтронов и протонов разное $N/Z=1$ и $N/Z=1,18$. Поэтому атом $^{24}_{11}\text{Na}$ самопроизвольно испытывает β^- -распад и превращается в атом $^{24}_{12}\text{Mg}$.

Таким образом, стабильными являются ядра, которые обладают минимальной энергией по сравнению с ядрами, в которые данное ядро могло бы самопроизвольно превратиться.

Многие нестабильные изотопы встречаются в природе. Их радиоактивность называется **естественной радиоактивностью**. Стабильных изотопов известно около 270, искусственных изотопов, получаемых на ускорителях и реакторах, известно около 3000. Их радиоактивность называется **искусственной радиоактивностью**.

Основной способ получения радиоактивных изотопов — бомбардировка стабильных изотопов частицами высокой энергии. Для этой цели используют пучки протонов или электронов, разгоняемых в ускорителях, или нейтроны, получаемые в ядерных реакторах.

► В промышленности радиоактивные изотопы применяют для исследования коррозии и износа, для определения расхода различных материалов, скорости и длительности протекания технологических процессов.

Гамма-излучение находит широкое применение в медицине, как в диагностических целях, так и для лечения заболеваний.

Белорусский физик Владимир Григорьевич Барышевский (Белорусский государственный университет) сделал ряд открытий в ядерной физике, связанных с проявлением спиновых эффектов нейтронов, гамма-квантов, и является одним из основателей ядерной оптики поляризованных сред.



В 1903 г. Анри Беккерель, Пьер Кюри и Мария Склодовская-Кюри получили Нобелевскую премию по физике. Беккерель — в «знак признания выдающихся заслуг, выразившихся в открытии самопроизвольной радиации». Пьер Кюри и Мария Склодовская-Кюри — «в знак признания... их совместных исследований явлений радиации, открытых профессором Анри Беккерелем».

В 1908 г. Э. Резерфорду была присуждена Нобелевская премия по химии «за проведенные им исследования в области распада элементов в химии радиоактивных веществ».

В 1911 г. Нобелевскую премию по химии вручили Марии Склодовской-Кюри «за выдающиеся заслуги в развитии химии: открытие элементов радия и полония, выделение радия и изучение природы и соединений этого замечательного элемента».

В 1921 г. Фредерику Содди была присуждена Нобелевская премия по химии «за вклад в химию радиоактивных веществ». В 1938 г. Энрико Ферми был удостоен Нобелевской премии по физике «за выдающиеся теоретические и экспериментальные открытия в области ядерной физики».

В 1945 г. В. Паули был награжден Нобелевской премией по физике «за открытие принципа запрета».

В 1995 г. Ф. Райнес был удостоен Нобелевской премии по физике за открытие электронного антинейтрино.



1. Что называют радиоактивностью? Какие экспериментальные данные свидетельствуют о том, что радиоактивность — ядерный процесс?
2. Какие нуклиды называют стабильными, а какие — радиоактивными?
3. Перечислите свойства и объясните природу α -, β - и γ -излучения.
4. Какое из трех типов излучений (α , β или γ) обладает наибольшей проникающей способностью?
5. Сформулируйте и запишите правила смещения для α - и β -распада. Охарактеризуйте их особенности.
6. Охарактеризуйте особенности γ -излучения.



Упражнение 24

1. Ядро тория ${}_{90}^{230}\text{Th}$ превратилось в ядро радия ${}_{88}^{226}\text{Ra}$. Какую частицу испустило ядро тория?
2. Покажите, что самопроизвольный распад ${}_{6}^{11}\text{C} \rightarrow {}_{5}^{10}\text{B} + {}_{1}^{1}\text{p}$ невозможен, так как в этом случае нарушался бы закон сохранения энергии.
3. Покажите, что ядро нуклида бериллия ${}_{4}^{8}\text{Be}$ ($m_{\text{Be}} = 8,005308$ а.е.м.) нестабильно и может распасться на две α -частицы.
4. При бомбардировке нуклида алюминия ${}_{13}^{27}\text{Al}$ α -частицами получается радиоактивный нуклид фосфора ${}_{15}^{30}\text{P}$, ядро которого затем распадается с выделением позитрона (${}_{+1}^{0}\text{e}$). Напишите уравнения обеих реакций.
5. Ядро кислорода ${}_{8}^{19}\text{O}$ испытывает β^{-} -распад. Напишите уравнение реакции.
6. Ядро полония ${}_{84}^{210}\text{Po}$ испытывает α -распад. Напишите уравнение реакции.



§ 39. Закон радиоактивного распада

- При всем разнообразии реакций самопроизвольного (спонтанного) распада ядер в этом процессе наблюдается общая закономерность, которую можно описать математически. Интересно, что зависимость количества распавшихся ядер от времени задается одной и той же функцией для различных ядер, участвующих в распаде. Перейдем к количественному описанию процессов радиоактивного распада.

Большинство изотопов любого химического элемента превращается в более устойчивые изотопы путем радиоактивного распада. Каждый радиоактивный элемент распадается со своей, присущей только ему «скоростью». При этом для каждого радиоактивного ядра существует характерное время, называемое *периодом полураспада* $T_{1/2}$, спустя которое в исходном состоянии остается половина имевшихся ядер. Таким образом, *периодом полураспада* $T_{1/2}$ называется *промежуток времени, за который распадается половина начального количества N_0 радиоактивных ядер*. Другая половина ядер превращается в более устойчивые изотопы посредством распада.

Отметим, что период полураспада не зависит от того, в каком состоянии находится вещество: твердом, жидком или газообразном. Кроме того, период полураспада радиоактивного вещества не зависит от его количества, от времени, места и условий, в которых оно находится. Поэтому количество радиоактивных ядер «тогда» N_1 и «сейчас» N_2 непосредственно определяет промежуток времени $\tau = t_2 - t_1$, прошед-

ший с момента уменьшения числа ядер от N_1 до N_2 .

Невозможно точно предсказать, когда произойдет распад данного ядра. Однако можно оценить среднее число ядер, которые распадутся за данный промежуток времени. Таким образом, закон радиоактивного распада является статистическим и он справедлив только при достаточно большом количестве радиоактивных ядер.

Для записи закона радиоактивного распада будем считать, что в начальный момент времени ($t = 0$) число радиоактивных ядер N_0 . Через промежуток времени, равный периоду полураспада, это число будет $\frac{N_0}{2}$, еще через такой же промежуток времени — $\frac{N_0}{4}$ (рис. 218). Спустя промежуток времени, равный n периодам полураспада ($t = nT_{1/2}$), радиоактивных ядер останется:

$$N(t) = N_0 \frac{1}{2^n} = N_0 \cdot 2^{-n} = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}. \quad (1)$$

Это соотношение выражает **закон радиоактивного распада**, который можно сформулировать следующим образом:

число нераспавшихся радиоактивных ядер убывает с течением времени по закону, представленному соотношением (1).

Закон радиоактивного распада позволяет найти число нераспавшихся ядер в любой момент времени. Полученное выражение хорошо описывает распад радиоактивных ядер, если их количество достаточно велико.

Приведем экспериментальные результаты, которые показывают, что при малом количестве радиоактивных ядер это выражение неприменимо. На рисунке 219 изображен график распада

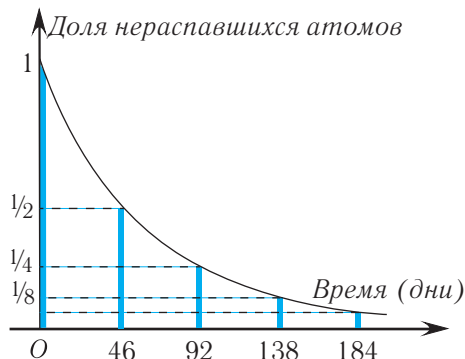


Рис. 218. Радиоактивный распад нуклида железа $^{59}_{28}\text{Fe}$

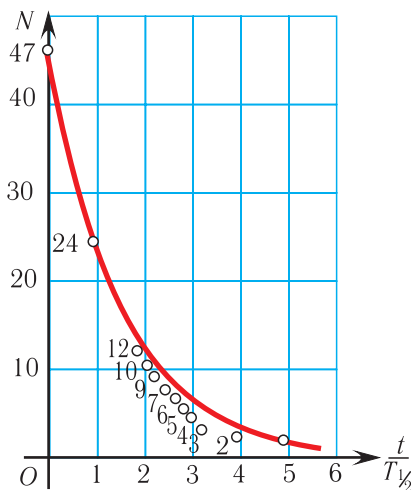


Рис. 219. Число нераспавшихся ядер $^{256}_{100}\text{Fm}$ в зависимости от времени

47 ядер изотопа фермия ${}_{100}^{256}\text{Fm}$, период полураспада которого $T_{1/2} = 3,5$ ч. Из рисунка 219 видно, что пока ядер было достаточно много — от 47 до 12, то показательная функция хорошо описывала закон распада. Однако при меньшем числе ядер истинная зависимость существенно отличается от показательной функции.

Периоды полураспада некоторых радиоактивных изотопов веществ приведены в таблице 11.

Таблица 11. Периоды полураспада радиоактивных изотопов веществ

Вещество	Период полураспада	Вещество	Период полураспада
${}_{55}^{137}\text{Cs}$	30,17 лет	${}_{86}^{226}\text{Ra}$	1600 лет
${}_{27}^{60}\text{Co}$	5,3 года	${}_{84}^{222}\text{Rn}$	3,8 суток
${}_{53}^{131}\text{I}$	8,04 суток	${}_{92}^{235}\text{U}$	700 млн лет
${}_{94}^{239}\text{Pu}$	24 390 лет	${}_{92}^{238}\text{U}$	4,5 млрд лет



► В 1943 г. венгерскому ученому Дьердь фон Хевеши была присуждена Нобелевская премия по химии «за работу по использованию изотопов в качестве меченых атомов при изучении химических процессов».



1. В чем заключается закон радиоактивного распада? Каков характер этого распада?
2. Что называют периодом полураспада радиоактивного вещества? Что он характеризует?
3. Сколько времени необходимо, чтобы распалась половина атомов радиоактивного вещества?
4. Почему на Земле до сих пор не распались все радиоактивные ядра?

Упражнение 25

1. За промежуток времени t начальное количество некоторого радиоактивного изотопа уменьшилось в $k_1 = 2,0$ раза. Во сколько k_2 раз оно уменьшится за промежуток времени $t_1 = 2t$?

2. Какая доля ядер изотопа германия ${}^{68}_{32}\text{Ge}$ с периодом полураспада $T_{1/2} = 270$ сут сохранится через промежуток времени $t = 4,5$ года?
3. Период полураспада стронция ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ $T_{1/2} = 29$ лет. Сколько времени понадобится для того, чтобы из образца массой $m = 1,0$ г осталось $(1/32)$ г?
4. Определите число атомов, содержащихся в свинце ${}^{210}_{82}\text{Pb}$ массой $m = 0,632$ г. Сколько атомов останется через $\Delta t = 95$ лет, если период полураспада $T_{1/2} = 19$ лет?
5. Определите массу m_1 нераспавшегося радиоактивного вещества по истечении суток, если вначале его масса была $m = 1,0$ кг. Период полураспада вещества $T_{1/2} = 12$ часов.



§ 40. Деление тяжелых ядер. Цепные ядерные реакции

Открытие деления урана означало появление нового вида топлива — самой массы материи.

Д. Юз

■ Особое место среди ядерных реакций занимают цепные ядерные реакции деления, которые привели к созданию, с одной стороны, новых источников энергии, а с другой — к появлению нового типа оружия, обладающего колоссальной мощностью. Выясним основные закономерности данного типа реакций и условия их возникновения.



Энергия, высвобождающаяся при ядерной реакции, называется энергетическим выходом ядерной реакции.

Особый тип ядерных реакций представляют ядерные реакции деления элементов, расположенных в конце периодической системы химических элементов. В результате таких реакций выделяется огромное количество энергии. Почему это происходит?

Обратимся к графику, изображенному на рисунке 211 (§ 37). Для тяжелых ядер, например таких как ${}^{235}_{92}\text{U}$, энергия связи, приходящаяся на нуклон, составляет величину 7,6 МэВ. Если двигаться вдоль кривой на графике зависимости энергии связи от ${}^{235}_{92}\text{U}$ к месту, где находятся ядра химических элементов из середины периодической системы элементов Менделеева, то видно, что энергия связи возрастает от ~7,5 МэВ до ~8,8 МэВ на нуклон.