

Стало быть,

$$1 \text{ атомная единица энергии} = \frac{c^2}{N_{\text{Ав}} e_{\text{кул}}} \cdot 10^{-7} \text{ эв.}$$

Подставляя сюда $c=2,9979 \cdot 10^{10}$ см/сек и заряд Фарадея (для $N_{\text{Ав}}$ в физической шкале $N_{\text{Ав}} e_{\text{кул}}=96\,522$ кулонам), получаем:

$$1 \text{ атомная единица энергии} = 931,15 \text{ Мэв.} \quad (2)$$

Таким образом, применяя атомные единицы массы и выражая энергию в Мэв, закон пропорциональности массы и энергии можем записать так:

$$E_{\text{Мэв}} = 931,15 m \text{ ат. ед.} \quad (3)$$

Заметим, что из соотношения (1) следует:

$$1 \text{ Мэв} = 1,602 \cdot 10^{-6} \text{ эрг} = 3,83 \cdot 10^{-17} \text{ ккал.}$$

§ 87. Радиоактивный распад ядер. Закон радиоактивного смещения. Изомеры.

Основой теории радиоактивного распада является предположение, что этот процесс происходит спонтанно (самопроизвольно), как следствие неустойчивости ядер, и подчиняется статистическим законам. При радиоактивном распаде или, как говорят иначе, при радиоактивном превращении происходит изменение строения и состава исходного ядра, причем это изменение совершается внезапно в момент, определяемый какими-то внутриядерными причинами. Для отдельного неустойчивого ядра, не зная деталей внутриядерных движений, мы не можем предсказать момент, когда произойдет радиоактивное превращение этого ядра. Но по закону больших чисел в среднем за единицу времени в любом радиоактивном веществе распадается вполне определенная, характерная для данного радиоактивного вещества доля атомов. Так, из биллиона (10^{12}) атомов радия каждую секунду распадается приблизительно 14 атомов.

Мерой быстроты радиоактивного превращения служит промежуток времени, в течение которого распадается половина атомов любого количества элемента. Этот промежуток времени называют *периодом полураспада*.

Для радия указанное выше число каждую секунду распадающихся атомов соответствует периоду полураспада в 1590 лет. Радон (эманация радия) распадается приблизительно в 150 000 раз быстрее, чем радий: из миллиона атомов в секунду распадается примерно два; период полураспада равен 3,8 дня.

Вероятность λ того, что отдельный нестабильный атом испытает радиоактивное превращение в единицу времени, не изменяется со временем, но является величиной, различной для разных радиоактивных атомов. Величину λ называют иначе *радиоактивной*

Массы атомов некоторых элементов

Атом	Масса	Атом	Масса	Атом	Масса
n^1	1,008985	F ¹⁷	17,007506	S ³⁵	34,980085
H ¹	1,008145	F ¹⁸	18,006646	S ³⁶	35,978440
H ²	2,014735	F ¹⁹	19,004448	S ³⁷	36,982050
H ³	3,017005	F ²⁰	20,006340		
He ³	3,016986	Na ²¹	21,004281	Cl ³²	31,996180
He ⁴	4,003873	Na ²²	22,001404	Cl ³⁵	32,987744
He ⁵	5,013564	Na ²³	22,997053	Cl ³⁴	33,984570
He ⁶	6,020831	Na ²⁴	23,998664	Cl ³⁶	34,979905
		Na ²⁵	24,997781	Cl ³⁸	35,979688
Lj ⁶	6,017034			Cl ³⁷	36,977540
Lj ⁷	7,018232	Mg ²³	23,001453	Cl ³⁸	37,979965
Li ⁸	8,025033	Mg ²⁴	23,992640	Cl ³⁹	38,979820
		Mg ²⁵	24,993752		
Be ⁷	7,019159	Mg ²⁶	25,990798	K ³⁷	36,985000
Be ⁹	8,007856	Mg ²⁷	26,992868	K ³⁸	37,981100
Be ⁹	9,015046			K ³⁹	38,976037
Be ¹⁰	10,016716	Al ²⁴	24,007691	K ⁴⁰	39,976653
		Al ²⁶	24,998312	K ⁴¹	40,974760
B ⁹	9,015206	Al ²⁶	25,995120	K ⁴²	41,975830
B ¹⁰	10,016119	Al ²⁷	26,990081	K ⁴³	42,974330
B ¹¹	11,012795	Al ²⁸	27,990771	K ⁴⁴	43,975900
B ¹²	12,018168	Al ²⁹	28,989925		
				Ca ³⁹	38,983400
C ¹⁰	10,020240	Si ²⁷	26,995265	Ca ⁴⁰	39,975230
C ¹¹	11,014922	Si ²⁸	27,985775	Ca ⁴¹	40,975230
C ¹²	12,003803	Si ²⁹	28,985660	Ca ⁴²	41,971890
C ¹³	13,007478	Si ³⁰	29,983252	Ca ⁴³	42,972350
C ¹⁴	14,007687	Si ³¹	30,985153	Ca ⁴⁴	43,969340
C ¹⁵	15,014162	Si ³²	31,984134	Ca ⁴⁵	44,970350
				Ca ⁴⁷	46,969460
N ¹²	12,022776	P ²⁹	28,990994	Ca ⁴⁸	47,967700
N ¹²	13,009864	P ³⁰	29,987885	Ca ⁴⁹	48,971160
N ¹⁴	14,013069	P ³¹	30,983561		
N ¹⁵	15,004862	P ³²	31,984028	Fe ⁵²	51,964210
N ¹⁶	16,011171	P ³³	32,982156	Fe ⁵³	52,962250
		P ³⁴	33,984120	Fe ⁵⁴	53,956640
				Fe ⁵⁵	54,955646
O ¹⁵	15,007767	S ³¹	30,989405	Fe ⁵⁶	55,952640
O ¹⁶	16,000000	S ³²	31,982196	Fe ⁵⁷	56,953420
O ¹⁷	17,004534	S ³³	32,981889	Fe ⁵⁸	57,951470
O ¹⁸	18,004855	S ³⁴	33,978640	Fe ⁵⁹	58,953615
O ¹⁹	19,009591				

постоянной или константой радиоактивного распада. Вероятность того, что неустойчивый атом испытает радиоактивное превращение за промежуток времени dt , пропорциональна этому промежутку и равна λdt . По закону больших чисел эта вероятность определяет долю атомов, распадающихся за время dt :

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

Здесь знак минус указывает, что dN есть величина отрицательная, так как число нераспавшихся атомов N со временем убывает.

Интегрируя полученное уравнение и обозначая начальное число атомов через N_0 , получаем *статистический закон радиоактивного распада*

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (4)$$

Рассматривая это уравнение для момента времени, равного периоду полураспада, когда $N = \frac{1}{2} N_0$, находим:

$$\lambda T = -\ln \frac{1}{2} = 0,69315,$$

т. е.

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}, \quad (5)$$

или приближенно

$$T \approx \frac{0,7}{\lambda}.$$

Величина, обратная вероятности радиоактивного превращения, определяет *среднюю продолжительность жизни радиоактивного атома*

$$\tau = \frac{1}{\lambda}. \quad (6)$$

Действительно, согласно дифференциальному уравнению, из которого получается формула (4), за время от t до $t+dt$ распадается $dN = \lambda N dt$ атомов, где N есть число еще не распавшихся к моменту t атомов. Сумма продолжительностей их жизни равна $t\lambda N dt$, а суммарная продолжительность жизни всех N_0 атомов, имевшихся в момент $t=0$, равна интегралу от указанной величины, взятому в пределах от $t=0$ до $t=\infty$. Стало быть, средняя продолжительность жизни атома равна

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t\lambda N dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}.$$

Сопоставляя выражения (5) и (6), мы видим, что *средняя продолжительность жизни радиоактивных атомов приблизительно в 1,5 раза превышает период полураспада, точнее:*

$$\tau = \frac{T}{\ln 2}.$$

Может оказаться, что продукты радиоактивного распада в свою очередь будут радиоактивными. Например, атом радия, испустив одну α -частицу, превращается в атом самого тяжелого из инертных газов — радона (эманация радия); радон, как уже упоминалось, еще менее устойчив, чем радий; период его полураспада меньше 4 дней. Испустив в свою очередь одну α -частицу, атом радона превращается в нестабильный атом радия А, который после излучения еще одной α -частицы превращается в радий В — изотоп свинца с массовым числом 214 (тогда как массовое число наиболее распространенного в природе свинца 207). Радий В подвергается дальнейшему распаду (обзор получающихся таким образом *радиоактивных рядов* дан ниже).

При длительном соприкосновении продукта радиоактивного распада с «материнским элементом», породившим его, со временем устанавливается *радиоактивное равновесие*, заключающееся в том, что в единицу времени распадается такое же количество атомов вторичного радиоактивного элемента, какое за то же время образуется вследствие распада материнского элемента. При радиоактивном равновесии количество радиоактивных продуктов распада остается неизменным до тех пор, пока заметно не уменьшится количество материнского элемента.

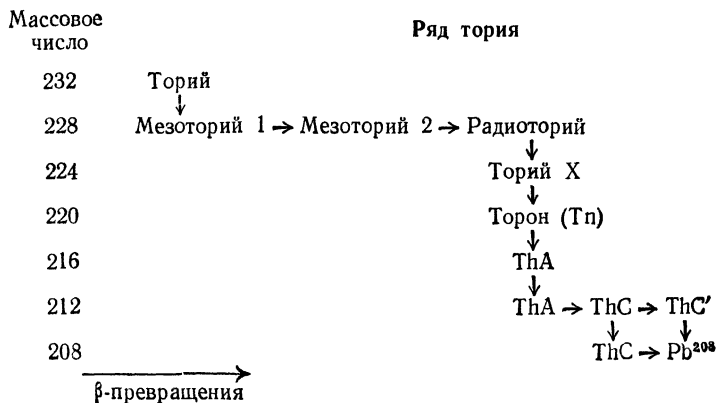
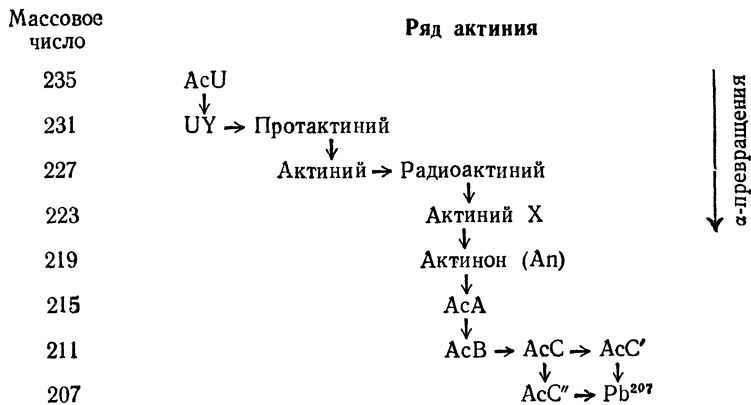
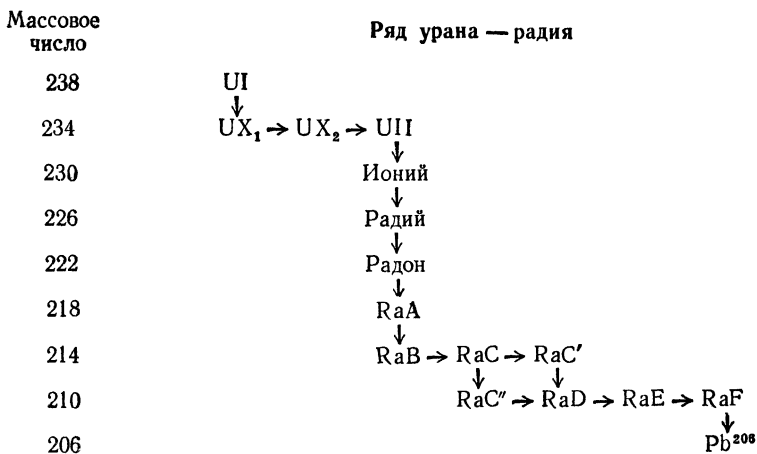
Например, для 1 г радия равновесным является количество радона, равное $6,51 \cdot 10^{-6}$ г. В 1 г радия каждую секунду распадается $3,7 \times 10^{10}$ атомов. Число атомных распадов, происходящих в 1 г радия (или в $6,51 \cdot 10^{-6}$ г радона), равно $3,7 \cdot 10^{10}$, принимают за единицу радиоактивности, которую называют *кюри*. Термином «кюри» пользуются также для обозначения такого весового количества радиоактивного вещества, в котором каждую секунду происходит столько же распадов, как в 1 г радия или в $6,51 \cdot 10^{-6}$ г радона¹⁾.

В последнее время все чаще стали применять другую единицу радиоактивности — *резерфорд* (сокращенно rd), которая соответствует одному миллиону распадов в секунду. Очевидно, что 1 резерфорд = $\frac{1}{37}$ милликюри ≈ 27 микрокюри = 10^6 атомн. расп./сек.

Большинство радиоактивных элементов принадлежит к семействам урана и тория и к ответвлениям от этих семейств. Обзор радиоактивных семейств дан в помещенных ниже таблицах:

¹⁾ Иногда сокращенно кюри обозначают Ci (или C); в тысячу и в миллион раз меньшие числа распадов в секунду (или количеств радия и радона) — милликюри и микрокюри — обозначают соответственно через mCi (или mC) и μ Ci (или μ C).

Радиоактивность воздуха и минеральных вод вызывается главным образом содержащимся в них радоном. При оценке радиоактивности минеральных вод и воздуха за единицу концентрации радона принимают содержание 10^{-10} кюри в 1 л жидкости или газа; эту единицу концентрации радона называют *эман* и обозначают через E (ранее в качестве единицы концентрации радона применяли единицу *Махе*, равную 3,46 *эман*). Очевидно, что 1 *эман* означает 3,7 атомного распада в секунду в литре жидкости или газа,



Специальное обозначение и схема распада \Downarrow означает α -распад \rightarrow β -распад	Общее обозначение	T — период полу- распада
	${}_{92}\text{U}^{238}$	4,50 · 10 ⁹ лет
	${}_{90}\text{Th}^{234}$	24,5 дня
	${}_{91}\text{Pa}^{234}$	1,14 мин.
	${}_{91}^*\text{Pa}^{234}$	6,7 часа
	${}_{92}\text{U}^{234}$	2,67 · 10 ⁵ лет
	${}_{90}\text{Io}^{230}$	8,5 · 10 ⁴ лет
	${}_{88}\text{Ra}^{226}$	1620 лет
	${}_{86}\text{Rn}^{222}$	3,825 дня
	${}_{84}\text{Po}^{218}$	3,05 мин.
	${}_{82}\text{Pb}^{214}$	26,8 мин.
	${}_{83}\text{Bi}^{214}$	19,7 мин.
	${}_{81}\text{Tl}^{210}$	1,32 мин.
	${}_{84}\text{Po}^{214}$	1,5 · 10 ⁻⁴ сек
	${}_{82}\text{Pb}^{210}$	22,1 года
	${}_{83}\text{Bi}^{210}$	5,02 дня
	${}_{84}\text{Po}^{210}$	138 дн.
${}_{82}\text{Pb}^{208}$	—	

На — радия

λ — постоянная распада в сек^{-1}	Энергия излучения в $M\text{эв}$	Масса в равновесии с 1 $\mu\text{ Ra}$ (до черты) или 1 $\mu\text{ Ra}$ (ниже черты) в g
$5 \cdot 10^{-13}$	4,15 (α)	1,00
$3,275 \cdot 10^{-7}$	0,130; 0,30 (β)	$1,5 \cdot 10^{-11}$
$1,03 \cdot 10^{-2}$	1,52; 2,32 (β)	$5 \cdot 10^{-16}$
$2,87 \cdot 10^{-5}$	0,23; 0,56; 1,55 (β)	$6 \cdot 10^{-16}$
$8,2 \cdot 10^{-14}$	4,763 (α)	$2,5 \cdot 10^{-4}$
$2,55 \cdot 10^{-13}$	4,66 (α)	—
$1,35 \cdot 10^{-11}$	4,79 (α)	1,00
$2,097 \cdot 10^{-6}$	5,486 (α)	$6,6 \cdot 10^{-6}$
$3,78 \cdot 10^{-3}$	5,998 (α)	$3,62 \cdot 10^{-9}$
$4,31 \cdot 10^{-4}$	0,65 (β)	$3,20 \cdot 10^{-8}$
$5,86 \cdot 10^{-4}$	5,502 (α); 3,15 (β)	$2,34 \cdot 10^{-8}$
$8,75 \cdot 10^{-3}$	1,80 (β)	$1,6 \cdot 10^{-9}$
$4,6 \cdot 10^3$	7,680 (α)	$1,37 \cdot 10^{-1}$
$1,00 \cdot 10^{-9}$	0,0292 (β)	$1 \cdot 10^{-2}$
$1,61 \cdot 10^{-6}$	1,17 (β)	$8,6 \cdot 10^{-6}$
$5,74 \cdot 10^{-3}$	5,297 (α)	$2,3 \cdot 10^{-4}$
—	—	—

В этих таблицах элемент — продукт распада — помещен под материнским, когда радиоактивное превращение обусловлено α -распадом; массовое число возникающего при этом дочернего элемента отличается от массового числа материнского элемента на 4 единицы. При β -превращении массовое число не изменяется; в этих случаях дочерний элемент помещен рядом с материнским.

Радиоактивное превращение приводит к изменению химических свойств, которое может быть предугадано на основе закона смещения, установленного в 1913 г. Фаянсом. Если мы представим себе всю периодическую систему элементов Менделеева развернутой в один ряд, то, согласно закону смещения, при α -превращении образуется элемент, стоящий в периодической системе на два места ближе к началу системы, а при β -превращении — элемент, стоящий на одно место дальше материнского элемента. Если заряд электрона принять за единицу, то α -превращение означает уменьшение заряда ядра на две единицы (α -частица несет двойной положительный заряд); β -превращение равносильно увеличению положительного заряда на единицу. Последовательное испускание одной α -частицы и двух β -частиц приводит, следовательно, к элементу с тем же зарядом ядра, т. е. с тем же атомным номером, что и исходный элемент, но с массовым числом, на 4 единицы меньшим.

При α -превращении ядро утрачивает два протона и два нейтрона (из которых складывается α -частица). При β -превращении один из внутриядерных нейтронов превращается в протон, что и увеличивает заряд ядра на единицу. По закону сохранения алгебраической суммы зарядов превращение нейтрона в протон должно сопровождаться возникновением электрона, излучаемого ядром.

Во втором столбце таблицы, содержащей сведения о периодах полураспада и постоянных распада для семейств урана — радия, указаны атомные номера радиоактивных изотопов, определяющие их положение в периодической системе; эти атомные номера получаются из предыдущей таблицы применением закона смещения.

В приведенных таблицах следует обратить внимание на случаи, когда один материнский элемент имеет два различных продукта распада. Так, из U_{III} путем α -излучения образуются ионий и U_{IV} . Из RaC при β -превращении образуется RaC' , а при α -превращении образуется RaC'' . Такой радиоактивный распад называют двойственным. Из 10 000 радиоактивно распадающихся атомов RaC 9997 превращаются в RaC' и только три — в RaC'' .

Далее из приведенных таблиц мы видим, что уран X_2 и уран Z имеют одинаковые атомные номера и одинаковые массовые числа (атомный номер 91 и массовое число 234). Стало быть, уран X_2 и уран Z имеют тождественный состав ядер. Тем не менее, эти два радиоактивных изотопа протактиния не вполне идентичны по своим свойствам: один из них имеет период полураспада 6,7 часа, другой — 1,14 минуты. Неодинаковые периоды полураспада и разли-

чие энергий, излучаемых при распаде электронов, указывают на то, что, хотя ядра урана X_2 и урана Z тождественны по составу, состояния внутриядерных движений нуклонов у них различны (§ 93); одно из этих ядер более устойчиво, чем другое. Такие атомы (с равными атомными номерами и равными массовыми числами, но несколько различающиеся по физическим свойствам — в основном степенью устойчивости ядра) называют *изомерами*. Это название заимствовано из химии, где изомерами называют вещества одинакового состава, различающиеся пространственным расположением атомов внутри молекулы. В настоящее время известно свыше 100 пар изомерных ядер.

§ 88. Альфа-лучи. Потери энергии на ионизацию. Квантовомеханическое объяснение альфа-радиоактивности

Вследствие статистического характера радиоактивных превращений интенсивность α -лучей не вполне постоянна, что легко заметить, применяя сплутарископ или счетчик Гейгера (§ 55). Так, если подсчитывать в течение равных промежутков времени сцинтилляции, вызываемые на экране α -частицами, испускаемыми каким-либо радиоактивным препаратом, то обнаруживается постоянное колебание числа сцинтилляций около некоторого среднего значения. Чем короче промежутки времени, тем резче эти флуктуационные отклонения числа атомных распадов за данный промежуток времени от среднего числа. На рис. 346 по оси абсцисс отложено число сцинтилляций, замеченных в течение 15 сек, а по оси ординат отложена частота повторяемости групп: 200 раз было наблюде-но только по 1 сцинтилляции за 15 сек, 400 по 2 и т. д. Изображенная на рис. 346 кривая совпадает с обычной кривой распределения случайных событий.

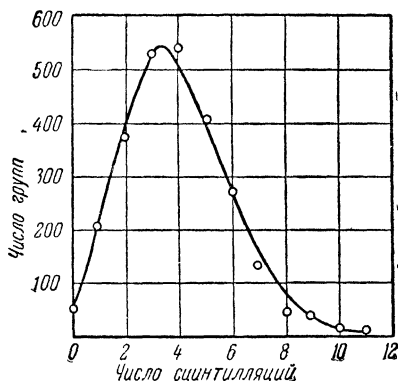


Рис. 346. Флуктуации числа испускаемых альфа-частиц.

Исследуя α -излучение на различных небольших расстояниях от радиоактивного препарата, нетрудно обнаружить, что ионизирующее и другие действия α -лучей резко обрываются на некотором характерном для каждого радиоактивного вещества расстоянии порядка нескольких сантиметров; это расстояние называют *пробегом* α -частиц.