

возможно также образование рассеянного кванта с энергией $h\nu'$ (рис. 351).

Хотя присутствие ядра и необходимо для того, чтобы образование пары электрон-позитрон могло произойти, однако в обмене энергии ядро заметного участия не принимает; чаще всего остаток энергии кванта ($h\nu - 1,02 \text{ Мэв}$) делится поровну между кинетическими энергиями электрона и позитрона.

Фотоны, энергия которых меньше $1,02 \text{ Мэв}$, не могут вызывать появления пар. Этим объясняется аномальное поглощение γ -лучей, наблюдаемое, когда энергия фотонов превышает $1,1 \text{ Мэв}$. Для γ -лучей большой энергии поглощение фотонов, связанное с образованием пар, оказывается более значительным, чем поглощение вследствие комптоновского рассеяния и фотоэффекта.

Как будет пояснено в § 97, доказано, что в поглощении космических лучей образование электронно-позитронных пар играет весьма важную роль.

§ 92. Индуцированная позитронная и электронная радиоактивность. Фоторасщепление ядер. К-захват

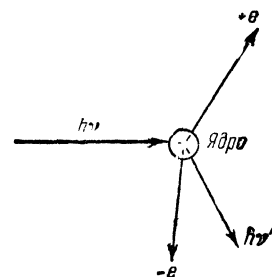
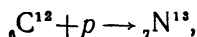


Рис. 351. Образование пары электрон-позитрон с рассеянием энергии γ -фотона.

В начале 30-х годов (всего в течение 3 лет — в 1932—1934 гг.), кроме открытия нейтронов, позитронов и процессов взаимопревращения γ -фотонов и электронно-позитронных пар, было сделано еще одно важнейшее открытие. Именно в 1933—1934 гг. супруги Кюри-Жолио, а вслед за ними другие физики установили, что *распад ядер происходит не только во время облучения элемента потоком α -частиц, протонов, нейтронов или дейтонов, но и после облучения (когда облучение прекращено), в продолжение более или менее значительного промежутка времени — порядка минут, часов или даже дней.* Кюри-Жолио, Ферми и другие ученые установили, что при облучении элементов α -, p -, n - или d -лучами возникают новые радиоактивные изотопы, распадающиеся по тем же законам, что и естественные радиоактивные вещества и испускающие в процессе распада электроны или позитроны и γ -фотоны. Это явление получило название *индуцированной или искусственной радиоактивности.*

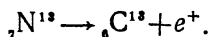
Например, можно получить радиоактивный изотоп азота (р а д и о з о т) N^{13} . Для этого нужно в течение некоторого времени подвергать бор бомбардировке α -частицами или же бомбардировать углерод быстрыми протонами. В последнем случае происходит пре-



а в первом ядро бора ${}_5\text{B}^{10}$ поглощает α -частицу и испускает нейтрон:

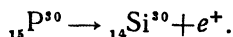


Образующийся в этих реакциях радиоазот ${}_7\text{N}^{13}$ испускает быстрые позитроны (β^+ -лучи) и превращается в устойчивый изотоп углерода:

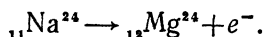


Активность радиоазота, как и любого естественного радиоактивного вещества, уменьшается со временем по экспоненциальному закону (4), убывая наполовину за 10 минут.

Аналогично бомбардируя алюминий α -частицами, выбивающими из ядер нейтроны, получают радиоактивный изотоп фосфора — р а д и о ф о с ф о р ${}_{15}\text{P}^{30}$. Радиофосфор, испуская β^+ -лучи с периодом полураспада около $2\frac{1}{2}$ мин., превращается в устойчивый изотоп кремния:



При бомбардировке натрия Na^{23} быстрыми дейтонами образуется после выброса из ядра протона радиоактивный изотоп натрия — р а д и о н а т р и й Na^{24} . Радионатрий имеет период полураспада около 15 час. и превращается, испуская β^- -лучи, в устойчивый изотоп магния Mg^{24} :



Тот же радиоактивный изотоп натрия Na^{24} получается при облучении натрия Na^{23} нейтронами. В этом случае, в отличие от приведенных примеров, проникновение бомбардирующей частицы в ядро не приводит к выбросу из него другой частицы и весь процесс превращения заключается в захвате нейтрона ядром Na^{23} ; образующееся возбужденное ядро Na^{24} отдает избыток энергии, испуская γ -фотон; такие превращения называют *радиационным захватом нейтрона*.

За последние годы получено более 500 радиоактивных изотопов элементов. Большинство из них испускает β^- -лучи, около 100 испускают β^+ -лучи; многие радиоактивные изотопы вслед за выбросом электрона или позитрона излучают γ -фотоны.

Некоторые радиоактивные изотопы были получены при облучении стабильных элементов не потоком частиц, а γ -лучами. Превращение элементов в результате поглощения ядром γ -фотона большой энергии (*фоторасщепление ядра*, или *ядерный фотоэффект*) впервые обнаружил Чадвик в 1934 г. Облучая γ -лучами тория тяжелый водород, Чадвик установил, что поглощение γ -фотона (с энергией $h\nu$ около $2,2 \text{ Мэв}$) переводит ядро тяжелого водорода — дейтон — в возбужденное состояние, которое является неустойчивым и завершается распадом на протон и нейтрон.

Поглощение γ -фотона ядром бериллия ${}^9\text{Be}$ вызывает выброс из ядра протона, вследствие чего образуется радиоактивный изотоп лития ${}^8\text{Li}$.

Для фоторасщепления более тяжелых ядер требуются γ -фотоны, имеющие энергию порядка 10—15 Мэв и более. При облучении различных элементов такими фотонами происходит выброс из ядер нейтронов или протонов и образуется радиоактивный изотоп. Поглощение γ -фотонов с энергией порядка 100 Мэв приводит к освобождению из ядер нескольких частиц.

Следует отметить, что, в отличие от обычных для естественных радиоактивных веществ превращений одного из ядерных нейтронов в протон (т. е. β^- -превращений, которые всегда сопровождаются β^- -излучением), часто наблюдаемое при индуцированной радиоактивности противоположное превращение одного из ядерных протонов в нейтрон далеко не всегда сопровождается β^+ -излучением. Когда один из внутриядерных нейтронов превращается в протон, то при этом непременно возникает (согласно закону сохранения алгебраической суммы зарядов) электрон. Что же касается противоположного превращения одного из внутриядерных протонов в нейтрон, то этот процесс может происходить двояко: 1) с возникновением позитрона (тогда наблюдается β^+ -излучение) и 2) без возникновения позитрона с захватом ядром одного из ближайших к нему атомных электронов (тогда, понятно, нет β^+ -излучения). Так как ближайшими к ядру электронами являются электроны K -слоя (§ 60), то указанный вид радиоактивного превращения (протона в нейтрон) без β^+ -излучения называют K -захватом.

Поскольку при K -захвате освобождается место в K -слое, то в энергетическом отношении после K -захвата электронная оболочка атома оказывается в возбужденном состоянии. Возврат в нормальное состояние осуществляется в результате перехода одного из электронов внешних слоев на освободившееся место в K -слое, что, как известно, сопровождается возникновением характеристического рентгенова излучения K -серии. Кроме того, избыточная энергия ядра, образовавшегося после захвата электрона, уносится жестким γ -фотоном с энергией порядка 0,2—2 Мэв.

В некоторых случаях перестройка электронной оболочки с заполнением свободного места в K -слое происходит и без рентгенова излучения, за счет автоионизации атома; в этом случае избыток энергии оболочки уносится одним из ее электронов, причем выбираемый электрон имеет большую скорость (*эффект Ожсе*).

Превращения внутриядерных протонов в нейтроны в результате K -захвата (т. е. без излучения позитронов) наблюдаются у радиоактивных изотопов ванадия V^{49} , хрома Cr^{51} , марганца Mn^{54} , железа Fe^{55} и др.

В приведенной ниже таблице даны сведения о наиболее часто применяемых радиоактивных изотопах.

Радиоактивные изотопы, отличающиеся интенсивным излучением¹⁾

Элемент	Изотоп	Тип радиоактивности	Период полураспада	Максимальная энергия излучения в Мэв	
				β-лучи	γ-лучи
Углерод	C ¹¹	β+	20,5 мин.	0,95	
Азот	N ¹³	β+	9,93 мин.	0,92; 1,20	
Натрий	Na ²⁴	β ⁻ , γ	14,90 часа	1,39	2,76; 1,38
Магний	Mg ²⁷	β ⁻ , γ	10,2 мин.	0,79; 1,80	1,02
Кремний	Si ³¹	β ⁻	2,65 часа	1,8	
Фосфор	P ³²	β ⁻	14,30 дня	1,69	
Сера	S ³⁵	β ⁻	87,1 дня	0,168	
Хлор	Cl ³⁴	β ⁺ , γ	33,2 мин.	2,4; 5,1	3,4
	Cl ³⁸	β ⁻ , γ	37,3 мин.	1,11; 2,81;	1,57; 1,60; 2,15
				4,81	
Аргон	Ar ⁴¹	β ⁻ , γ	109 мин	1,5	1,29
Калий	K ⁴²	β ⁻ , γ	12,44 часа	2,07; 3,58	1,53
Кальций	Ca ⁴⁰	β ⁻ , γ	2,5 часа	2,3	0,8
Титан	Ti ⁴⁵	β ⁺ , γ	3,08 часа	1,2	0,51; 0,82
Марганец	Mn ⁵⁶	β ⁻ , γ	2,58 часа	0,75; 1,04;	0,845; 1,81
				2,86	
Железо	Fe ⁵⁹	β ⁻ , γ	48 дн.	0,257; 0,460	1,097; 1,295
Кобальт	Co ⁵⁶	β ⁺ , γ	18,2 часа	1,01; 1,50	0,477; 0,935;
					1,41
	Co ⁶⁰	β ⁻ , γ	5,27 года	0,30	1,172; 1,332
Никель	Ni ⁶⁵	β ⁻ , γ	2,56 часа	0,60; 1,01;	0,37; 1,12; 1,49
				2,10	
Цинк	Zn ⁶³	β ⁺ (K), γ	38,3 мин.	0,46; 1,40	0,96; 1,89; 2,60
				2,36	
Бром	Br ⁸²	β ⁻ , γ	35,9 часа	0,465	0,62
					(сл. спектр)
Рубидий	Rb ⁸⁸	β ⁻ , γ	17,8 мин.	5,1	1,85; 2,8
					(сл. спектр)
Стронций	Sr ⁹¹	β ⁻ , γ	9,7 часа	1,3; 3,2	1,3
Молибден	Mo ⁹⁹	β ⁻ , γ	68,3 часа	1,25	0,740
Серебро	Ag ¹¹⁰	β ⁻ , γ	270 дн.	2,86	1,5
Кадмий	Cd ¹¹⁵	β ⁻ , γ	2,2 дня	1,25	0,50
Иод	I ¹³¹	β ⁻ , γ	8,05 дня	0,687	0,284, 0,364;
					0,637
	I ¹³²	β ⁻ , γ	2,26 часа	1,0; 2,1	0,673
	I ¹³⁵	β ⁻ , γ	6,75 часа	1,4	1,27, 1,8
Цезий	Cs ¹³⁴	β ⁻ , γ	2,3 года	0,9	0,796
	Cs ¹³⁸	β ⁻ , γ	32,9 мин.	2,6	1,44
					(сл. спектр)
Барий	Ba ¹⁴⁰	β ⁻ , γ	12,8 дня	1,05	0,16; 0,537
Золото	Au ¹⁹⁸	β ⁻ , γ	2,69 дня	0,6; 0,97	0,412

¹⁾ Указаны только некоторые из них — преимущественно те, которые чаще применяются и имеют не слишком малые периоды полураспада.