

слабых взаимодействий. Одним из интереснейших следствий этой теории является двухкомпонентность нейтрино (см. п. 10).

Вторая часть теории β -распада основывается на известном (из первой части) β -распадом взаимодействию для отдельных нуклонов. Целью этой части является углубление знаний о структуре ядра. Для этой части интересны не разрешенные, а, наоборот, запрещенные переходы и вообще всевозможные отклонения характеристик распадов отдельных ядер от соответствующих характеристик распада свободного нуклона. Например, $0 - 0$ -переход



характеризуется значительно большей величиной $\lg fT_{1/2} = 7,9$, чем разрешенный переход. Довольно сильная (примерно в 10^4 раз) заторможенность β^+ -распада (6.86) вызвана нарушением правила отбора $\Delta T = 0$ по изоспину для разрешенных фермиевских переходов (см. (6.74)): изоспины ядер ${}_{31}\text{Ga}^{66}$ и ${}_{30}\text{Zn}^{66}$ равняются соответственно двум и трем.

По степени заторможенности перехода (6.86) можно определить степень чистоты изоспина в ядрах ${}_{31}\text{Ga}^{66}$ и ${}_{30}\text{Zn}^{66}$. Оказывается, что основным состоянием этих ядер можно приписать указанные выше изоспины с точностью до 10^{-4} .

Методами β -спектроскопии (обычно в соединении с γ -спектроскопией (см. § 6)) были установлены энергии, спины и четности большого количества уровней различных ядер.

§ 5. Радиоактивные ряды и трансурановые элементы

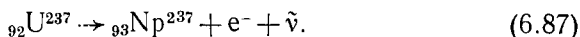
1. Все тяжелые ядра с массовым числом A , превышающим значение 209, нестабильны по отношению к α -распаду за счет возрастания относительной роли кулоновской энергии. Если массовое число ядра намного превышает граничное значение $A = 209$, то это ядро переходит в стабильное путем цепи нескольких последовательных распадов. Однако не все звенья в этой цепи будут α -распадами. Действительно, при каждом α -распаде массовое число A уменьшается на четыре, а атомный номер Z уменьшается на два, так что процент нейтронов в ядре возрастает. Но мы уже знаем (см. § 4), что стабильные относительно β -распада ядра при меньших A должны содержать не больший, а меньший процент нейтронов. Отсюда следует, что стабильное относительно α -распада тяжелое ядро после одного или нескольких последовательных α -распадов станет нестабильным по отношению к β -распаду. Поэтому в цепях распадов, или, как их называют, радиоактивных рядах, процессы α - и β -распадов чередуются друг с другом.

Массовое число A при β -распаде не меняется, а при α -распаде уменьшается на четыре. Поэтому остаток от деления массового числа на четыре одинаков для всех ядер одного и того же ряда. Таким образом, существуют четыре различных радиоактивных ряда. Радиоактивные ряды в настоящее время сами по себе большого интереса для ядерной физики не представляют. Но они имеют большое прикладное значение для ядерной техники, геологии, теории происхождения Земли и смежных с ними наук, поскольку в этих рядах есть изотопы, периоды полураспада которых сравнимы с временем жизни Солнечной системы, имеющим порядок 10^9 лет. Пере-

числим наиболее долгоживущие изотопы и их периоды полураспада для каждого из четырех рядов:

Ряд	Наиболее долгоживущий изотоп	$T_{1/2}$	Ряд	Наиболее долгоживущий изотоп	$T_{1/2}$
$A = 4n$ $A = 4n + 2$	${}_{90}\text{Th}^{232}$ ${}_{92}\text{U}^{238}$	$1,4 \cdot 10^{10}$ лет $4,5 \cdot 10^9$ лет	$A = 4n + 3$ $A = 4n + 1$	${}_{92}\text{U}^{235}$ ${}_{93}\text{Np}^{237}$	$7 \cdot 10^8$ лет $2,2 \cdot 10^6$ лет

Эти четыре изотопа называются начальными для каждого из радиоактивных рядов. Все остальные изотопы в каждом ряду имеют периоды полураспадов существенно меньшие, чем у начального изотопа ряда. Поэтому в любом материале, содержащем начальный изотоп ряда, через достаточно большое время установится вековое равновесие (см. § 2, п. 7) этого изотопа со всеми промежуточными продуктами распада. Из сравнения периодов полураспада начальных изотопов рядов с временем жизни Земли видно, что торий в Земле почти весь сохранился, уран ${}_{92}\text{U}^{238}$ распался лишь частично, а уран ${}_{92}\text{U}^{235}$ большей частью распался. Именно поэтому в земной коре очень много тория, а урана ${}_{92}\text{U}^{235}$ в 140 раз меньше, чем урана ${}_{92}\text{U}^{238}$. Изотоп нептуния ${}_{93}\text{Np}^{237}$ за время существования Земли распался практически весь. Поэтому четвертое радиоактивное семейство было исследовано гораздо позднее трех остальных, лишь после того, как техника получения искусственных изотопов достигла достаточно высокого уровня. Уже после освоения его искусственного синтеза изотоп ${}_{93}\text{Np}^{237}$ был обнаружен в ничтожных количествах в урановых рудах. Своим происхождением он обязан реакции ${}_{92}\text{U}^{238}$ (п, 2п) ${}_{92}\text{U}^{237}$ с последующим β^- -распадом:



Необходимые для этой реакции нейтроны получают в результате действия космических лучей, деления урана и некоторых других причин.

Последовательность распадов в каждом из радиоактивных рядов приведена в табл. 6.3. Радиоактивные ряды сыграли исключительно важную роль на начальном этапе развития ядерной физики, когда все методы изучения ядра были связаны с естественной радиоактивностью изотопов, входящих в первые три ряда. В те годы каждый изотоп получал свое персональное имя. Например, изотоп ${}_{92}\text{U}^{235}$ назывался актиноураном (AcU), изотоп ${}_{90}\text{Th}^{228}$ — радиоторием (RdTh), изотоп ${}_{82}\text{Pb}^{212}$ — торием В (ThV) и т. д. В табл. 6.3 приведены эти до сих пор часто употребляемые обозначения.

2. С 1940 г. началось последовательное изучение трансурановых элементов, т. е. элементов с $Z > 92$.

Таблица 6.3. Последовательность радиоактивных превращений в радиоактивных рядах

В скобках даны старые названия радиоактивных изотопов. Указаны типы превращений (α или β) и периоды полураспадов (д — дни; л, г — годы, м — минуты, с — секунды).

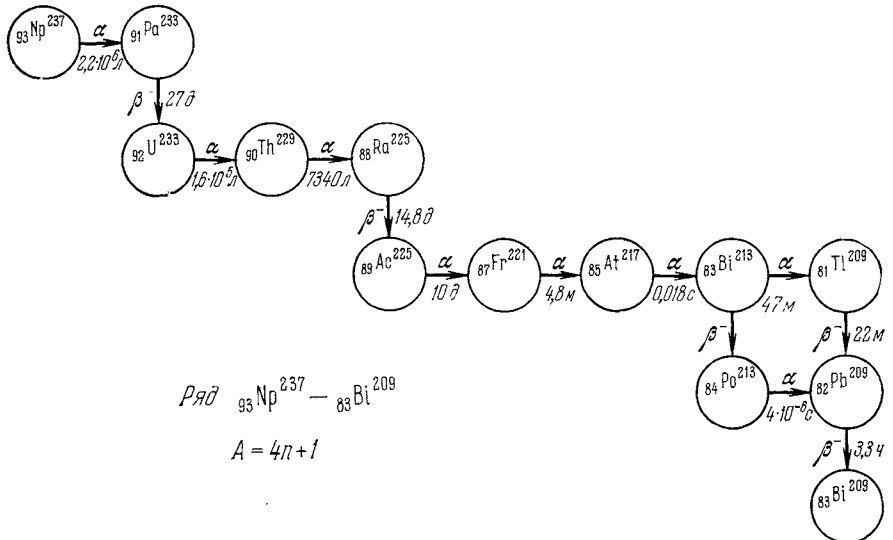
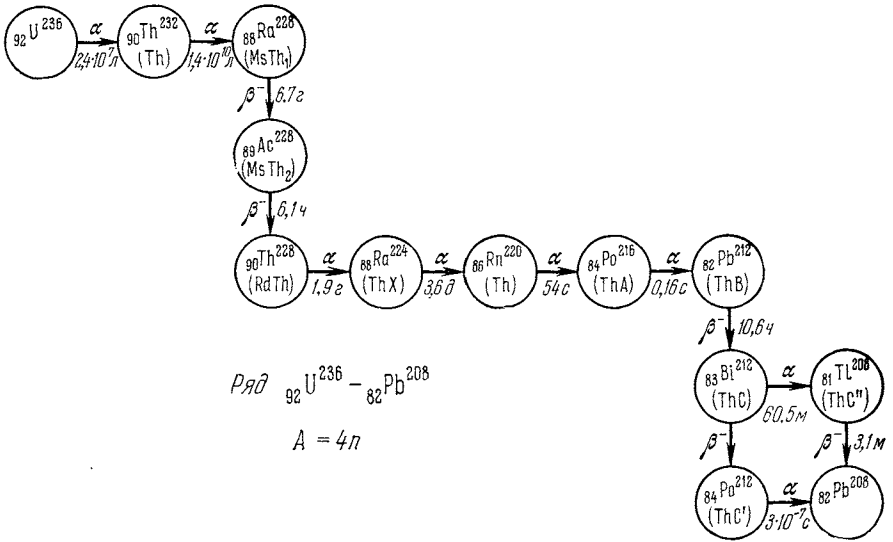
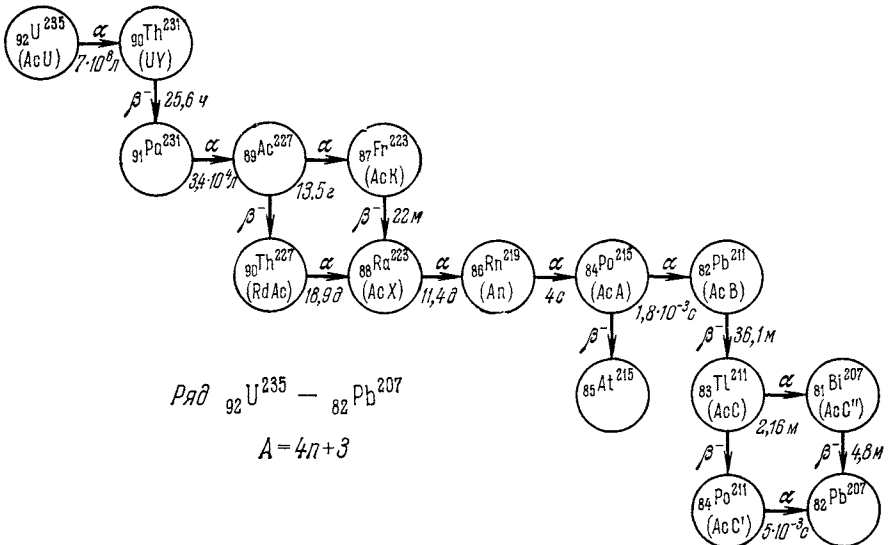
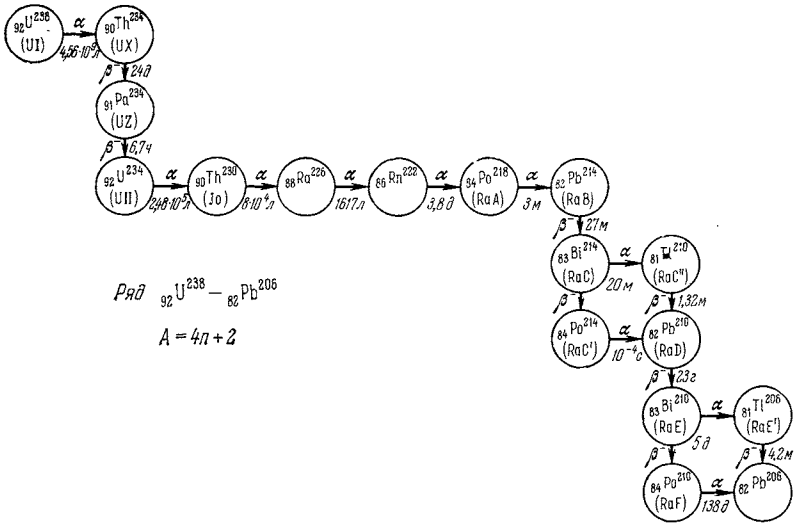


Таблица 6.3 (продолжение)



Первыми были синтезированы (и вскоре получены в больших количествах) элементы с $Z = 93$ (нептуний Np) и $Z = 94$ (плутоний Pu). Далее последовательно были синтезированы изотопы со все большими значениями Z . Эти работы были осуществлены в основном группой американских ученых (Г. Т. Сиборг и др.). Последние из известных на сегодняшний день трансурановых элементов были открыты в лаборатории Г. Н. Флерова в г. Дубне.

Таблица 6.4. Известные в настоящее время трансурановые элементы *)

Наименования и обозначения	Обнаруженные изотопы с массовыми числами A	Наибольший период полураспада (в скобках указано число A соответствующего изотопа)
Нептуний, ${}_{93}\text{Np}$	230—241	$2,2 \cdot 10^6$ лет (237)
Плутоний, ${}_{94}\text{Pu}$	232—246	24 340 лет (239)
Америций, ${}_{95}\text{Am}$	237—246	8 000 лет (243)
Кюрий, ${}_{96}\text{Cm}$	238—249	$1,7 \cdot 10^7$ лет (247)
Берклий, ${}_{97}\text{Bk}$	240—250	10^4 лет (247)
Калифорний, ${}_{98}\text{Cf}$	242—254	800 лет (251)
Эйнштейний, ${}_{99}\text{Es}$	243—255	140 дней (251)
Фермий, ${}_{100}\text{Fm}$	245—257	79 дней (257)
Менделеев, ${}_{101}\text{Md}$	248—258	1,5 часа (256)
Нобелий, ${}_{102}\text{Nb}$	251—259	58 мин (259)
Лоуренсий, ${}_{103}\text{Lr}$	255—260	3 мин (260)
Курчатовий, ${}_{104}\text{Ku}$	258—261	65 с (261)
$Z = 105$	260—262	40 с (262)
$Z = 106$	263	0,9 с
$Z = 107$	261	$2 \cdot 10^{-3}$ с (261)

*) Элементы с $Z = 105-107$ пока не имеют общепринятых названий.

В табл. 6.4 приведен перечень известных в момент ее составления трансурановых элементов с указанием наиболее долгоживущего изотопа и периода его полураспада. Основными процессами распада наиболее тяжелых изотопов являются α -распад и спонтанное деление. Так, у изотопа фермия ${}_{100}\text{Fm}^{256}$ период полураспада по отношению к спонтанному делению равен 2,7 ч, а изотоп курчатовия ${}_{104}\text{Ku}^{260}$ имеет $T_{\text{спонт. дел}} = 0,3$ с. Из последней графы этой таблицы видно, что периоды полураспада изотопов трансурановых элементов в среднем резко падают с увеличением Z . Это уменьшение времени жизни, казалось бы, кладет естественный предел возможности получения новых элементов: при каком-то Z окажется, что все изотопы практически мгновенно распадаются, так что их синтез и исследование станут невозможными. Может быть, однако, что отмеченное уменьшение периода полураспада трансурановых эле-

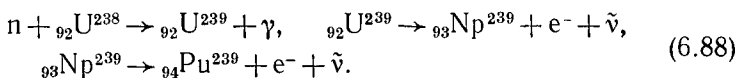
ментов является локальным явлением и при дальнейшем увеличении Z период полураспада ядер будет возрастать, достигая максимума в областях $Z = 110 - 114$ и $Z \approx 126$. Физическая причина такой возможности состоит в том, что при $Z = 110-114$, 126 и $N = 184$ возможно появление заполненных ядерных оболочек (см. гл. III, § 4). Возникающий за счет этого выигрыш в энергии может привести к большим временам жизни ядер 114^{298} , 126^{304} и их соседей. Теоретические расчеты показывают, например, что период полураспада ядра 114^{298} достигает 10^5 лет. Поиски новой области стабильности — «острова стабильности» — атомных ядер ведутся в нескольких лабораториях мира.

Для ряда трансурановых элементов уже известно большое количество изотопов. Например, получено двенадцать различных изотопов эйнштейния ($Z = 99$). Некоторые из трансуранов имеют довольно большие (правда, по сравнению с временем жизни человека, а не с возрастом Земли) периоды полураспада. Так, изотоп кюрия $^{96}\text{Cm}^{247}$ имеет период полураспада $1,7 \cdot 10^7$ лет.

Элементы Np , Pu , Am , Cm накоплены сейчас в больших количествах, что позволило, в частности, детально изучить их физические и химические свойства. Элементы Bk и Cf синтезированы в количествах по несколько сотен микрограммов. Исследование химических свойств этих элементов возможно лишь с помощью специальной микрометодики. Элемент Es удалось синтезировать всего лишь 10^{-8} г. В еще более ничтожных количествах были получены остальные элементы. Так, у элементов с $Z = 101 - 104$ были получены лишь десятки и сотни атомов. Эти элементы удалось синтезировать и выделить лишь благодаря особо чувствительным радиохимическим методам.

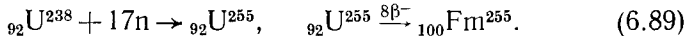
По своим химическим свойствам трансурановые элементы вплоть до лоренсия ($Z = 103$), а также предшествующие им уран ($Z = 92$), протактиний ($Z = 91$), торий ($Z = 90$) и актиний ($Z = 89$) очень близки друг к другу. Все они являются легко окисляющимися (и крайне ядовитыми для человека) металлами. Все они помещаются в одной клетке периодической системы Менделеева и подобно редким землям (лантанидам) составляют одну группу (актиниды). Интересно, что последние из синтезированных трансурановых элементов, начиная с курчатовия ($Z = 104$), в эту группу уже не входят. По своим химическим свойствам курчатовий является аналогом гафния, элемент 105 — тантала и т. д.

3. Получение трансурановых элементов является сложной технической задачей. Основная трудность связана с конкуренцией реакций образования трансуранов и реакции деления, тем более сильной, чем тяжелее изотоп. Первые трансурановые элементы Np и Pu были получены в реакторах с помощью реакций (n, γ) на уране $^{92}\text{U}^{238}$ с последующими β^- -распадами:



Получение таким способом более тяжелых трансуранов возможно только при длительном облучении в реакторах с очень мощными потоками нейтронов. Начиная примерно с $Z = 100$, этот метод становится совершенно неэффективным из-за конкуренции с делением. Изотопы эйнштейния ($Z = 99$) и фермия ($Z = 100$) впервые были получены в ядерных взрывах, т. е. путем кратковременного облуче-

ния урана сверхмощным потоком нейтронов. В таких условиях ядро урана может сразу поглотить более десятка нейтронов и затем путем ряда β^- -распадов перейти в трансурановый элемент. Например, фермий может получиться в результате процессов



Другим методом получения далеких трансуранов является бомбардировка разных мишеней мощными (по энергии и интенсивности) потоками α -частиц и тяжелых ионов, например, бомбардировка ядра ${}_{92}\text{U}^{238}$ ионами ксенона ${}_{54}\text{Xe}^{136}$. Для этой цели применяются специальные циклотроны. Именно в циклотроне такого типа в Дубне были синтезированы курчатовий и последующие трансураны.

Помимо чисто научного интереса, изучение трансурановых элементов имеет и большое практическое значение. Изотоп плутония ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ уже сейчас является одним из важнейших видов ядерного горючего; Изотоп ${}_{94}\text{Pu}^{238}$ использовался в изотопном источнике тока на американских спутниках. Изотоп калифорния ${}_{98}\text{Cf}^{252}$ испытывает спонтанное деление с испусканием в среднем четырех нейтронов. Он используется как мощный и портативный источник нейтронов.

§ 6. Гамма-излучение ядер

1. Явление γ -излучения ядер состоит в том, что ядро испускает γ -квант без изменения A и Z . Гамма-излучение возникает за счет энергии возбуждения ядра. Спектр γ -излучения всегда дискретен из-за дискретности ядерных уровней.

Простейший и наиболее часто используемый способ получения γ -активных ядер основан на β -распаде на возбужденные уровни конечного ядра. Особенно интенсивное γ -излучение появляется, когда β -распад в высокой степени запрещен в основное состояние конечного ядра и разрешен в одно из возбужденных состояний. Типичным

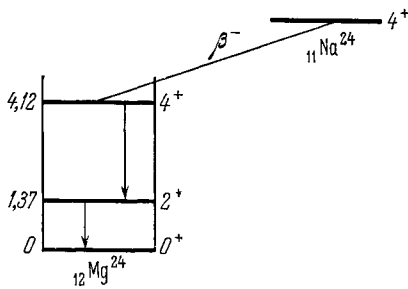


Рис. 6.22. Схема β -распада ядра натрия ${}_{11}\text{Na}^{24}$.

примером такого рода является распад изотопа натрия ${}_{11}\text{Na}^{24}$. Схема этого распада приведена на рис. 6.22. Основной уровень ядра ${}_{11}\text{Na}^{24}$ имеет характеристику 4^+ (т. е. спин, равный четырем, и положительную четность). Путем β^- -распада это ядро переходит в ядро изотопа магния ${}_{12}\text{Mg}^{24}$, основной уровень которого имеет характеристику 0^+ . Поэтому распад на этот уровень является