

ГЛАВА IX

РАДИОАКТИВНОСТЬ

* *

§ 71. Введение

1. *Радиоактивность* есть самопроизвольное изменение состава атомного ядра, происходящее за время, существенно большее характерного ядерного времени (10^{-22} с). Несколько произвольно условились считать, что изменение состава ядра должно происходить не раньше чем через 10^{-12} с после его рождения. Распады ядер часто происходят значительно быстрее, но такие распады уже не принято относить к радиоактивным. Так, при бомбардировке различных мишней на ускорителях может возникнуть огромное многообразие ядер, которые мгновенно распадаются и по этой причине не могут считаться сложившимися атомными ядрами. Время 10^{-12} с, ничтожное с общечеловеческой точки зрения, в ядерных масштабах должно считаться очень большим. За такое время совершается множество внутриядерных процессов и ядро успевает полностью сформироваться.

Ядерные силы, действующие между нуклонами, удерживают нуклоны в ядре, поскольку эти силы являются силами притяжения. Противоположное — дестабилизирующее — действие оказывают отталкивающие кулоновские силы между протонами ядра. Под действием сил обоего рода главным образом и формируются атомные ядра.

Ядра, подверженные радиоактивным превращениям, называются *радиоактивными*, а не подверженные — *стабильными*. Такое деление условно, так как, в сущности, все ядра могут самопроизвольно распадаться, но этот процесс в разных ядрах идет с различной скоростью.

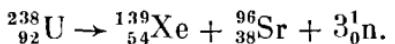
Большая часть радиоактивных ядер получена искусственно путем бомбардировки мишней различными частицами. В этом случае образующееся радиоактивное ядро можно рассматривать как *долгоживущее составное ядро*, подверженное дальнейшему превращению. Никакой принципиальной разницы между радиоактивным распадом и превращением составного ядра нет. Искусственная радиоактивность впервые (в 1934 г.) наблюдалась супругами Ирен (1897—1956) и Фредериком (1900—1958) Жолио-Кюри.

Различают следующие виды радиоактивного распада: 1) *α-распад*, 2) *β-распад*, 3) *спонтанное деление* атомного ядра, 4) *протонный распад*, 5) двухпротонный распад и др.

При α -распаде из ядра спонтанно вылетает α -частица (${}^4\text{He}$). При этом зарядовое число ядра уменьшается на две единицы и образуется новый элемент, сдвинутый относительно исходного влево на две клетки периодической системы.

Бета-распад может быть трех видов: 1) *электронный*, или β^- -*распад*, 2) *позитронный*, или β^+ -*распад*, 3) *электронный захват*. При β^- -распаде из ядра вылетают электрон и электронное антинейтрино ν_e (см. § 74, пункт 8). Массовое число ядра не меняется, а зарядовое число возрастает на единицу (сдвиг в периодической системе вправо на одну клетку). При β^+ -распаде из ядра вылетают позитрон e^+ и электронное нейтрино ν_e (сдвиг в периодической системе влево на одну клетку без изменения массового числа). Позитронная радиоактивность была открыта в 1934 г. И. и Ф. Жолио-Кюри практически одновременно с открытием искусственной радиоактивности. При электронном захвате ядро захватывает электрон из электронной оболочки атома; зарядовое число, как и при β^+ -распаде, уменьшается на единицу, а массовое число не меняется. Если электрон захватывается с K -оболочки атома, то электронный захват называют также *K-захватом*.

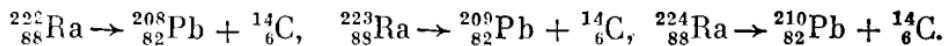
В 1940 г. Г. Н. Флеровым и К. А. Петржаком было открыто спонтанное деление ядер урана. Примером может служить процесс



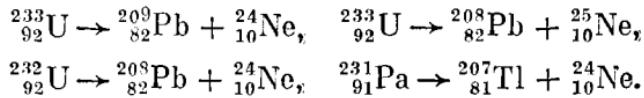
У ядер с большим избытком протонов, в принципе, возможна *протонная* и даже *двухпротонная радиоактивность*, но эти процессы очень трудно обнаружить из-за сильного фона конкурирующих α - и β^+ -распадов, приводящих к образованию изотопов таких же химических элементов. Протонная радиоактивность возможна лишь у небольшого числа искусственно получаемых легких ядер с относительно короткими временами жизни, которые обладают большим избытком протонов. Тем не менее, протонная и двухпротонная радиоактивности обнаружены. По мнению В. И. Гольданского (р. 1923), двухпротонная радиоактивность даже более вероятна, чем однопротонная. Дело в том, что между протонами действуют силы спаривания. В результате из ядра может вылететь не только одиночный протон, но и бипротон, т. е. два спаренных протона с противоположно направленными спинами.

Из ядра могут вылетать и нуклоны, объединенные в более крупные частицы, чем ядра ${}^4\text{He}$ (α -частицы), например ядра углерода. Такой процесс затруднен тем, что в исходном ядре нет готовых ядер углерода. Впрочем, и готовых α -частиц в ядре также нет — они образуются перед самым вылетом из ядра. Только формирование α -частиц несравненно более вероятно, чем формирование ядер углерода. Тем не менее, в 1984 г. в Оксфордском университете было зафиксировано самопроизвольное превра-

щение нестабильных изотопов радия в свинец с испусканием ядер изотопа углерода ^{14}C :



Все ядра изотопов ^{222}Ra , ^{223}Ra и ^{224}Ra радиоактивны с периодами полураспадов соответственно 39 с, 11,7 дня и 3,6 дня. Вероятность вылета ядра ^{14}C примерно в 10^{10} раз меньше вероятности вылета α -частицы. Поэтому экспериментально зафиксировать распад рассматриваемых ядер радия с вылетом ядер ^{14}C необычайно трудно. То обстоятельство, что одним из продуктов распада является изотоп углерода ^{14}C , а не ^{12}C , можно объяснить тем, что энергетически выгодно, чтобы образовалось дважды магическое ядро $^{208}_{82}\text{Pb}$ или соседние с ним ядра (см. § 78). В 1985 г. в Дубне, а также группой американских физиков были открыты распады с излучением еще более тяжелых ядер — ядер неона:



Вероятность первых трех процессов примерно в 10^{12} , а последнего — в 10^{11} раз меньше вероятности α -распада.

В результате радиоактивного распада ядер, образующихся при делении материального ядра, образуются нейтронионизбыточные возбужденные ядра. При их распаде образуются так называемые *запаздывающие нейтроны*. Такой процесс соблазнительно назвать *нейтронной радиоактивностью*. Однако это не делается, так как спятие возбуждения путем испускания нейронов происходит практически мгновенно.

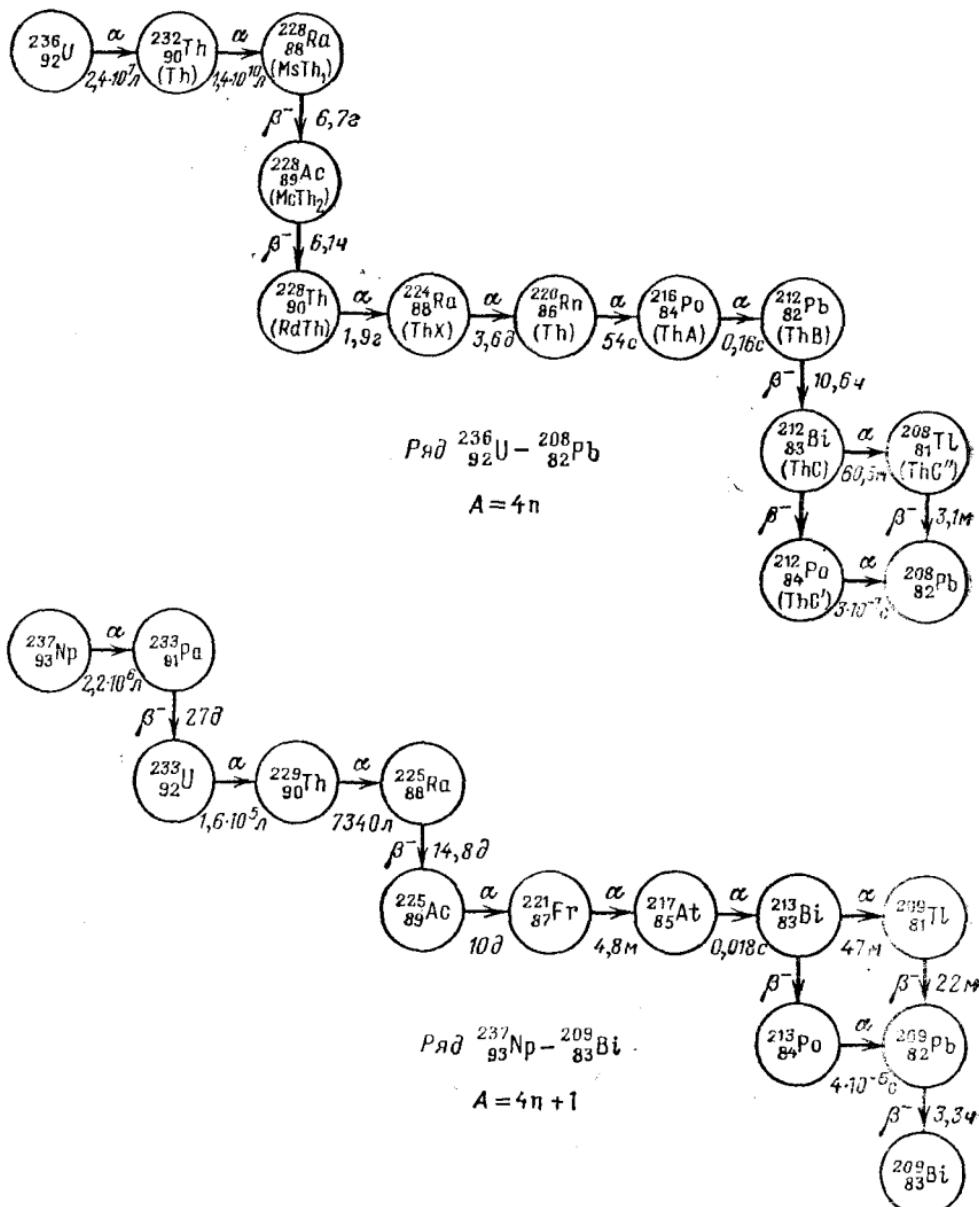
2. В процессе радиоактивного распада, конечно, должен выполняться закон сохранения энергии. Если начальное ядро не подвижно, то этот закон можно записать в виде

$$M_{\text{нач}}c^2 = M_{\text{кон}}c^2 + \sum_i M_i c^2 + \mathcal{E}, \quad (71.1)$$

где $M_{\text{нач}}$ и $M_{\text{кон}}$ — массы начального и конечного ядер, M_i — массы образовавшихся частиц, \mathcal{E} — кинетическая энергия, выделившаяся при радиоактивном распаде. Самопроизвольно могут идти только реакции с выделением энергии, а потому энергия \mathcal{E} существенно положительна. Таким образом, радиоактивный распад возможен лишь тогда, когда $M_{\text{нач}} > M_{\text{кон}} + \sum M_i$. Это условие необходимо, но не достаточно, так как для возможности процесса, помимо закона сохранения энергии, должны выполняться и другие законы сохранения (импульса, момента импульса, электрического, барионного и лептонного зарядов и пр.).

3. Все α - и β -радиоактивные элементы можно разделить на четыре радиоактивных ряда, или радиоактивных семейства.

Таблица 9
Радиоактивные семейства

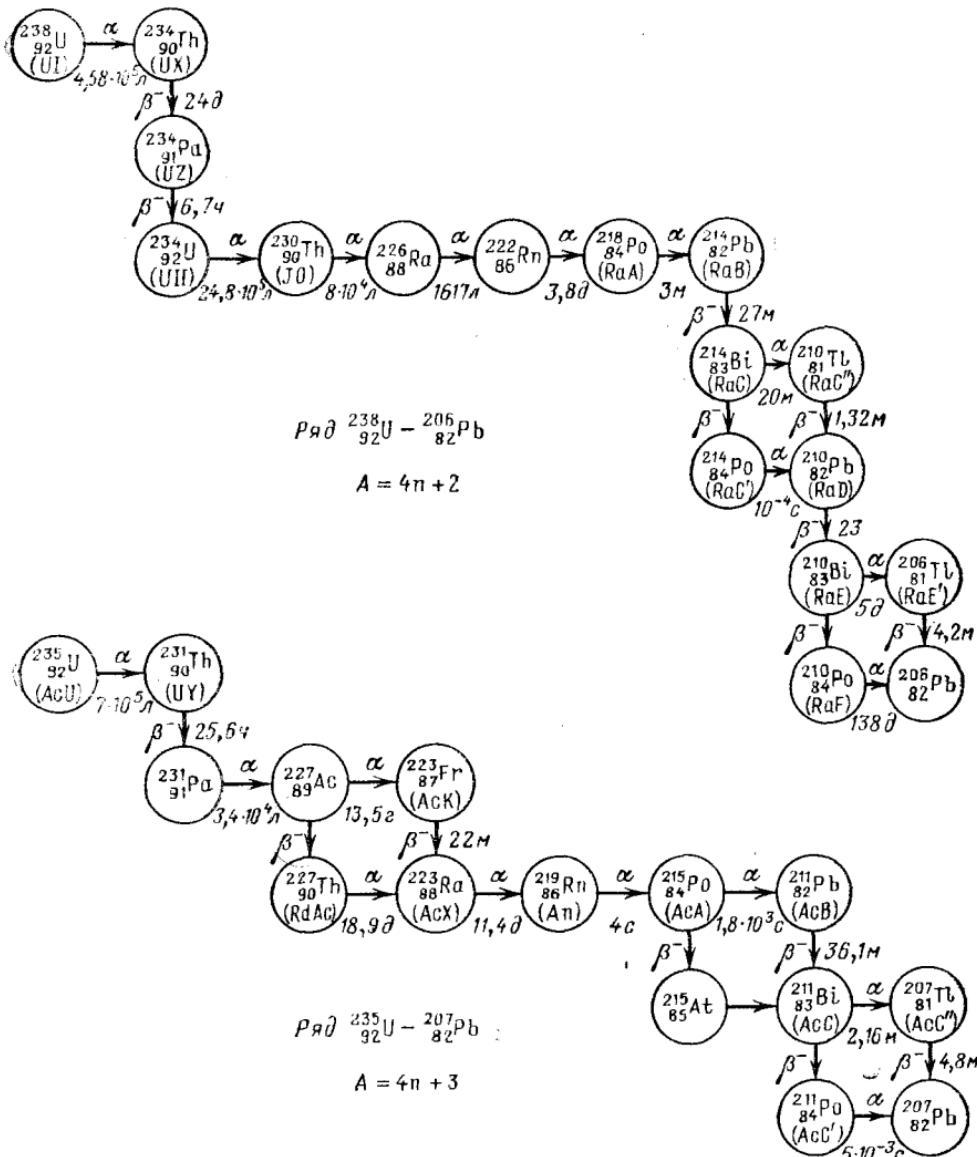


В каждом ряду массовое число A выражается формулой

$$A = 4n + C, \quad (71.2)$$

где C — постоянная для рассматриваемого ряда величина, а n — переменное целое число. Каждый элемент ряда получается из предыдущего путем α - или β -превращения. Поэтому в каждом

Таблица 9 (продолжение)



ряду два соседних элемента имеют либо одинаковые массовые числа, либо эти числа отличаются на четыре. Значению $C = 0$ ($n \leq 59$) соответствует ряд тория, $C = 1$ ($n \leq 60$) — ряд пептуния, $C = 2$ ($n \leq 60$) — ряд урана, $C = 3$ ($n \leq 59$) — ряд актиноурана. Ряд с $C = 1$ (пептуния) состоит из изотопов, не встречающихся в природе, но получающихся искусственно.

4. Все четыре радиоактивных ряда представлены в табл. 9. Рассмотрим в качестве примера ряд урана. Он начинается с α -радиоактивного изотопа урана $^{238}\text{U}^*$). Испытав α -распад с периодом полураспада $4,56 \cdot 10^9$ лет, этот изотоп переходит в β^- -активный изотоп тория ^{234}Th . После последовательных двух β^- -распадов последнего с периодами полураспада 24 дня и 6,74 часа получается другой радиоактивный изотоп урана ^{234}U с периодом полураспада $2,48 \cdot 10^5$ лет. Он последовательно претерпевает α -превращений. Среди радиоактивных изотопов, получающихся в результате этих превращений, содержится и α -радиоактивный изотоп радия ^{226}Ra с периодом полураспада 1617 лет, за которым следует радиоактивный газ радон ^{222}Rn , и т. д. Заметим, что радиоактивные изотопы ^{214}Bi и ^{210}Bi могут переходить соответственно в ^{210}Pb и в ^{206}Pb двумя различными путями, указанными в табл. 9. Ряд урана заканчивается стабильным изотопом свинца ^{208}Pb . Аналогичное строение имеют и остальные радиоактивные ряды. В естественных рядах тория и актиноурана содержатся другие изотопы радия и радона. Все естественные радиоактивные ряды заканчиваются различными стабильными изотопами свинца ^{208}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb . Существование трех различных стабильных изотопов свинца указывает на особую устойчивость ядер свинца, содержащих магическое число протонов — 82.

На самом тяжелом элементе, встречающемся на Земле в естественных условиях, уране ^{92}U периодическая система элементов не кончается, как об этом уже указывалось в § 47. Однако все трансурановые, т. е. зауранные, элементы радиоактивны. Период полураспада наиболее долгоживущего изотопа плутония ^{239}Pu например, составляет 24 000 лет. Если такие элементы и существовали когда-то на Земле в естественных условиях, то за время существования Земли они полностью исчезли из-за радиоактивных превращений. Все трансурановые элементы получаются искусственным путем. С учетом этих элементов радиоактивные ряды, представленные в табл. 9, могут быть продолжены в сторону больших Z . И все элементы тяжелее свинца и висмута, в конце концов, правда в отдаленном будущем, должны исчезнуть на Земле, если только к этому времени сама Земля еще будет существовать. Наличие в настоящее время таких элементов является одним из подтверждений ограниченного возраста Земли, который по различным оценкам составляет приблизительно 4—4,5 млрд лет.

О способах получения трансурановых элементов будет сказано в § 94.

*) В табл. 9 в скобках указаны обозначения изотопов, использующиеся в радиохимии.