

РАДИОАКТИВНОСТЬ

§ 1. Сущность явления радиоактивности

1. Явление радиоактивности состоит в самопроизвольном распаде ядер с испусканием одной или нескольких частиц. Ядра, подверженные такому распаду, называются *радиоактивными*. Ядра, не испытывающие радиоактивного распада, называются *стабильными*. В процессе распада у ядра может изменяться как атомный номер Z , так и массовое число A .

Очевидно, что необходимым, но, конечно, не всегда достаточным условием радиоактивного распада является его энергетическая выгодность — масса радиоактивного ядра должна превышать сумму масс ядра-осколка и частиц, вылетающих при распаде.

Радиоактивный распад характеризуется временем его протекания, сортом испускаемых частиц, энергиями испускаемых частиц, а при вылете из ядра нескольких частиц еще и относительными углами между направлениями вылета частиц. Иногда изучаются ориентации спинов начального и конечного ядер, а также вылетающих частиц. Исторически радиоактивность является первым ядерным процессом, обнаруженным человеком (А. Беккерель, 1896).

2. Как показывают наблюдения, радиоактивность — процесс статистический. Одинаковые ядра распадаются за различное время. Однако среднее время жизни ядер определенного сорта, вычисленное по наблюдению очень большого (на много порядков большего единицы) числа распадов, оказывается не зависящим от способа получения этих ядер и от внешних условий, таких как температура, давление, агрегатное состояние. Поэтому среднее время жизни (для сокращения мы будем часто называть его просто временем жизни) и является физической характеристикой распада.

3. Каждое радиоактивное ядро может быть получено путем бомбардировки стабильных ядер частицами. С этой точки зрения радиоактивность можно рассматривать как распад очень долго живущего составного ядра (см. гл. IV, § 6), т. е. как частный случай ядерной реакции. Никакой физической границы между радиоактивностью и распадом составного ядра не существует. Несмотря на это, радиоактивность выделилась в самостоятельный раздел ядерной физики. Граница между ядерными реакциями, идущими через составное ядро, и радиоактивными процессами определяется

не физическими условиями, а возможностями существующей измерительной аппаратуры.

На практике к радиоактивным относят ядра, времена жизни которых могут быть измерены радиотехническими методами. Этими методами сейчас удастся измерять времена от 10^{-9} с до 10^{22} лет.

Физическая (не техническая) область времен жизни радиоактивных ядер охватывает промежутки времени от сколь угодно больших до заметно превышающих характерное ядерное время пролета.

Самым удивительным в явлении радиоактивности являются колоссальные в масштабах микромира времена жизни радиоактивных ядер. Действительно, характерное ядерное время (см. гл. I, § 1) имеет порядок 10^{-21} с, так что, например, в радиоактивном ядре ${}_{92}\text{U}^{238}$, живущем 10^{10} лет (т. е. $\approx 10^{17}$ с), нуклоны, грубо говоря (грубо — потому что мы незаконно пользуемся классическим, некантовым языком), успевают сделать в ядре по 10^{38} оборотов по своим орбитам, и в ядре ничего не происходит. А на $10^{38}+1$ обороте ядро вдруг испускает α -частицу. Очевидно, что должны существовать какие-то очень специфические физические причины, за счет которых ядро существует в течение таких поистине гигантских промежутков времени и потом все-таки самопроизвольно распадается.

4. Существуют две основные причины, обеспечивающие большие порядки времен жизни радиоактивных ядер:

а) Во-первых, испускание тяжелых положительно заряженных частиц (α -частицы, дейтроны, протоны и т. д.) сильно подавляется кулоновским барьером. Увеличение времени жизни ядра за счет кулоновских сил может показаться парадоксальным, так как всякие силы отталкивания, казалось бы, стремятся вытолкнуть частицу из ядра, т. е. уменьшить, а не увеличить время жизни. Объяснение этого парадокса заключается в том, что α -распад ядер происходит в таких условиях, когда по законам классической (некантовой) механики вылет частиц из ядра вообще энергетически невозможен. Как мы подробнее объясним ниже в § 3, влияние квантовых эффектов приводит к возникновению некоторой вероятности распада, но эта вероятность может быть сколь угодно малой по порядку величины. Таким образом, барьерные эффекты могут приводить к сколь угодно большим временам жизни по отношению к вылету заряженных частиц.

б) Другой причиной больших порядков времен жизни радиоактивных ядер может быть очень малая интенсивность взаимодействия, за счет которого происходит распад. Рассмотрим, например, ядро ${}^6_2\text{He}$ тяжелого изотопа гелия. Ядерные и электромагнитные силы, как оказывается, вызвать распад такого ядра не могут. Однако, кроме ядерных и электромагнитных, в природе есть еще так называемые слабые взаимодействия, интенсивность которых примерно в 10^{24} раз меньше ядерных. Подробно мы рассмотрим слабые

взаимодействия в § 4, а также в гл. VII, § 8. Пока нам достаточно указать, что слабые взаимодействия практически не изменяют нуклон-нуклонных взаимодействий, но способны вызывать процессы β -распада ядер, в которых один из нейтронов ядра превращается в протон с одновременным испусканием электрона и антинейтрино. Путем такого распада ядро ${}^6_2\text{He}$ переходит в ядро лития ${}^6_3\text{Li}$. Время жизни ядра ${}^6_2\text{He}$ имеет порядок 1 с. Поскольку слабые взаимодействия на 24 порядка слабее сильных, то ориентировочно можно ожидать, что и времена жизни ядер относительно распадов, обусловленных слабыми взаимодействиями, будут примерно на столько же порядков превышать характерное ядерное время.

Существуют еще две причины, в силу которых времена жизни нестабильных ядер могут изменяться на несколько (но уже не на много) порядков:

в) Время жизни радиоактивного ядра сильно зависит от энергии, выделяющейся при распаде. Если эта энергия мала, то время жизни резко возрастает.

г) Время жизни радиоактивного ядра при малых энергиях, выделяющихся при распаде, сильно зависит от разности спинов исходного и конечного ядер. Для того чтобы изменить спин ядра при распаде, продукты распада должны обладать некоторым орбитальным моментом L . Если же выделяющаяся при распаде энергия столь мала, что дебройлевская длина волны λ вылетающей частицы больше радиуса действия сил R (ср. гл. IV, § 2), то, для того чтобы вылететь с моментом L , частице нужно иметь прицельный параметр $L\lambda$, превышающий R . Поэтому при $L\lambda \gg R$ вылет частицы в рамках классической механики невозможен, а в рамках квантовой — сильно затруднен. Количественная оценка показывает, что вероятность вылета (которая обратна времени жизни) при замене орбитального момента с нуля на L умножается на $(R/\lambda)^{2L}$.

Последние две причины приводят к большим разбросам времен жизни различных радиоактивных ядер по отношению к вылету одних и тех же частиц.

5. Согласно сказанному в п. 3 ядро считается радиоактивным, если оно, с одной стороны, нестабильно, но, с другой стороны, живет (в среднем) до распада на много порядков дольше характерного ядерного времени.

Попытаемся понять, какие типы радиоактивного распада ядер возможны в природе; при этом тип радиоактивности определяется сортом частиц, испускаемых при распаде.

Прежде всего очевидно, что практически невозможна нейтронная радиоактивность. Действительно, в случае вылета нейтрона время жизни ядра может возрасть лишь за счет сравнительно слабо влияющих причин в) и г) (см. п. 4), которых недостаточно для того, чтобы увеличить характерное ядерное время 10^{-21} с до величины, поддающейся измерению. Для ядер, сильно перегружен-

ных протонами по сравнению с равновесным числом протонов (при заданном A), в принципе возможен протонный, а также двухпротонный распад. Времена жизни по отношению к этим распадам в принципе могут быть довольно велики из-за причины а) — кулоновского барьера. Однако, как показывают оценки, процесс протонного распада, если он протекает достаточно медленно, как правило, практически полностью подавляется рассматриваемым ниже позитронным β -распадом, процессом, при котором ядро также освобождается от избытка протонов. Протонная радиоактивность возможна лишь с относительно короткими временами жизни у небольшого количества довольно экзотических легких ядер с большим избытком протонов.

Для очень тяжелых ядер относительная роль кулоновских эффектов возрастает (см. гл. II, § 3). Поэтому очень тяжелым ядрам энергетически выгодно испускать α -частицы. Почему α -частицы, а не отдельные нуклоны или, скажем, дейтроны? Испускание α -частиц гораздо выгоднее энергетически, чем испускание отдельных нуклонов или, например, дейтронов. Вспомним, что энергия связи α -частицы составляет 28 МэВ. Поэтому, если на отрыв каждого из четырех нуклонов в отдельности тратится, скажем, по 6 МэВ, то ядро будет совершенно стабильно относительно вылета нуклона, но сможет испускать α -частицы с кинетической энергией 4 МэВ.

Помимо α -распада, для очень тяжелых ядер возможно также открытое советскими физиками К. А. Петржаком и Г. Н. Флеровым в 1940 г. спонтанное деление на два сравнимых по массам осколка. Именно спонтанное деление ограничивает возможности получения новых изотопов со все большими Z и A . В процессе радиоактивного распада ядро может испускать не только частицы, входящие в его состав, но и новые частицы, рождающиеся в процессе распада. Процессами такого рода являются β - и γ -распады.

При β -распаде в ядре происходит превращение нейтрона в протон или наоборот, с одновременным испусканием пары легких частиц — электрона и антинейтрино или соответственно позитрона и нейтрино. Как мы уже говорили, β -распад происходит только за счет слабых взаимодействий, имеющих интенсивность в 10^{24} раз меньшую, чем ядерные силы. Помножив характерное ядерное время 10^{-21} с на 10^{24} , мы получим цифру 10^3 с, грубо определяющую порядок времени жизни β -активных ядер. По причинам в) и г) возможны большие отклонения от этой цифры в обе стороны.

Гамма-распад состоит в испускании ядром кванта очень жесткого (более жесткого, чем рентгеновское) электромагнитного излучения. Вызывающее этот распад электромагнитное взаимодействие всего лишь на четыре порядка слабее ядерных сил. Поэтому и времена жизни по отношению к γ -распаду, как правило, очень малы. Но в результате совместного действия причин в) и г) (см. п. 4) в отдельных

случаях γ -активные ядра могут иметь времена жизни, исчисляемые минутами, часами и больше.

Резюмируя, можно сказать, что в атомных ядрах возможны и действительно наблюдаются четыре основных типа радиоактивности: α -распад, β -распад, γ -распад и спонтанное деление.

6. Процесс радиоактивного распада всегда экзотермичен, т. е. идет с выделением энергии. При расчете энергетического баланса, как и в ядерных реакциях (см. гл. IV, § 2), приходится учитывать релятивистскую связь массы с энергией $E_{\text{рел}} = Mc^2$, поскольку при распаде, например, могут рождаться новые частицы, на что будет тратиться энергия, соответствующая их массе. Выделяющаяся при распаде энергия E , очевидно, определяется соотношением

$$M_i c^2 = M_f c^2 + \sum M_s c^2 + E, \quad (6.1)$$

где M_i , M_f , M_s — соответственно массы покоя исходного ядра, конечного ядра и вылетающих частиц. Энергия E , как и в ядерных реакциях, выделяется в форме кинетической энергии продуктов распада. Из неотрицательности кинетической энергии следует, что ядро может быть радиоактивным лишь при $E > 0$, т. е. в экзотермическом случае. Условие положительности E необходимо, но еще не достаточно для того, чтобы ядро было радиоактивным, потому что энергетически выгодный распад может быть запрещен другими строгими законами сохранения, а именно сохранением момента количества движения, электрического заряда, барионного заряда. Например, ядру ${}_2\text{He}^4$, т. е. α -частице, было бы энергетически выгодно распасться на два электрона. Но этот процесс запрещен законами сохранения электрического и барионного зарядов (см. гл. VII, § 4, а также гл. II, § 2).

Возникает естественный вопрос, обязательно ли будет происходить распад, если он не запрещен никакими законами сохранения. В макромире с его классическими законами это не так. Но в микромире любой энергетически выгодный процесс, не запрещенный законами сохранения, обязательно будет происходить с той или иной (иногда, правда, исчезающе малой) вероятностью. Мы еще встретимся с этим интересным обстоятельством в § 3 этой главы и в гл. VII, § 2.

7. Большинство радиоактивных ядер в природе не встречается, а может быть лишь синтезировано в лабораториях. Отдельные радиоактивные изотопы образуются в природе в результате различных ядерных реакций. Ядра со средним временем жизни, превышающим сотни миллионов лет, не успели распасться полностью за время, прошедшее с момента образования элементов окружающей нас части Вселенной. Таких очень долго живущих изотопов известно около двух десятков. Важнейшими из них являются α -активные изотоп тория ${}_{90}\text{Th}^{232}$ и изотопы урана ${}_{92}\text{U}^{238}$ и ${}_{92}\text{U}^{235}$. В качестве при-

мера распространенного в природе долгоживущего β -активного ядра можно указать изотоп калия ${}_{19}\text{K}^{40}$.

Отметим, что сравнение распространенности в природе различных природных радиоактивных изотопов (см. гл. XII, § 2) с большими временами жизни позволило довольно точно определить время образования химических элементов Солнечной системы.

В естественных условиях могут встречаться и некоторые сравнительно быстро распадающиеся радиоактивные ядра. Очевидно, что такие ядра могут постоянно существовать в заметных количествах только при наличии в природе процессов, восполняющих убыль этих ядер за счет их распада. Имеются два механизма таких процессов. Во-первых, короткоживущие изотопы могут возникать при распаде долгоживущих. Так, уже упомянутые нами изотопы урана, распадаясь, переходят в новые радиоактивные изотопы, времена жизни которых уже невелики. Другим постоянно действующим природным источником возникновения радиоактивных ядер служат ядерные реакции, вызываемые космическими лучами — потоками микрочастиц, падающих на Землю из космоса (гл. XII, § 3, п. 8). В частности, наличие в земной атмосфере радиоактивного изотопа углерода ${}_{6}\text{C}^{14}$ обусловлено реакциями, вызываемыми космическими лучами.

Основоположниками исследования *естественной радиоактивности ядер*, встречающихся на Земле, являются П. и М. Кюри (1898). *Искусственная радиоактивность* синтезируемых ядер была открыта Ф. и И. Жолио-Кюри в 1934 г.

§ 2. Основные законы радиоактивного распада

1. Мы уже говорили, что радиоактивный распад — явление принципиально статистическое. Нельзя предсказать, когда именно распадется данное нестабильное ядро. Для описания статистических закономерностей используются вероятности тех или иных событий. Естественной статистической величиной, описывающей радиоактивный распад, является вероятность λ распада ядра за единицу времени. Смысл величины λ , называемой также *постоянной распада*, состоит в том, что если взять большое число N одинаковых нестабильных ядер, то за единицу времени в среднем будет распадаться λN ядер. Величина λN называется *активностью*. Активность характеризует интенсивность излучения препарата в целом, а не отдельного ядра. В отношении единиц активности сейчас имеется некоторый разнобой. Старейшей и до сих пор наиболее употребительной является внесистемная единица кюри:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп./с}$$

и ее доли милликюри ($1 \text{ мКи} = 10^{-3} \text{ Ки}$) и микрокюри ($1 \text{ мкКи} =$