

абсолютного нуля в ядерной шкале. Внутриядерные степени свободы начнут включаться в тепловое движение, т. е. давать вклад в теплоемкость, лишь при температурах порядка сотен миллионов градусов и выше. Это — одно из проявлений уже отмечавшейся высокой прочности ядер, послужившее причиной неудач многочисленных попыток алхимиков осуществить превращение химических элементов.

4. Физические величины, характеризующие свойства атомных ядер, можно разделить на *статические*, относящиеся к определенному, обычно невозбужденному состоянию ядра, и на *динамические*, проявляющиеся при ядерных возбуждениях, распадах и реакциях. Важность статических характеристик обусловлена тем, что вследствие своей высокой прочности атомные ядра в очень широком круге явлений участвуют, не возбуждаясь. Важнейшими статическими характеристиками ядра являются:

а) величины, характеризующие состав ядра: *атомный номер* Z , *массовое число* A ;

б) механические величины: *энергия связи* $E_{\text{св}}$, *спин* (собственный механический момент) J и существенно квантовомеханическая характеристика — *четность*;

в) величины, характеризующие размеры и форму ядра: *радиус ядра* R и *несферичность* $\delta R/R$;

г) величины, характеризующие электромагнитные свойства ядра: *среднеквадратичный электрический радиус* $R_{\text{эл}}$, *дипольный магнитный момент* μ , *электрический квадрупольный момент* Q (но не дипольный электрический и не квадрупольный магнитный, см. § 4, п. 5);

д) *статистика*, которой подчиняются те или иные ядра;

е) *изотопический спин*.

В последующих параграфах настоящей главы будут даны определения статических характеристик (а) — (д), рассмотрены методы их экспериментального исследования, а также обсуждены некоторые эмпирические закономерности. Теория изотопического спина будет изложена в гл. V, § 6.

5. Статические характеристики часто называют свойствами стабильных ядер. Введенное нами изменение терминологии обусловлено тем, что статическими характеристиками обладают не только стабильные ядра в основных состояниях, но и достаточно долго живущие нестабильные состояния ядер, т. е. возбужденные уровни всех ядер и основные состояния радиоактивных ядер. Например, сейчас удается измерить магнитные моменты возбужденных ядерных уровней, время жизни которых имеет порядок 10^{-8} — 10^{-9} с. Согласно оценке (1.1) ядерные времена пролета имеют порядок 10^{-22} с. Статические характеристики имеют вполне определенный смысл для времен жизни, превышающих $\tau_{\text{ядерн}}$ на несколько порядков. При приближении времени жизни к $\tau_{\text{ядерн}}$ статические характеристики начинают терять смысл (см. § 10, п. 2).

§ 2. Состав ядер. Электрический и барионный заряды

1. Атомные ядра состоят из элементарных частиц — протонов и нейтронов (Е. Н. Гапон и Д. Д. Иваненко; В. Гейзенберг, 1932). Массы протона M_p и нейтрона M_n близки друг к другу и почти

в 2000 раз превышают массу электрона m : $M_p = 1836,15m = 1,67265 \cdot 10^{-24}$ г, $M_n = 1838,68m = 1,67495 \cdot 10^{-24}$ г. Протон электрически заряжен. Его заряд положителен и по абсолютной величине равен заряду электрона. Электрический заряд нейтрона точно равен нулю, что отражено в названии этой частицы.

В отличие от электронов, протоны и нейтроны подвержены действию специфических ядерных сил. Ядерные силы являются частным случаем самых интенсивных в природе *сильных взаимодействий*. За счет ядерных сил протоны и нейтроны могут соединяться друг с другом, образуя различные атомные ядра.

Свойства протона и нейтрона по отношению к сильным взаимодействиям совершенно одинаковы, чем, по-видимому, и объясняется близость их масс. Поэтому в ядерной физике часто используется термин *нуклон*, обозначающий любую частицу, входящую в состав ядра, — как протон, так и нейтрон. Можно сказать, что протон и нейтрон являются двумя состояниями одной и той же частицы — нуклона. Более глубокий смысл введения понятия нуклона будет выяснен ниже в гл V, § 6.

2. Атом электрически нейтрален. Поэтому число протонов в ядре атома должно равняться числу электронов в атомной оболочке, т. е. *атомному номеру Z*. Общее число нуклонов (т. е. протонов и нейтронов) в ядре обозначается через A и называется *массовым числом*. Числа Z и A полностью характеризуют состав ядра. Реже употребляется обозначение N для указания числа нейтронов в ядре. По определению

$$A = Z + N.$$

Для обозначения различных ядер обычно используется запись вида ${}_Z X^A$, где X — химический символ, соответствующий элементу с данным Z . Например, выражение ${}_4\text{Be}^9$ обозначает ядро атома бериллия с $Z = 4$, $A = 9$, имеющее 4 протона и 5 нейтронов. Левый нижний индекс не является необходимым, поскольку атомный номер Z однозначно определяется названием элемента. Поэтому часто употребляется сокращенное обозначение типа Be^9 (читается «бериллий девять»). Протон p и нейтрон n в этих обозначениях, очевидно, могут быть записаны соответственно как ${}_1p^1$ и ${}_0n^1$. Протон является ядром атома водорода и поэтому может быть также обозначен через ${}_1\text{H}^1$. Альфа-частица состоит из двух протонов и двух нейтронов. Поэтому она является ядром атома гелия, т. е. может быть обозначена через ${}_2\text{He}^4$. Отметим, что в литературе часто используется также обозначение типа ${}_Z^A X$.

3. Ядра с одним и тем же Z и разными A называются *изотопами*. Например, у урана ($Z = 92$) есть изотопы ${}_{92}\text{U}^{235}$, ${}_{92}\text{U}^{238}$, имеющие соответственно 143 и 146 нейтронов. Иногда употребляются термины *изобары* (для ядер с одинаковыми A и разными Z) и *изотоны* (для ядер с одинаковыми N и разными Z). Для обозначения атомов опре-

деленного изотопа используется термин *нуклид*. По своим чисто ядерным свойствам различные изотопы, как правило, имеют мало общего. Но в подавляющем большинстве случаев атомы различных изотопов обладают одинаковыми химическими и почти одинаковыми физическими свойствами, поскольку на структуру электронной оболочки атома ядро влияет практически только своим электрическим зарядом. Поэтому выделение какого-либо изотопа, например ${}_{92}\text{U}^{235}$ из его собственной смеси с ${}_{92}\text{U}^{238}$, является сложной технологической задачей, для решения которой используются небольшие различия в скоростях испарения, диффузии и некоторых других процессов, возникающие за счет различия масс изотопов.

4. Изотопы водорода ${}^1\text{H}^1$, ${}^1\text{H}^2$, ${}^1\text{H}^3$ сильно различаются по массам, а их атомы заметно (по сравнению с изотопами других элементов) различаются по физическим и даже химическим свойствам. Поэтому тяжелым изотопам водорода оказалось даже полезным приписать отдельные названия. Изотоп ${}^1\text{H}^2$ (содержание которого в естественной смеси составляет 0,015%) называется элементом *дейтерием* и обозначается через D (употребляется также термин «тяжелый водород»). Ядро дейтерия называется *дейтроном* и обозначается через d. Например, если молекула воды, в состав которой входит обычный («легкий») водород, обозначается через H_2O , то молекула «тяжелой воды», в состав которой входят изотопы ${}^1\text{H}^2$, обозначается через D_2O . Тяжелая вода имеет плотность 1,108 г/см³, замерзает при 3,82 °С и кипит при 101,42 °С, т. е. довольно заметно отличается от обычной воды.

Ядро нестабильного изотопа ${}^1\text{H}^3$ называется тритоном (употребляется также термин «сверхтяжелый водород») и обозначается через t. Соответствующий элемент называется тритием и обозначается через T.

5. Атомный номер Z равен электрическому заряду ядра в единицах абсолютной величины заряда электрона. Электрический заряд является целочисленной *) величиной, строго сохраняющейся при любых (в том числе и при неэлектромагнитных) взаимодействиях. Совокупность имеющихся экспериментальных данных о взаимопревращениях атомных ядер и элементарных частиц показывает, что кроме закона сохранения электрического заряда существует аналогичный строгий закон *сохранения барионного заряда*. Именно, каждой частице можно приписать некоторое значение барионного заряда, причем алгебраическая сумма барионных зарядов всех частиц остается неизменной при каких угодно процессах. Барионные заряды всех частиц целочисленны. Барионный заряд электрона и γ -кванта равен нулю, а барионные заряды протона и нейтрона равны единице. Поэтому массовое число A является барионным зарядом ядра. Закон сохранения барионного заряда обеспечивает стабильность атомных ядер. Например, этим законом запрещается выгодное энергетически и разрешенное всеми остальными законами сохранения превращение двух нейтронов ядра в пару легчайших частиц — γ -квантов. Закон

*) Обсуждается и исследуется гипотеза о существовании новых частиц — кварков — с дробными значениями электрического и барионного зарядов (см. гл. VII, § 7, п. 2).

сохранения барионного заряда находит широкое применение в физике элементарных частиц (см. гл. VII, § 2).

6. Атомные ядра могут существовать лишь в ограниченной области значений величин A , Z . Вне этой области, если соответствующее ядро и возникает, то оно мгновенно (т. е. за характерное ядерное время) либо распадается на более мелкие ядра, либо испускает протон или нейтрон. Внутри области возможного существования далеко не все ядра стабильны. Но они распадаются не путем испускания нуклона, а за счет других, более медленных процессов (гл. VI).

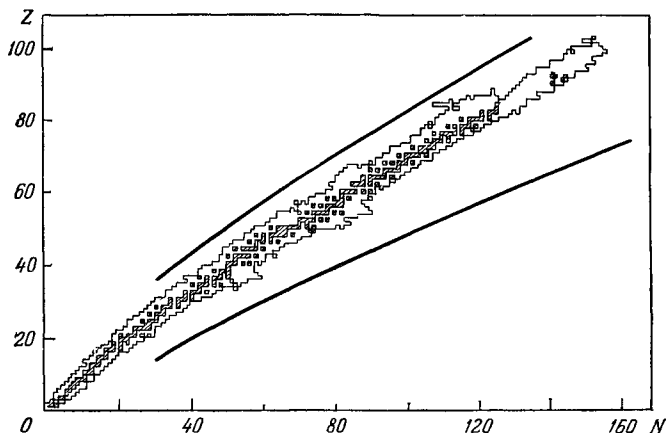


Рис. 2.3. Протонно-нейтронная диаграмма атомных ядер.

Заштрихованные квадратики — стабильные и долгоживущие ядра, светлая область внутри извилистого контура — радиоактивные

Известные к настоящему времени ядра нанесены на *протонно-нейтронной диаграмме* рис. 2.3. На ней плавными сплошными линиями обозначена теоретическая граница области возможного существования ядер. Экспериментальное установление этой границы затруднено тем, что при приближении к ней (изнутри) времена жизни ядер хотя и значительно превышают характерные (10^{-21} с), но слишком малы для современной экспериментальной техники.

Стабильные ядра *) образуют на протонно-нейтронной диаграмме *дорожку стабильности*.

Заслуживают упоминания следующие эмпирические факты и закономерности в отношении A и Z для стабильных ядер:

а) Известны ядра со всеми значениями Z от 0 до 107 включительно (ядром с $Z = 0$, $N = 1$ является нейтрон). Не существует

*) Вопрос о том, какие ядра считать стабильными, а какие нет, условен, поскольку многие ядра хотя и не стабильны, но распадаются крайне медленно. Мы считаем ядра стабильными, если за период существования видимой части Вселенной распадается лишь их небольшая доля.

стабильных, т. е. не подверженных самопроизвольному радиоактивному распаду, ядер при $Z = 0, 43, 61$ и $Z \geq 84$.

б) Известны ядра со значениями A от 1 до 263 включительно. Не существует стабильных ядер при $A = 5, 8$ и при $A \geq 210$.

в) Свойства ядер существенно зависят от четности чисел Z и N . Это видно уже из того, что среди стабильных изотопов больше всего четно-четных (четное Z , четное N) и меньше всего нечетно-нечетных (нечетные Z, N), которых известно всего четыре: ${}_1\text{D}^2, {}_3\text{Li}^6, {}_5\text{B}^{10}$ и ${}_7\text{N}^{14}$.

г) При малых A стабильные ядра содержат примерно одинаковое число протонов и нейтронов, а при увеличении A процентное содержание нейтронов возрастает.

д) Большинство химических элементов имеет по несколько изотопов. Рекорд здесь принадлежит олову (${}_{50}\text{Sn}$), обладающему десятью стабильными изотопами (${}_{50}\text{Sn}^{112}, {}_{50}\text{Sn}^{114}, {}_{50}\text{Sn}^{115}, {}_{50}\text{Sn}^{116}, {}_{50}\text{Sn}^{117}, {}_{50}\text{Sn}^{118}, {}_{50}\text{Sn}^{119}, {}_{50}\text{Sn}^{120}, {}_{50}\text{Sn}^{122}, {}_{50}\text{Sn}^{124}$). С другой стороны, некоторые элементы, например Be, Na, Al, обладают только одним стабильным изотопом.

§ 3. Энергия связи ядер

1. Энергией связи $E_{\text{св}}$ ядра называется энергия, необходимая для полного расщепления ядра на отдельные протоны и нейтроны. Очевидно, что $E_{\text{св}}$ является одной из важнейших величин, характеризующих прочность ядра. Знание энергий связи ядер позволяет рассчитать энергетический баланс не только для довольно редкого процесса полного расщепления, но и для любых процессов распадов и взаимных превращений ядер. Например, энергия E_p отделения протона, т. е. минимальная энергия, необходимая для выбивания протона из ядра ${}_Z\text{X}^A$, равна разности энергий связи ядер ${}_Z\text{X}^A$ и ${}_{Z-1}\text{X}^{A-1}$:

$$E_p = E_{\text{св}}(Z, A) - E_{\text{св}}(Z-1, A-1). \quad (2.2)$$

Аналогично энергия E_n отделения нейтрона

$$E_n = E_{\text{св}}(Z, A) - E_{\text{св}}(Z, A-1). \quad (2.3)$$

Для выбивания из ядра α -частицы нужна энергия, равная

$$E_\alpha = E_{\text{св}}(Z, A) - E_{\text{св}}(Z-2, A-4) - E_{\text{св}}(\alpha), \quad (2.4)$$

где $E_{\text{св}}(\alpha)$ — энергия связи α -частицы.

Вместо энергии связи часто бывает удобнее рассматривать величину $E_{\text{св}}/A$, называемую удельной энергией связи (или энергией связи на нуклон).

2. Из теории относительности следует, что масса M и полная энергия $E_{\text{пол}}$ любой физической системы связаны соотношением Эйнштейна (1.4). С помощью этого соотношения энергию связи ядра