

СТАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АТОМНЫХ ЯДЕР

§ 1. Вводные сведения о ядре

1. Каждый атом обладает отрицательно заряженной электронной оболочкой и положительно заряженным атомным ядром. В ядре сосредоточена почти вся (более 99,95%) масса атома. С точки зрения атомных масштабов ядра обладают ничтожно малыми размерами и колоссальной прочностью. Размеры ядер имеют порядок 10^{-12} — 10^{-13} см, в то время как для внешних электронных оболочек атомов характерны длины порядка 10^{-8} см. Для отрыва обоих электронов от атома гелия достаточно энергии 79 эВ, а для разрыва ядра гелия на составные части необходима в сотни тысяч раз большая энергия $28 \text{ МэВ} = 28 \cdot 10^6 \text{ эВ}$.

Такое различие масштабов является причиной резкого качественного разграничения явлений атомной и ядерной физики. В атомной физике имеют дело со столь большими расстояниями, что ядро почти всегда можно рассматривать просто как заряженную материальную точку. В ядерной же физике имеют дело со столь высокими энергиями, что почти всегда можно пренебрегать влиянием процессов, происходящих в электронных оболочках, на структуру ядра и протекание ядерных реакций. Тонкие эффекты влияния атомных явлений на внутриядерные требуют специальных прецизионных измерений, таких как, например, в эффекте Мёссбауэра (см. гл. VI, § 6, п. 6).

2. Существование в атоме тяжелого плотного положительно заряженного ядра было открыто Э. Резерфордом и его сотрудниками в 1906—1912 гг. при измерении упругого рассеяния α -частиц с энергией в несколько мегаэлектронвольт атомами золота и некоторых других металлов. Об α -частицах в то время было известно то, что они имеют массу $6,7 \cdot 10^{-24}$ г (более чем в 7000 раз тяжелее электрона) и положительный заряд $2e$, где $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ СГС единиц заряда $= 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — абсолютная величина заряда электрона.

Единственными источниками α -частиц тогда были препараты естественных α -радиоактивных элементов: радия, полония и некоторых других. Опыты Резерфорда (рис. 2.1) показали, что при прохождении через пленки толщиной в несколько тысяч межатомных расстояний некоторые (очень немногие) частицы резко изменяют направление своего движения, в то время как подавляющее большинство

частиц почти не отклоняется от своего пути. Например, при прохождении пучка α -частиц, имеющих скорость $1,8 \cdot 10^9$ см/с, через слой золота толщиной $6 \cdot 10^{-5}$ см в среднем одна частица из 20 000 отклонялась (или, что то же самое, рассеивалась) на угол порядка 90° . Резерфорд пришел к выводу, что такие редкие резкие отклонения для тяжелых (по сравнению с электронами) частиц, движущихся со скоростью, всего лишь в двадцать раз меньшей скорости света, можно объяснить только тем, что основная масса материи не распределена равномерно по объему вещества, а сконцентрирована в отдельных плотных прочных ядрах — сгустках, разделенных большими (по сравнению с размерами самих ядер) промежутками пустого или почти пустого пространства. При этом, поскольку атомы в твердом теле почти вплотную прилегают друг к другу, ядерную структуру пришлось приписать самим атомам.

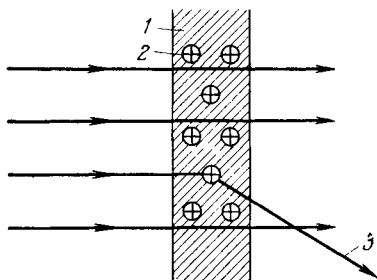


Рис. 2.1. Схема опыта Резерфорда
1 — пластинка вещества, облучаемого α -частицами; 2 — ядра атомов вещества; 3 — α -частица, сильно отклонившаяся в результате столкновения с ядром.

Предположив (вопреки существовавшим тогда представлениям), что почти вся масса атома сосредоточена в положительно-заряженном ядре, имеющем ничтожно малые размеры, Резерфорд получил для дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ рассеяния α -частиц атомными ядрами выражение

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Q^2 e^2}{[2vp \sin^2(\theta/2)]^2}, \quad (2.1)$$

получившее название формулы Резерфорда. Здесь Q — заряд ядра, v , p — скорость и импульс α -частицы. Расчетное сечение (2.1) оказалось прекрасно совпадающим с опытными данными, если абсолютную величину заряда считать равной Ze , где Z — атомный номер элемента.

Наряду с установлением ядерной структуры атома опыты Резерфорда свидетельствуют и о высокой прочности атомных ядер, как правило, не разрушаемых даже при лобовом столкновении с α -частицей, имеющей энергию в несколько МэВ.

Посмотрим теперь, до какого верхнего предела результаты опытов Резерфорда ограничивают размеры ядра. Для этого оценим минимальное расстояние, на которое может подойти, например, к ядру золота α -частица с энергией $E = 5$ МэВ. На этом минимальном расстоянии кинетическая энергия α -частицы полностью превра-

щается в потенциальную энергию кулоновского отталкивания

$$E = \frac{2e \cdot Ze}{R}.$$

Следовательно,

$$R = \frac{2e^2 \cdot Z}{E} \approx 2 \cdot 10^{-12} \text{ см.}$$

Поскольку вплоть до таких энергий результаты Резерфорда хорошо согласуются с расчетами в предположении точечности зарядов α -частицы и ядра, то отсюда следует, во-первых, что сумма радиусов ядра и α -частицы меньше $2 \cdot 10^{-12}$ см и, во-вторых, что на расстояниях $2 \cdot 10^{-12}$ см взаимодействие между α -частицей и ядром является чисто электростатическим. Мы приходим, таким образом, к важным выводам: а) размеры ядер по крайней мере в 10^4 раз меньше размеров атома, и б) мощные ядерные силы, обеспечивающие высокую прочность ядер, имеют очень короткий радиус действия — меньше, чем $2 \cdot 10^{-12}$ см.

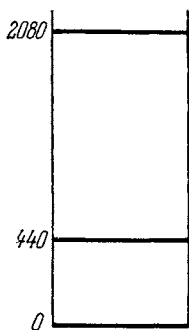


Рис. 2.2. Энергетический спектр ядра натрия.

3. Из квантовой теории следует (гл. I, § 3, п. 4), что ядро, как и атом (и вообще всякая пространственно ограниченная система), имеет не непрерывный, а дискретный энергетический спектр. Энергетические уровни ядер принято изображать так, как это сделано на рис. 2.2, где приведено несколько низших уровней ядра натрия. Каждой горизонтальной черте соответствует энергетический уровень, энергия которого, отсчитанная от энергии основного состояния, указана слева (в кэВ). Нижней черте соответствует основное состояние. Из этого рисунка, например, видно, что для того, чтобы перевести ядро натрия в возбужденное состояние, ему необходимо передать энергию не менее $E_1 = 440$ кэВ. И действительно, если бомбардировать натриевую мишень α -частицами, то при низких энергиях происходят только упругие столкновения α -частиц с ядрами, а при энергиях, превышающих 440 кэВ, появляются и неупругие столкновения, при которых вылетающие частицы имеют энергию на E_1 меньше начальной.

Интервалы порядка десятков (иногда сотен) кэВ между низшими возбужденными уровнями характерны для всех средних и тяжелых ядер. Для легких ядер средние расстояния между уровнями увеличиваются и достигают величины порядка мегаэлектронвольта.

Эти значения интересно сравнить со средней энергией kT (k — постоянная Больцмана) теплового движения на одну степень свободы. При комнатной температуре $T = 300$ К будет $kT = 1/40$ эВ. При температуре 3400 К (электрическая дуга) $kT = 0,3$ эВ. Отсюда видно, что в обычных для земной поверхности условиях ядра находятся в невозбужденных состояниях, т. е. при температуре

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