

## § 64. Ядерные силы. Дефект массы. Модели ядра

Ядро  $X_Z^A$  состоит из  $Z$  положительно заряженных протонов и  $N=A-Z$  нейтронов. Близость масс нейтрона и протона и почти целочисленные атомные веса изотопов позволяют считать массу ядра в первом приближении пропорциональной массовому числу, т. е. числу нуклонов:

$$M \approx \bar{m}A, \quad (64.1)$$

где  $\bar{m} \approx 1,67 \cdot 10^{-24}$  г — средняя масса одного нуклона.

Изучение взаимодействия быстрых ядерных частиц позволило оценить размеры ядер. Эмпирическое значение радиуса ядра  $R$ :

$$R = 1,4 \cdot 10^{-13} A^{\frac{1}{3}} \text{ см.} \quad (64.2)$$

Отсюда следует, что объем ядра пропорционален  $A$  — числу нуклонов, т. е. что плотность ядерного вещества примерно одна и та же для всех ядер. Для средней плотности имеем:

$$\rho_{\text{ядра}} \approx 145\,000\,000 \text{ т/см}^3. \quad (64.3)$$

Можно считать, что нуклоны в ядре расположены практически вплотную друг к другу.

Какими же силами сдерживаются нуклоны в ядре и почему ядро не разлетается сразу же на составные части, несмотря на огромное взаимное электрическое отталкивание протонов, сближенных на расстояния порядка  $10^{-13}$  см? Наблюдаемая на опыте устойчивость ядер означает, что, кроме электрических сил отталкивания, между ядерными частицами действуют еще силы притяжения. Это не могут быть силы ньютоновского притяжения, потенциальная энергия которых ничтожно мала и не превышает  $10^{-20}$  эв. Следовательно, в случае атомных ядер мы сталкиваемся с новым, особым видом взаимодействия, с новыми силами. Это взаимодействие называется **сильным**, а отвечающие ему силы — **ядерными**.

Полная теория ядерных сил не построена и до настоящего времени. Однако целый ряд их качественных и количественных характеристик в достаточной мере изучен:

1. Подобно тому как силы электрические обусловлены существованием материального электромагнитного поля, ядерные силы обусловлены существованием материального **ядерного поля**. Источниками электромагнитного поля являются любые частицы вещества — электроны, протоны и т. д., обладающие **электрическим** зарядом. Источниками ядерного поля являются нуклоны. Они обладают специфическим «ядерным зарядом», одинаковым по величине и знаку у всех нуклонов (нейтронов и протонов) независимо от того, обладает ли нуклон еще электрическим зарядом или нет.

Неэлектрическая природа ядерных сил приводит к их з а р я д о в о й н е з а в и с и м о с т и: ядерные силы между частицами не зависят от того, обладают ли частицы электрическим зарядом или нет. С помощью ядерных сил нейтрон с нейтроном, нейтрон с протоном и два протона взаимодействуют одинаково.

2. В отличие от уже рассматривавшихся сил — кулоновых и ньютоновых, которые убывают обратно пропорционально квадрату расстояния между точечными источниками (электрическими зарядами, массами), — ядерные силы убывают гораздо быстрее. Они весьма велики на расстояниях порядка расстояний между частицами в ядре, но на расстояниях, превышающих  $3 \cdot 10^{-13}$  см, уже почти незаметны. Таким образом, в отличие от сил тяготения и электрических, ядерные силы являются к о р о т к о д е й с т в у ю щ и м и.

3. Ядерные силы, в отличие от сил между точечными или сферическими электрическими зарядами, не являются центральными. Их нельзя представлять в виде сил, действующих от одного центра сил. Это связано с наличием спина взаимодействующих частиц.

4. Ядерные силы обладают свойством насыщения, аналогично химическим силам. Поясним это свойство следующим примером. Энергия взаимодействия системы электрических зарядов определяется суммой энергий взаимодействия к а ж д о й п а р ы зарядов, входящих в систему. Энергия взаимодействия каждой взятой пары не зависит от того, имеются ли другие заряды или нет. Любой новый заряд, прибавленный к системе, будет взаимодействовать с каждым из старых зарядов по такому же закону, по какому происходило бы взаимодействие при отсутствии всех других зарядов, — электрические силы не обладают свойством насыщения. Атомы углерода и кислорода взаимодействуют. Но после того, как произошло соединение одного атома углерода и двух атомов кислорода, присоединение других атомов кислорода оказывается уже невозможным — химические силы достигли насыщения.

Наличие насыщения ядерных сил, правда не столь резко выраженного, следует из того, что энергия, которую необходимо затратить в среднем на одну частицу, для того чтобы разбить ядро на отдельные нуклоны, начиная от гелия и до самых тяжелых ядер, меняется в пределах, не превышающих 25%. Некоторое различие обуславливается действием электрических сил между протонами, величиной поверхности ядра и т. д.

Величина энергии связи нуклона в ядре может быть определена экспериментально, по так называемому д е ф е к т у м а с с ы: если бы протоны и нейтроны не взаимодействовали вовсе, масса ядра  $M_Z^A$  должна была бы равняться просто сумме масс всех

составляющих частиц:

$$M_0 = Zm_{op} + (A - Z)m_{on} = Am_{on} - Z(m_{on} - m_{op}). \quad (64.4)$$

Точные масс-спектроскопические измерения масс ядер (произведенные методом отклонения ионных пучков в магнитном поле; см. т. II, § 37), показали, что всегда  $M_Z^A < M_0$ . Дефект массы ядра

$$\Delta M = M_0 - M_Z^A > 0 \quad (64.5)$$

показывает, что для полного расщепления ядра на составляющие его нуклоны нужно увеличить его массу на  $\Delta M$ , а следовательно, и энергию на величину

$$\Delta E = \Delta M c^2. \quad (64.6)$$

Эта величина  $\Delta E$  измеряет энергию связи образовавшегося ядра. В момент соединения нуклонов в ядро эта энергия выделяется, например, в виде квантов излучения (унесших с собой и соответствующую массу  $\Delta M$ ).

По массам исходных и конечных продуктов ядерных реакций определяется баланс энергии этих реакций. В качестве примера приведем рассмотренные выше реакции:  $Li_3^7 + H_1^1 \rightarrow 2He_2^4$  и  $F_9^19 + H_1^1 \rightarrow O_8^16 + He_2^4$ . Интересующие нас массы изотопов, участвующих в этих реакциях, составляют в аеи:  $M_{H_1^1} = 1,008145$ ;  $M_{He_2^4} = 4,003876$ ;  $M_{Li_3^7} = 7,018239$ ;  $M_{O_8^16} = 16,000000$ ;  $M_{F_9^19} = 19,004444$ . Для первой реакции имеем:

$$M_{Li_3^7} + M_{H_1^1} = 7,018239 + 1,008145 = 8,026384; \quad 2M_{He_2^4} = 8,007752.$$

Следовательно, убыль масс покоя в результате реакции составляет:

$$\Delta M = 8,026384 - 8,007752 = 0,018632,$$

что отвечает выделению энергии

$$\Delta E = \Delta M c^2 = 17,33 \text{ Мэв}$$

в хорошем соответствии с опытом. Читатель легко найдет для второй реакции

$$\Delta M = 0,008713 \text{ аеи} \quad \text{и} \quad \Delta E = \Delta M c^2 = 8,11 \text{ Мэв}.$$

Такое определение баланса энергии реакций по массам является, конечно, наиболее точным.

На рис. 3.17 изображена экспериментальная кривая удельной энергии связи  $\frac{\Delta E}{A}$  в Мэв на нуклон для всех основных изотопов.

Для дейтерия  $\frac{\Delta E}{A} = \frac{2,18}{2} = 1,09 \text{ Мэв/нуклон}$ , т. е. сравнительно

невелика. Для гелия  $\frac{\Delta E}{A} = \frac{28}{4} = 7$  Мэв/нуклон, и далее по всей таблице Менделеева до  $A=250$  удельная энергия связи меняется сравнительно мало в пределах от 7,5 до 8,5 Мэв/нуклон. Это примерное постоянство средней энергии связи на нуклон является показателем того, что ядерные силы обладают малым радиусом действия, так что энергия связи каждой частицы определяется лишь ее взаимодействием с соседними частицами, но не со всеми частицами ядра.

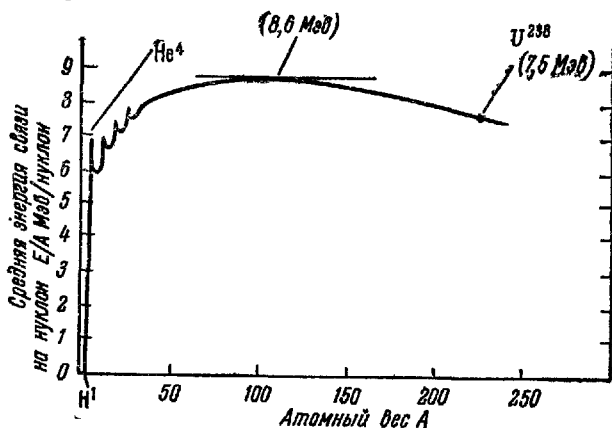


Рис. 3.17.

Из рис. 3.17 видно, что кривая удельной энергии связи

$$\frac{\Delta E}{A} = f(A, Z) \quad (64.7)$$

имеет отдельные небольшие пики и провалы для определенных изотопов и систематический ход с максимумом в области середины таблицы Менделеева при  $A \sim 50-100$ . Наличие максимума указывает на то, что средние элементы таблицы Менделеева обладают наибольшей энергией связи и являются наиболее устойчивыми.

Снижение удельной энергии связи к концу таблицы обусловлено кулоновским отталкиванием большого количества протонов в ядре.

Малый радиус действия ядерных сил и примерное постоянство средней энергии связи, приходящейся на одну частицу, использованы Я. И. Френкелем в модели ядер, содержащих большое число нуклонов. Эта модель ядра, получившая название к а п е л ь н о й, развивалась далее Н. Бором и др.

Как указывает Френкель, малый радиус действия ядерных сил, подобный малому радиусу действия сил межмолекулярных, позво-

ляет уподобить ядро капельке жидкости. Наличие протонов делает эту капельку наэлектризованной.

Исходя из этих соображений, можно получить общий вид формулы для массы ядра  $M_Z^A$  с данными  $A$  и  $Z$ , правда, с несколькими неопределенными коэффициентами, значения которых можно установить эмпирически, воспользовавшись точными измерениями масс нескольких атомов.

Первое и основное слагаемое в выражении для массы ядра есть  $M_0$ , согласно (64.4). Следующий член учитывает отрицательную энергию связи, составляющую в среднем  $-a_0$  на частицу, а для всего ядра дающую  $-a_0 A$ . Положительная энергия кулоновского взаимодействия пропорциональна квадрату заряда ядра  $Z^2$  и обратно пропорциональна его радиусу, т. е.  $A^{\frac{1}{3}}$ . Следовательно, обусловленная зарядом ядра добавка к его массе имеет вид  $a_1 \frac{Z^2}{A^{1/3}}$ .

Следующая добавка к массе учитывает, что энергия связи нуклонов, расположенных на поверхности ядра, меньше, чем у внутренних нуклонов, так как у них меньше соседей, с которыми они взаимодействуют. Другими словами, полная энергия нуклонов поверхности ядра больше, чем у внутренних нуклонов (энергия связи отрицательна!). Именно эта избыточная энергия свободной поверхности приводит к стремлению ядра-капли принять сферическую форму, при которой его поверхность была бы (при данном объеме) минимальна. Стало быть, картина вполне подобна той, которая имеет место и в капле жидкости (т. I, § 43), — поверхность ядра стягивается силами поверхностного натяжения, величина которых  $\sim 10^{10}$  Т/см =  $10^{10}$  н/м. Обусловленная наличием свободной поверхности добавка к массе пропорциональна поверхности ядра

$S \sim R^2 = A^{\frac{2}{3}}$ . Стало быть, соответствующая добавка к массе должна иметь вид  $a_2 A^{\frac{2}{3}}$ .

Таким образом, в следующем, по сравнению с (64.4), приближении зависимость массы ядра от  $A$  и  $Z$  должна выражаться формулой

$$M_Z^A = Zm_{0p} + (A - Z)m_{0n} - a_0 A + a_1 \frac{Z^2}{A^{1/3}} + a_2 A^{2/3} + \text{доп. чл.} \quad (64.8)$$

Небольшие дополнительные слагаемые в (64.8) обусловлены наличием спинов нейтрона и протона и некоторыми другими особенностями, на которых мы здесь не будем останавливаться.

Ядра способны поглощать  $\gamma$ -лучи, переходя при этом в возбужденные состояния, и испускать затем излучение, возвращаясь в нормальное состояние. При большой энергии возбуждения в

последняя распределяется между нуклонами и можно ввести понятие о «температуре» ядра по обычному соотношению

$$\frac{\varepsilon}{A} = \frac{3}{2} kT. \quad (64.9)$$

Величина  $\varepsilon \sim 10 \text{ Мэв}$  отвечает «температуре» ядра  $\sim 10^9$  градусов. При такой высокой температуре возможно «испарение» из ядра одной или нескольких частиц (нейтрон, протон,  $\alpha$ -частица). Такое испарение частиц наблюдается также из возбужденных — «нагретых» — ядер, продуктов деления тяжелых ядер, расщепляемых быстрыми частицами или нейтронами.

Кроме внутренних движений нуклонов, возможны и коллективные движения частиц ядра — движение отдельных частей капли друг относительно друга, приводящие к деформациям ядра. Эти деформации объясняют возможность деления ядра-капли, открытую впоследствии (см. § 66).

Развитием капельной модели является обобщенная модель ядра. Если в капельной модели состояния отдельных частиц не вводятся, ядро рассматривается как единое целое, то в обобщенной модели рассматриваются и состояния отдельных нуклонов. Обобщенная модель позволила объяснить несферическую форму некоторых (невозбужденных) ядер, выяснить ряд деталей механизма распада и деления ядер.

Из других моделей упомянем лишь весьма важную модель ядерных оболочек, развитую в работах Марии Гепперт-Мейер и др. Согласно этой модели, нейтроны и протоны образуют в ядре ряд оболочек, наподобие электронных оболочек атома. Анализ этой модели затрудняется тем, что электроны атома движутся в известном (и простом) кулоновском поле ядра, а у нуклонов такого общего центра сил нет. Вследствие малого радиуса ядерных сил нуклоны практически взаимодействуют лишь с соседними частицами.

На существование оболочек в ядре, которые, будучи заполнены, обладают особой устойчивостью (наподобие заполненных электронных оболочек), указывает ряд фактов. Опыт показал, что ядра, у которых число нейтронов или протонов (или тех и других одновременно) равно

$$2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, \quad (64.10)$$

обладают особенно большой устойчивостью. Эти числа получили шуточное, но затем оставшееся за ними название «магических».

Ядро гелия  $\text{He}_2^4$  содержит магическое число протонов и нейтронов  $Z = N = 2$ . Его особая устойчивость видна хотя бы из того, что это единственная составная частица, выбрасываемая из тяжелых

ядер при их радиоактивном распаде. Дважды магическим является также ядро  $O_8^{16}$  с  $N=Z=8$ . Олово  $Sn_{50}$ , имея магическое число протонов  $Z=50$ , содержит наибольшее количество стабильных изотопов — десять (включая радиоактивные, — двадцать).

Изотопы, содержащие магическое число нейтронов, содержатся в ряде соседних элементов и в относительно большом количестве. Например,  $He_{2}^{124}$  имеет число нейтронов  $N=82$ . С тем же числом нейтронов имеются изотопы:  $Cs_{55}^{137}$ ,  $Ba_{56}^{138}$ ,  $La_{57}^{139}$ ,  $Ce_{58}^{140}$ ,  $Pr_{59}^{141}$ ,  $Nd_{60}^{142}$  и  $Sm_{62}^{144}$ ! Самое тяжелое из устойчивых ядер — свинец  $Pb_{82}^{208}$  — дважды магическое:  $Z=82$ ,  $N=126$ . Все более тяжелые ядра уже радиоактивны, т. е. неустойчивы. Существующие приближенные методы расчета позволили получить теоретические значения магических чисел (64.10).

### § 65. Устойчивость ядер. Искусственная радиоактивность

Получаемое с помощью капельной модели выражение для массы атомных ядер позволяет ответить на вопрос о причинах неустойчивости ядер и путях их радиоактивных превращений. Тем самым решается и вопрос о возможности получения искусственных радиоактивных элементов.

При любых ядерных превращениях число нуклонов остается неизменным. Направленность возможных процессов определяется балансом энергии. Любая система устойчива, если ее энергия минимальна. Избыток энергии означает возбуждение, и система будет стремиться перейти в состояние с наименьшей возможной энергией. При сохранении общего числа нуклонов такой переход может происходить спонтанно (самопроизвольно) так, как, например, происходит переход возбужденного атома в нормальное состояние с излучением. Критерием запаса энергии в ядре является его масса покоя.

*Радиоактивное превращение возможно, если масса покоя исходного ядра превышает сумму масс покоя продуктов превращения.*

Например,  $\alpha$ -распад возможен, если

$$M_Z^A - (M_{Z-2}^{A-4} + M_2^4) = \Delta M > 0. \quad (65.1)$$

Реализация превращения обусловлена механизмом туннельного эффекта и требует некоторого времени. Разность масс  $\Delta M$  не исчезает. Продукты деления обладают кинетической энергией

$$E = \Delta M c^2 \quad (65.2)$$

и соответствующей дополнительной массой (релятивистский закон сохранения массы — энергии, см § 29).