§ 4. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДРА

Ядро представляет собой систему из A элементарных частиц — нуклонов, удерживаемых вместе силами притяжения и движущихся внутри ядра с нерелятивистскими скоростями. Такая система в хорошем приближении описывается нерелятивистской квантовой механикой. Всякая квантовая система, в том числе и ядро, характеризуется определенным спектром состояний.

Очевидно, что характеристиками состояний изолированной системы могут служить физические величины, не меняющиеся или мало изменяющиеся во времени.

В первом случае мы имеем дело с *интегралами движения* или, как иногда говорят, с «хорошими квантовыми числами», во втором — с приближенными интегралами движения или с «неточными квантовыми числами». Интегралами движения всякой квантовой системы, в частности ядра, является энергия, полный момент количества движения, четность волновой функции (мы говорим о так называемом «внутреннем» состоянии ядра, описываемом в системе координат, связанной с центром инерции, поэтому такие константы движения, как импульс ядра в целом, выпадает из рассмотрения). Рассмотрим каждую из этих величин в отдельности.

Атомное ядро, находясь в различных состояниях, обладает, вообще говоря, различной полной энергией. Состояние, которому соответствует наименьшая возможная для данного ядра энергия, называется основным; все остальные состояния называются возбужденными.

При нормальных условиях ядра находятся в основных состояниях. Если ядро, находясь в состоянии n обладает энергией E_n, то говорят, что ядро находится на энергетическом уровне E_n. Если состояниям, определяемым квантовыми числами n_1, n_2, ..., n_k, соответствует одна и та же энергия E_n, но какие-либо другие квантовые числа различны (например, проекция момента количества движения на одну из координатных осей), то уровень E_n называется k-кратно вырожденным по этим квантовым числам. Спектры энергетических уровней ядер в связанных состояниях дискретны, т. е. все уровни могут быть перенумерованы с помощью чисел натурального ряда.

Всякое возбужденное состояние ядра неустойчиво. Если ядро перевести в более высокое (возбужденное) квантовое состояние, то оно вернется в основное состояние с испусканием одного или нескольких электромагнитных квантов — γ-лучей или других частиц.

Полная энергия ядра E связана с его массой соотношением Эйнштейна:

$$E = Mc^2.$$

Точные измерения масс ядер показали, что масса сложного ядра не равна сумме масс входящих в состав ядра частиц, а всегда меньше этой величины на несколько десятых процентов. Масса ядра определяется выражением

$$M_я = Zm_p + (A - Z)\,m_n - \Delta M, \qquad (14)$$

где m_p и m_n — соответственно массы протона и нейтрона.

Разность ΔM между суммой масс нуклонов и массой ядра характеризует энергию связи этих нуклонов в ядре, т. е. энергию, которую надо затратить, чтобы разделить данное ядро на составляющие его нуклоны.

В большинстве экспериментов измеряемой величиной является масса атома $M_{ат}$, которая отличается от массы ядра на величину масс электронов. Так как число электронов в атоме всегда равно числу протонов в ядре, масса атома может быть записана в виде

$$M_{ат} = ZM_н + (A - Z)\,m_n - \Delta M, \qquad (15)$$

где масса атома водорода

$$M_н = m_p + m_e. \qquad (16)$$

Энергия связи электронов в атоме пренебрежимо мала по сравнению с энергией связи ядра и поэтому в выражениях (15) и (16) не учитывается.

Из выражения (14) следует, что энергия ядра $E = Mc^2$ отличается от суммарной энергии составляющих его частиц, находящихся в покое, не связанных друг с другом $[Zm_p + (A - Z)\,m_n]\,c^2$.

Разность этих величин и представляет собой полную энергию связи ядра

$$\Delta E = \Delta Mc^2 = [Zm_p + (A - Z)\,m_n - M_я]\,c^2. \qquad (17)$$

Таким образом, зная массы ядер и массы нуклонов, можно численно определить энергии связи ядер. Если известны массы нейтральных атомов, то

$$\Delta E = [ZM_н + (A - Z)\,m_n - M_{ат}]\,c^2. \qquad (18)$$

При образовании ядер путем соединения нуклонов должна выделиться энергия, равная энергии связи ядра.

Приведем значение энергии связи для некоторых ядер

$$\Delta E\,(S^{32}_{16}) = 270\ \text{Мэв};\ \Delta E\,(He^4_2) = 28\ \text{Мэв}.$$

Во многих случаях, например для сравнения устойчивости ядер, пользуются понятием об удельной энергии связи — ε, характеризующей среднюю энергию связи одного нуклона в ядре.

Величина ε равна отношению полной энергии ΔE к полному числу нуклонов в ядре A:

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{A} = \frac{\Delta Mc^2}{A}. \qquad (19)$$

Иначе говоря, ε — это та энергия, которую в среднем надо затратить, чтобы удалить из ядра один нуклон, не сообщая ему кинетической энергии. Чем больше значение ε, тем очевидно, устойчивее ядро. На рис. 7 приведена для стабильных ядер зависимость ε от массового числа A.

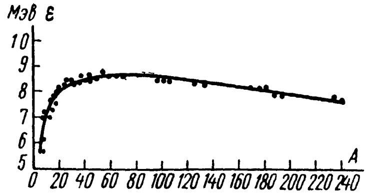

Рис. 7. Зависимость средней энергии связи на нуклон ε от массового числа A

Из приведенной на рис. 7 экспериментальной зависимости $\varepsilon = f(A)$ можно видеть, что при малых A величина ε меняется нерегулярно и имеет аномальную малую величину по сравнению со средним значением.

Так, например, для трития (T_1^3) $\varepsilon = 2{,}78$ *Мэв*. Далее величина ε медленно возрастает до значения 8,5 *Мэв* при $A = 50$, а затем до $A = 150$ остается приблизительно постоянной и далее медленно падает с увеличением A, достигая для урана 7,4 *Мэв*.

Столь большие величины энергий связи нуклонов свидетельствуют о колоссальных силах, которые прочно удерживают в ядре протоны и нейтроны, несмотря на большое электростатическое отталкивание протонов. Энергия электростатического отталкивания протонов, например, в ядре гелия составляет

$$U_{\text{кул}} = \frac{e^2}{r} \cong \frac{(4{,}8 \cdot 10^{-10})^2}{2 \cdot 10^{-13} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-6}} = 1 \text{ Мэв}.$$

Из хода зависимости ε от A следует несколько очень важных выводов, на которых должна основываться теория ядерных сил.

1. Полную энергию связи ядра можно грубо считать пропорциональной числу нуклонов в ядре A, так как для большинства ядер ε почти постоянно, а $\Delta E = \varepsilon A$.

Это означает, что нуклон способен к взаимодействию не со всеми окружающими его нуклонами, а только с ограниченным их числом. Действительно, если бы каждый нуклон ядра взаимодействовал со всеми остальными $(A-1)$ нуклонами, то суммарная энергия связи была бы пропорциональна

$$A(A-1) \approx A^2, \text{ а не просто } A.$$

Это свидетельствует о том, что ядерные силы обладают *свойством насыщения*.

2. При более подробном рассмотрении поведения ε, как функции A, обнаруживается, что энергия связи максимальна у четно-четных ядер C_6^{12}, O_8^{16}, т. е. у ядер с четным числом протонов и четным числом нейтронов.

Это обстоятельство указывает на особую прочность системы четырех нуклонов: 2p и 2n, т. е. на существование в ядре объединения одинаковых нуклонов в группы.

3. Удельная энергия связи имеет небольшие максимумы для ядер, число протонов или нейтронов у которых равно 2, 8, 20, 50, 82, 126. Данные числа называются «магическими». Это обстоятельство наталкивает на мысль, что ядро, подобно атому, имеет оболочечную структуру и наиболее стабильно, когда оболочка заполнена полностью.

4. Если построить зависимость удельной энергии связи для легких ядер от Z при фиксированном значении A, то она будет иметь максимум при $Z=\frac{A}{2}$.

Это указывает на то, что легкие ядра наиболее устойчивы при равенстве числа протонов числу нейтронов.

Для тяжелых ядер максимум сдвигается в сторону $Z<\frac{A}{2}$, т. е. тяжелые ядра более устойчивы, когда число нейтронов превышает число протонов.

5. Из хода кривой (рис. 7) видно также, что если объединить два легких ядра в ядро среднего веса или разделить одно тяжелое ядро на два средних ядра, то должна выделиться энергия за счет увеличения энергии связи у вновь образуемых ядер.

Процессы первого типа — процессы синтеза легких ядер непрерывно идут во Вселенной, являясь источником лучистой энергии звезд, и лежат в основе термоядерного синтеза (водородная бомба). Процессы второго типа — деление тяжелых ядер — используются для получения энергии в атомной энергетике.

До сих пор мы говорили об энергии связи ядра относительно всех составляющих его нуклонов. Аналогичным образом можно определить энергию связи ядра относительно каких-либо других составных частей. Чтобы ее подсчитать, надо вычесть из энергии покоя составных частей энергию покоя всего ядра. Например, для разделения ядра кислорода на четыре ядра гелия ($O_8^{16} \to 4\,He_2^4$) надо затратить энергию $\Delta E_{4He_2^4}$, равную

$$\Delta E_{4He_2^4}=[4M_{He_2^4}-M_{O_8^{16}}]\,c^2.$$

Для разделения ядра O_8^{16} на C_6^{12} и He_2^4, надо затратить $\Delta E_{C_6^{12}+He_2^4}$, которая равна

$$\Delta E_{C_6^{12}+He_2^4}=[M_{C_6^{12}}+M_{He_2^4}-M_{O_8^{16}}]\,c^2.$$

Иногда энергия связи ядра, рассчитанная по отношению к каким-либо составным частям, становится малой. Так, энергия связи Be_4^9 по отношению к его распаду на нейтрон и 2 He_2^4 равна примерно 2 *Мэв*, хотя средняя энергия связи на один нуклон (ε) для ядра Be_4^9 равна 6,3 *Мэв*.

Это совершенно естественный результат, так как каждая из таких составных частей ядра является особенно прочно связанной системой и имеет большую энергию связи.

Иногда величина ΔE становится отрицательной. Так, например, средняя энергия связи нуклона в ядре урана U_{92}^{238} равна 7,5 *Мэв*, а энергия связи относительно He_2^4 и Th_{90}^{234}

$$\Delta E_{Th_{90}^{234}+He_2^4} = (M_{Th_{90}^{234}} + M_{He_2^4} - M_{U_{92}^{238}})\, c^2 = -4{,}25 \text{ Мэв}.$$

Это означает, что ядро урана является неустойчивой системой по отношению к распаду на α-частицу и Th_{90}^{234}. И действительно, уран обладает α-активностью. Величину ΔE_{Th+He} можно назвать энергией отделения или энергией связи α-частицы в ядре урана. Можно определить и энергию связи (отделения) нуклона в ядре, которая отличается от средней энергии связи нуклона $\left(\varepsilon = \frac{\Delta E}{A}\right)$. Например, энергия связи нейтрона в ядре ε_n определяется, как

$$\varepsilon_n = [m_n + M_Z^{A-1} - M_Z^A]\, c^2.$$

Это та энергия, которую надо сообщить ядру (A, Z), чтобы отделить от него нейтрон. Наоборот, если соединить ядро M_Z^{A-1} с нейтроном, то такая же энергия ε_n должна выделиться.

Часто вместо энергии связи пользуются величиной, называемой дефектом массы. Дефект массы Δ представляет разность между массой и массовым числом

$$\Delta = M - A.$$

Кроме дефекта массы пользуются так называемым *упаковочным коэффициентом* (или упаковочным множителем)

$$f = \frac{\Delta}{A} = \frac{M - A}{A},$$

представляющим дефект массы на один нуклон.

Величина f не имеет прямого физического смысла и лишь косвенно характеризует энергию связи ядер, однако ее использование упрощает подсчеты энергетического эффекта ядерных реакций (подробнее см. [4]).

§ 5. МАССА И ЭНЕРГИЯ

Так как масса электронов незначительна, то определение масс ядер сводится к определению масс атомов. Как известно из курса атомной физики, массы атомов определяются главным образом