

## Энергия связи ядра

Темы кодификатора ЕГЭ: энергия связи нуклонов в ядре, ядерные силы.

Атомное ядро, согласно нуклонной модели, состоит из нуклонов — протонов и нейтронов. Но какие силы удерживают нуклоны внутри ядра?

За счёт чего, например, держатся вместе два протона и два нейтрона внутри ядра атома гелия? Ведь протоны, отталкиваясь друг от друга электрическими силами, должны были бы разлететься в разные стороны! Может быть, это гравитационное притяжение нуклонов друг к другу не даёт ядру распасться?

Давайте проверим. Пусть два протона находятся на некотором расстоянии  $r$  друг от друга. Найдём отношение силы  $F_{\text{el}}$  их электрического отталкивания к силе  $F_{\text{gr}}$  их гравитационного притяжения:

$$\frac{F_{\text{el}}}{F_{\text{gr}}} = \frac{ke^2/r^2}{Gm^2/r^2} = \frac{ke^2}{Gm^2}.$$

Заряд протона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, масса протона  $m \approx 1,7 \cdot 10^{-27}$  кг, поэтому имеем:

$$\frac{F_{\text{el}}}{F_{\text{gr}}} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 1,6^2 \cdot 10^{-38}}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1,7^2 \cdot 10^{-54}} \sim 10^{36}.$$

Какое чудовищное превосходство электрической силы! Гравитационное притяжение протонов не то что не обеспечивает устойчивость ядра — оно вообще не заметно на фоне их взаимного электрического отталкивания.

Следовательно, существуют иные силы притяжения, которые скрепляют нуклоны внутри ядра и превосходят по величине силу электрического отталкивания протонов. Это — так называемые *ядерные силы*.

## Ядерные силы

До сих пор мы знали два типа взаимодействий в природе — гравитационные и электромагнитные. Ядерные силы случат проявлением нового, третьего по счёту типа взаимодействий — *сильного взаимодействия*. Мы не будем вдаваться в механизм возникновения ядерных сил, а лишь перечислим их наиболее важные свойства.

1. Ядерные силы действуют между любыми двумя нуклонами: протоном и протоном, протоном и нейтроном, нейтроном и нейтроном.
2. Ядерные силы притяжения протонов внутри ядра примерно в 100 раз превосходят силу электрического отталкивания протонов. Более мощных сил, чем ядерные, в природе не наблюдается.
3. Ядерные силы притяжения являются *короткодействующими*: радиус их действия составляет около  $10^{-15}$  м. Это и есть размер ядра — именно на таком расстоянии друг от друга нуклоны удерживаются ядерными силами. При увеличении расстояния ядерные силы очень быстро убывают; если расстояние между нуклонами станет равным  $2 \cdot 10^{-15}$  м, ядерные силы почти полностью исчезнут.

На расстояниях, меньших  $10^{-15}$  м, ядерные силы становятся силами отталкивания.

Сильное взаимодействие относится к числу фундаментальных — его нельзя объяснить на основе каких-то других типов взаимодействий. Способность к сильным взаимодействиям оказалась свойственной не только протонам и нейтронам, но и некоторым другим элементарным частицам; все такие частицы получили название *адронов*. Электроны и фотоны к адронам не относятся — они в сильных взаимодействиях не участвуют.

## Атомная единица массы

Массы атомов и элементарных частиц чрезвычайно малы, и измерять их в килограммах неудобно. Поэтому в атомной и ядерной физике часто применяется куда более мелкая единица — так называемая *атомная единица массы* (сокращённо *а. е. м.*).

По определению, *атомная единица массы есть 1/12 массы атома углерода  $^{12}\text{C}$* . Вот её значение с точностью до пяти знаков после запятой в стандартной записи:

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,66054 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

(Такая точность нам впоследствии понадобится для вычисления одной очень важной величины, постоянно применяющейся в расчётах энергии ядер и ядерных реакций.)

Оказывается, что 1 а. е. м., выраженная в граммах, численно равна величине, обратной к постоянной Авогадро  $N_A = 6,02214 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ :

$$\frac{1}{N_A} = \frac{1}{6,02214 \cdot 10^{23}} = 1,66054 \cdot 10^{-24} \text{ моль.}$$

Почему так получается? Вспомним, что число Авогадро есть число атомов в 12 г углерода. Кроме того, масса  $m_C$  атома углерода равна 12 а. е. м. Отсюда имеем:

$$12 \text{ г} = N_A m_C = N_A \cdot 12 \text{ а. е. м.},$$

поэтому  $N_A \cdot 1 \text{ а. е. м.} = 1 \text{ г}$ , что и требовалось.

Как вы помните, любое тело массы  $m$  обладает энергией покоя  $E$ , которая выражается формулой Эйнштейна:

$$E = mc^2. \tag{1}$$

Выясним, какая энергия заключена в одной атомной единице массы. Нам надо будет провести вычисления с достаточно высокой точностью, поэтому берём скорость света с пятью знаками после запятой:

$$c = 2,99792 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Итак, для массы  $m_1 = 1 \text{ а. е. м.}$  имеем соответствующую энергию покоя  $E_1$ :

$$E_1 = m_1 c^2 = 1,66054 \cdot 10^{-27} \cdot 2,99792^2 \cdot 10^{16} = 1,49241 \cdot 10^{-10} \text{ Дж.} \tag{2}$$

В случае малых частиц пользоваться джоулями неудобно — по той же причине, что и килограммами. Существует гораздо более мелкая единица измерения энергии — *электронвольт* (сокращённо *эВ*).

По определению, *1 эВ есть энергия, приобретаемая электроном при прохождении ускоряющей разности потенциалов 1 вольт*:

$$1 \text{ эВ} = eV = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \tag{3}$$

(вы помните, что в задачах достаточно использовать величину элементарного заряда в виде  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ , но здесь нам нужны более точные вычисления).

И вот теперь, наконец, мы готовы вычислить обещанную выше очень важную величину — *энергетический эквивалент атомной единицы массы*, выраженный в МэВ. Из (2) и (3) получаем:

$$E_1 = \frac{1,49241 \cdot 10^{-10}}{1,60218 \cdot 10^{-19}} = 0,93149 \cdot 10^9 \text{ эВ} = \mathbf{931,5 \text{ МэВ}}. \quad (4)$$

Итак, запоминаем: **энергия покоя одной а. е. м. равна 931,5 МэВ**. Этот факт вам неоднократно встретится при решении задач.

В дальнейшем нам понадобятся массы и энергии покоя протона, нейтрона и электрона. Приведём их с точностью, достаточной для решения задач.

$$\begin{aligned} m_p &= 1,00728 \text{ а. е. м.}, & E_p &= 938,3 \text{ МэВ}; \\ m_n &= 1,00867 \text{ а. е. м.}, & E_n &= 939,6 \text{ МэВ}; \\ m_e &= 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ а. е. м.}, & E_e &= 0,511 \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

## Дефект массы и энергия связи

Мы привыкли, что масса тела равна сумме масс частей, из которых оно состоит. В ядерной физике от этой простой мысли приходится отвыкать.

Давайте начнём с примера и возьмём хорошо знакомую нам  $\alpha$ -частицу — ядро  ${}^4_2\text{He}$ . В таблице (например, в задачнике Рымкевича) имеется значение массы *нейтрального атома* гелия: она равна 4,00260 а. е. м. Для нахождения массы  $M$  ядра гелия нужно из массы нейтрального атома вычесть массу двух электронов, находящихся в атоме:

$$M = 4,00260 - 2 \cdot 0,0005486 = 4,00150 \text{ а. е. м.}$$

В то же время, суммарная масса двух протонов и двух нейтронов, из которых состоит ядро гелия, равна:

$$2m_p + 2m_n = 2 \cdot 1,00728 + 2 \cdot 1,00867 = 4,03190 \text{ а. е. м.}$$

Мы видим, что сумма масс нуклонов, составляющих ядро, превышает массу ядра на

$$\Delta m = 2m_p + 2m_n - M = 4,03190 - 4,00150 = 0,0304 \text{ а. е. м.}$$

Величина  $\Delta m$  называется *дефектом массы*. В силу формулы Эйнштейна (1) дефекту массы отвечает изменение энергии:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 0,0304 \cdot 931,5 \approx 28 \text{ МэВ}.$$

Величина  $\Delta E$  обозначается также  $E_{\text{св}}$  и называется *энергией связи* ядра  ${}^4_2\text{He}$ . Таким образом, энергия связи  $\alpha$ -частицы составляет приблизительно 28 МэВ.

Каков же физический смысл энергии связи (и, стало быть, дефекта масс)?

Чтобы расщепить ядро на составляющие его протоны и нейтроны, нужно *совершить работу* против действия ядерных сил. Эта работа не меньше определённой величины  $A_{\text{min}}$ ; *минимальная* работа  $A_{\text{min}}$  по разрушению ядра совершается в случае, когда высвободившиеся протоны и нейтроны *покоятся*.

Ну а если над системой совершается работа, то энергия системы *возрастает* на величину совершённой работы. Поэтому суммарная энергия покоя нуклонов, составляющих ядро и взятых по отдельности, оказывается *больше* энергии покоя ядра на величину  $A_{\text{min}}$ .

Следовательно, и суммарная масса нуклонов, из которых состоит ядро, будет больше массы самого ядра. Вот почему возникает дефект массы.

В нашем примере с  $\alpha$ -частицей суммарная энергия покоя двух протонов и двух нейтронов больше энергии покоя ядра гелия на 28 МэВ. Это значит, что для расщепления ядра  ${}^4_2\text{He}$  на составляющие его нуклоны нужно совершить работу, равную как минимум 28 МэВ. Эту величину мы и назвали энергией связи ядра.

Итак, энергия связи ядра — это минимальная работа, которую необходимо совершить для расщепления ядра на составляющие его нуклоны.

Энергия связи ядра есть разность энергий покоя нуклонов ядра, взятых по отдельности, и энергии покоя самого ядра. Если ядро массы  $M$  состоит из  $Z$  протонов и  $N$  нейтронов, то для энергии связи  $E_{\text{св}}$  имеем:

$$E_{\text{св}} = (Zm_p + Nm_n)c^2 - Mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M)c^2.$$

Величина  $\Delta m = Zm_p + Nm_n - M$ , как мы уже знаем, называется дефектом массы.

## Удельная энергия связи

Важной характеристикой прочности ядра является его *удельная энергия связи*, равная отношению энергии связи к числу нуклонов:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{A}.$$

Удельная энергия связи есть энергия связи, приходящаяся на один нуклон, и имеет смысл средней работы, которую необходимо совершить для удаления нуклона из ядра.

На рис. 1 представлена зависимость удельной энергии связи естественных (то есть встречающихся в природе<sup>1</sup>) изотопов химических элементов от массового числа  $A$ .

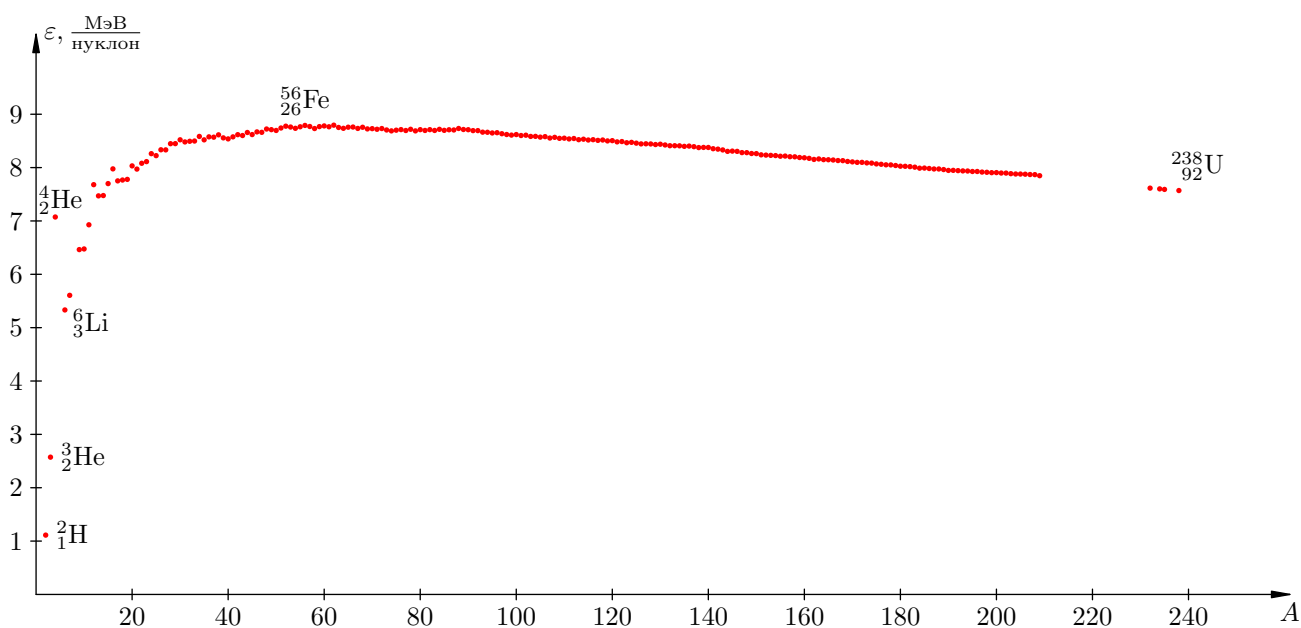


Рис. 1. Удельная энергия связи естественных изотопов

У лёгких элементов удельная энергия связи возрастает с ростом  $A$ , достигая максимального значения 8,8 МэВ/нуклон в окрестности железа  $^{56}_{26}\text{Fe}$  (то есть в диапазоне изменения  $A$  примерно от 50 до 65). Затем она плавно убывает до величины 7,6 МэВ/нуклон у урана  $^{238}_{92}\text{U}$ .

Такой характер зависимости удельной энергии связи от числа нуклонов объясняется совместным действием двух разнонаправленных факторов.

*Первый фактор — поверхностные эффекты.* Если нуклонов в ядре мало, то значительная их часть находится на поверхности ядра. Эти поверхностные нуклоны окружены меньшим числом соседей, чем внутренние нуклоны, и, соответственно, взаимодействуют с меньшим числом

<sup>1</sup>Элементы с массовыми числами 210–231, 233, 236, 237 в естественных условиях не встречаются. Этим объясняются пробелы в конце графика.

соседних нуклонов. При увеличении  $A$  доля внутренних нуклонов растёт, а доля поверхностных нуклонов — падает; поэтому работа, которую нужно совершить для удаления одного нуклона из ядра, в среднем должна увеличиваться с ростом  $A$ .

Однако с возрастанием числа нуклонов начинает проявляться *второй фактор* — *кулоновское отталкивание протонов*. Ведь чем больше протонов в ядре, тем большие электрические силы отталкивания стремятся разорвать ядро; иными словами, тем сильнее каждый протон отталкивается от остальных протонов. Поэтому работа, необходимая для удаления нуклона из ядра, в среднем должна уменьшаться с ростом  $A$ .

Пока нуклонов мало, первый фактор доминирует над вторым, и потому удельная энергия связи возрастает.

В окрестности железа ( $50 \leq A \leq 65$ ) действия обоих факторов сравниваются друг с другом, в результате чего удельная энергия связи выходит на максимум. Это область наиболее устойчивых, прочных ядер.

Затем второй фактор начинает перевешивать, и под действием всё возрастающих сил кулоновского отталкивания, распирающих ядро, удельная энергия связи убывает.

## Насыщение ядерных сил

Тот факт, что второй фактор доминирует у тяжёлых ядер, говорит об одной интересной особенности ядерных сил: они обладают свойством *насыщения*. Это означает, что каждый нуклон в большом ядре связан ядерными силами не со всеми остальными нуклонами, а лишь с небольшим числом своих соседей, и число это не зависит от размеров ядра.

Действительно, если бы такого насыщения не было, удельная энергия связи продолжала бы возрастать с увеличением  $A$  — ведь тогда каждый нуклон скреплялся бы ядерными силами со всё большим числом нуклонов ядра, так что первый фактор неизменно доминировал бы над вторым. У кулоновских сил отталкивания не было бы никаких шансов переломить ситуацию в свою пользу!