

## Энергетический выход ядерной реакции

Обсуждая энергию связи, мы видели, что в результате ядерных процессов масса системы частиц не остаётся постоянной. Это, в свою очередь, приводит к тому, что кинетическая энергия продуктов ядерной реакции отличается от кинетической энергии исходных частиц.

Прежде всего напомним, что полная энергия  $E$  частицы массы  $m$  складывается из её энергии покоя  $mc^2$  и кинетической энергии  $K$ :

$$E = mc^2 + K.$$

Пусть в результате столкновения частиц  $A$  и  $B$  происходит ядерная реакция, продуктами которой служат частицы  $X$  и  $Y$ :



Полная энергия системы частиц сохраняется:

$$E_A + E_B = E_X + E_Y,$$

то есть

$$(m_A c^2 + K_A) + (m_B c^2 + K_B) = (m_X c^2 + K_X) + (m_Y c^2 + K_Y). \quad (32)$$

Кинетическая энергия исходных частиц равна  $K_A + K_B$ . Кинетическая энергия продуктов реакции равна  $K_X + K_Y$ . *Энергетический выход*  $Q$  ядерной реакции — это разность кинетических энергий продуктов реакции и исходных частиц:

$$Q = (K_X + K_Y) - (K_A + K_B).$$

Из (32) легко получаем:

$$Q = (m_A + m_B - m_X - m_Y)c^2. \quad (33)$$

Если  $Q > 0$ , то говорят, что реакция идёт *с выделением энергии*: кинетическая энергия продуктов реакции *больше* кинетической энергии исходных частиц. Из (33) мы видим, что в этом случае суммарная масса продуктов реакции *меньше* суммарной массы исходных частиц.

Если же  $Q < 0$ , то реакция идёт *с поглощением энергии*: кинетическая энергия продуктов реакции *меньше* кинетической энергии исходных частиц. Суммарная масса продуктов реакции в этом случае *больше* суммарной массы исходных частиц.

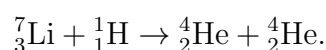
Таким образом, термины «выделение» и «поглощение» энергии не должны вызывать недоумение: они относятся только к *кинетической* энергии частиц. Полная энергия системы частиц, разумеется, в любой реакции остаётся неизменной.

Чтобы посчитать энергетический выход  $Q$  ядерной реакции (31), действуем по следующему алгоритму.

1. С помощью таблицы масс нейтральных атомов находим  $m_A$ ,  $m_B$ ,  $m_X$  и  $m_Y$ , выраженные в а. е. м. (для нахождения массы ядра не забываем вычесть из массы нейтрального атома массу электронов).
2. Вычисляем массу  $m_1 = m_A + m_B$  исходных частиц, массу  $m_2 = m_X + m_Y$  продуктов реакции и находим разность масс  $\Delta m = m_1 - m_2$ .
3. Умножаем  $\Delta m$  на 931,5 и получаем величину  $Q$ , выраженную в МэВ.

Мы сейчас подробно рассмотрим вычисление энергетического выхода  $Q$  на двух примерах бомбардировки ядер лития  ${}^7_3\text{Li}$ : сначала — протонами, затем —  $\alpha$ -частицами.

В первом случае имеем уже упоминавшуюся выше реакцию (30):



Масса атома лития  ${}^7_3\text{Li}$  равна 7,01601 а. е. м. Масса электрона равна 0,000548 а. е. м. Вычитая из массы атома массу трёх его электронов, получаем *массу ядра лития*  ${}^7_3\text{Li}$ :

$$7,01601 - 3 \cdot 0,000548 = 7,01437 \text{ а. е. м.}$$

Масса протона равна 1,00728 а. е. м., так что масса исходных частиц:

$$m_1 = 7,01437 + 1,00728 = 8,02165 \text{ а. е. м.}$$

Переходим к продуктам реакции. Масса атома гелия равна 4,00260 а. е. м. Вычитаем массу электронов и находим *массу ядра гелия*  ${}^4_2\text{He}$ :

$$4,00260 - 2 \cdot 0,000548 = 4,00150 \text{ а. е. м.}$$

Умножая на 2, получаем массу продуктов реакции:

$$m_2 = 2 \cdot 4,00150 = 8,00300 \text{ а. е. м.}$$

Масса, как видим, уменьшилась ( $m_2 < m_1$ ); это означает, что наша реакция идёт с выделением энергии. Разность масс:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 8,02165 - 8,00300 = 0,01865 \text{ а. е. м.}$$

Выделившаяся энергия:

$$Q = 0,01865 \cdot 931,5 = 17,4 \text{ МэВ.}$$

Теперь рассмотрим второй пример. При бомбардировке ядер лития  $\alpha$ -частицами происходит реакция:



Массы исходных ядер нам уже известны; остаётся сосчитать их суммарную массу:

$$m_1 = 7,01437 + 4,00150 = 11,01587 \text{ а. е. м.}$$

Из таблицы берём массу атома бора  ${}^{10}_5\text{B}$  (она равна 10,01294 а. е. м.); вычитаем массу пяти электронов и получаем массу ядра атома бора:

$$10,01294 - 5 \cdot 0,000548 = 10,01020 \text{ а. е. м.}$$

Масса нейтрона равна 1,00867 а. е. м. Находим массу продуктов реакции:

$$m_2 = 10,01020 + 1,00867 = 11,01887 \text{ а. е. м.}$$

На сей раз масса увеличилась ( $m_2 > m_1$ ), то есть реакция идёт с поглощением энергии. Разность масс равна:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = -0,0030 \text{ а. е. м.}$$

Энергетический выход реакции:

$$Q = -0,0030 \cdot 931,5 = -2,8 \text{ МэВ.}$$

Таким образом, в реакции (34) поглощается энергия 2,8 МэВ. Это означает, что суммарная кинетическая энергия продуктов реакции (ядра бора и нейтрона) на 2,8 МэВ меньше, чем суммарная кинетическая энергия исходных частиц (ядра лития и  $\alpha$ -частицы). Поэтому, чтобы данная реакция в принципе осуществилась, энергия исходных частиц должна быть не меньше величины 2,8 МэВ.