

16. ДЕФЕКТ МАСС И ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Дефект масс ядра

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_a = Zm_H + (A - Z)m_n - m_a,$$

где m_H , m_p , m_n , m_a и m_n – масса атома водорода, протона, нейтрона, атома и ядра соответственно; Z и A – зарядовое и массовое числа.

Энергия связи ядра

$$E_{\text{св}} = c^2 \Delta m. \quad (16.1)$$

Удельная энергия связи – энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

$$\varepsilon_{\text{св}} = E_{\text{св}}/A.$$

Энергия ядерной реакции

$$Q = c^2(m_1 + m_2 - \sum m'_i) = c^2 \Delta m, \quad (16.2)$$

где m_1 и m_2 – массы покоя частиц, вступающих в реакцию; $\sum m'_i$ – сумма масс покоя частиц, образовавшихся в результате реакции; Δm – дефект массы реакции.

Пример 1. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра $^{16}_8\text{O}$.

Решение. Для ядра $^{16}_8\text{O}$ $Z = 8$ и $A = 16$. Дефект массы ядра $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_a$. Из справочных таблиц находим $m_p = 1,00783$ а.е.м.; $m_n = 1,00867$ а.е.м.; $m_{^{16}_8\text{O}} = 15,99492$ а.е.м.

Подставляя числовые данные, получим $\Delta m = 0,13708$ а.е.м. Энергия связи определяется по формуле (16.1). Если дефект массы выражать в атомных единицах массы, а энергию связи – в мегаэлектрон-вольтах, то формула принимает вид $E_{\text{св}} = 931\Delta m$. Подставляя числовые значения, получим $E_{\text{св}} = 128$ МэВ. Удельная энергия связи $\varepsilon_{\text{св}} = E_{\text{св}}/A = 8$ МэВ.

Пример 2. Вычислить энергию ядерной реакции $^4_2\text{He} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^1_1\text{p} + ^7_3\text{Li}$. Выделяется или поглощается энергия при этой реакции?

Решение. При вычислении энергии ядерной реакции по формуле (16.2) можно использовать вместо масс ядер массы соответствующих атомов. Из справочных данных находим $m_{^4_2\text{He}} = 4,00260$ а.е.м.; $m_p = 1,00783$ а.е.м.; $m_{^7_3\text{Li}} = 7,01601$ а.е.м. Дефект массы реакции $\Delta m = 2m_{^4_2\text{He}} - m_p - m_{^7_3\text{Li}} = -0,01864$ а.е.м. Тогда $Q = -17,3$ МэВ. Отрицательный знак говорит о том, что энергия в результате реакции поглощается.

Пример 3. Найти энергию реакции $^9_4\text{Be} + ^1_1\text{H} = ^4_2\text{He} + ^6_3\text{Li}$, если известно, что кинетическая энергия протона 5,45 МэВ, ядра гелия 4 МэВ и что ядро гелия вылетело под углом 90° к направлению движения протона. Ядро-мишень ^9_4Be неподвижно.

Решение. Энергия реакции есть разность между суммой кинетических энергий ядер-продуктов реакции и кинетической энергии налетающего ядра: $Q = T_{\text{Li}} + T_{\text{He}} + T_{\text{H}}$. В этом выражении неизвестна кинетическая энергия лития. Для ее определения воспользуемся законом сохранения импульса $p_{\text{H}} = p_{\text{He}} + p_{\text{Li}}$. Векторы p_{H} и p_{He} по условию взаимно перпендикулярны и, следовательно, вместе с вектором p_{Li} образуют прямоугольный треугольник. Поэтому $p_{\text{Li}}^2 = p_{\text{He}}^2 + p_{\text{H}}^2$. Выразим импульсы ядер через их кинетические энергии. Так как кинетические энергии ядер, по условию много меньше энергий покоя этих ядер, то можно воспользоваться классической формулой $p^2 = 2mT$. После преобразований получим $m_{\text{Li}}T_{\text{Li}} = m_{\text{He}}T_{\text{He}} + m_{\text{H}}T_{\text{H}}$, откуда $T_{\text{Li}} = 3,58$ МэВ и $Q = 2,13$ МэВ.

Задачи.

1. Оценить разность масс Δm атома водорода в состояниях 2P и 1S.
2. Воспользовавшись таблицей масс изотопов, определить энергию связи (в мегаэлектронвольтах) на один нуклон для ядер ^4_2He ; $^{20}_{10}\text{Ne}$; $^{207}_{82}\text{Pb}$ и $^{235}_{92}\text{U}$.

3. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи дейтерия.
4. Каковы дефект массы, энергия связи и удельная энергия связи α -частицы?
5. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ${}^1_5\text{B}$; ${}^{48}_{20}\text{Ca}$; ${}^{238}_{92}\text{U}$ и ${}^{12}_6\text{C}$.
6. Определить минимальную энергию (в мегаэлектрон-вольтах), необходимую для разделения ядра ${}^{12}_6\text{C}$ на три α -частицы.
7. Какую энергию нужно затратить для отрыва нейтрона от ${}^{23}_{11}\text{Na}$?
8. Найти энергию связи ядер ${}^3_1\text{H}$ и ${}^3_2\text{He}$. Какое из этих ядер наиболее устойчиво?
9. Сравнить удельную энергию связи ядер ${}^7_3\text{Li}$ и ${}^{27}_{13}\text{Al}$. Какое из этих ядер наиболее устойчиво?
10. Какое количество термоядерной энергии содержится в 1 л обычной воды?
11. Определить энергию, освобождающуюся в водородной бомбе при синтезе 1 кг гелия.
12. В процессе термоядерного синтеза $5 \cdot 10^4$ кг водорода превращаются в 49644 кг гелия. Сколько энергии выделяется при этом?
13. При обстреле ядер фтора ${}^{19}_9\text{F}$ протонами образуется кислород ${}^{16}_8\text{O}$. Сколько энергии освобождается при этой реакции и какие еще ядра образуются?
14. При использовании дейтерия, содержащегося в 1 л обычной воды, в реакции термоядерного синтеза выделяется столько же энергии, сколько получается при сжигании 350 л бензина. Подсчитать эту энергию.
15. Какую массу воды, взятой при $t = 0^\circ\text{C}$, можно довести до кипения, используя энергию термоядерного синтеза гелия из дейтерия и трития, если КПД преобразования энергии 10 %? Масса синтезированного гелия 1 г.
16. Определить энергию, выделяющуюся в акте синтеза дейтерия $p + n \rightarrow {}^2_1\text{H}$.
17. При делении одного ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$ на два осколка выделяется около 200 МэВ энергии. Какое количество энергии освобождается при «сжигании» в ядерном реакторе 11 г этого изотопа? Какое количество каменного угля надо сжечь для получения такого же количества энергии?
18. Вычислить энергию ядерной реакции ${}_0^1n + {}^{10}_5\text{B} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He}$ и выяснить, выделяется или поглощается энергия в реакции.
19. Определить энергию ядерной реакции ${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1p$, а также выяснить, выделяется или поглощается энергия в этой реакции.
20. При бомбардировке алюминия ${}^{27}_{13}\text{Al}$ α -частицами образуется фосфор ${}^{30}_{15}\text{P}$. Записать эту реакцию и подсчитать выделенную энергию.
21. Определить максимальную кинетическую энергию электрона, испускаемого при распаде нейтрона.
22. Найти минимальную энергию и частоту гамма-кванта, способного «разбить» ядро дейтерия на протон и нейтрон.
23. Какую минимальную кинетическую энергию должна иметь α -частица для осуществления ядерной реакции ${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0n$?
24. В результате взаимодействия ядер дейтерия и трития образуется ядро гелия и нейтрон: ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0n$. Какую часть выделяющейся энергии уносит с собой нейтрон? Кинетической энергией дейтерия и трития до реакции можно пренебречь.
25. Мишень ${}^7_3\text{Li}$ подвергают бомбардировке нейтронами. Какова кинетическая энергия этих нейтронов, если в направлении движения нейтронов вылетают α -частицы с кинетической энергией 3,0 МэВ? Энергией испускаемых γ -квантов можно пренебречь.