

Ответ:  $m_{\pi} = 273,1m_e$ .

11. Построить из кварка и антикварка следующие мезоны:  $\pi^+$ ,  $k^-$  и  $k^0$ .

Ответ:  $\pi^+$  ( $u\bar{d}$ ),  $k^-$  ( $\bar{u}d$ ),  $k^0$  ( $\bar{d}s$ ).

12. При упругом центральном столкновении нейтрона с неподвижным ядром замедляющего вещества, кинетическая энергия нейтрона уменьшилась в 1,4 раза. Найти массу  $m$  ядер замедляющего вещества.

Ответ:  $m = 12$  а.е.м. (графит).

13. Какую часть первоначальной скорости будет составлять скорость нейтрона после упругого центрального столкновения с неподвижным ядром изотопа  ${}_{11}^{23}\text{Na}$ ?

Ответ: 92 %.

14. Для получения медленных нейтронов их пропускают через вещества, содержащие водород (например, парафин). Какую наибольшую часть своей кинетической энергии нейтрон массой  $m_0$  может передать: а) протону (масса  $m_0$ ), б) ядру атома свинца (масса  $207m_0$ )? Наибольшая часть передаваемой энергии соответствует упругому центральному столкновению.

Ответ: а) 100 %, б) 1,9 %.

15. Найти в предыдущей задаче распределение энергии между нейтроном и протоном, если столкновение неупругое. Нейтрон при каждом столкновении отклоняется в среднем на угол  $\varphi = 45^\circ$ .

Ответ: энергия распределяется поровну между нейтроном и протоном.

16. Нейтрон, обладающий энергией  $W_0 = 4,6$  МэВ, в результате столкновений с протонами замедляется. Сколько столкновений он должен испытать, чтобы его энергия уменьшилась до  $W = 0,23$  эВ? Нейтрон отклоняется при каждом столкновении в среднем на угол  $\varphi = 45^\circ$ .

Ответ:  $n = 24$ .

## Занятие № 16

Тема: Энергия связи ядра. Деление ядер. Цепная ядерная реакция

### Краткая теория

Энергия связи ядра определяется соотношением

$$W = c^2 \Delta m,$$

где  $\Delta m$  – разность между массой частиц, составляющих ядро, и массой самого ядра (дефект массы):

$$\Delta m = zm_p + (A - z)m_n - m_{\text{я}},$$

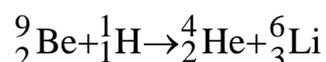
где  $z$  – порядковый номер изотопа,  $A$  – массовое число,  $m_p$  – масса протона,  $m_n$  – масса нейтрона,  $m_{\text{я}}$  – масса ядра изотопа.

Изменение энергии при ядерной реакции

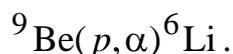
$$Q = c^2(\sum m_1 - \sum m_2),$$

где  $\sum m_1$  – сумма масс частиц до реакции,  $\sum m_2$  – сумма масс частиц после реакции.

Символическая запись ядерной реакции может быть дана в развернутом виде, например,



или сокращенно



В ядерных реакциях выполняются законы сохранения:  
числа нуклонов

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4;$$

заряда

$$z_1 + z_2 = z_3 + z_4;$$

релятивистской полной энергии

$$E_1 + E_2 = E_3 + E_4;$$

импульса

$$\bar{p}_1 + \bar{p}_2 = \bar{p}_3 + \bar{p}_4.$$

Цепная реакция деления характеризуется коэффициентом размножения  $k$  нейтронов, который равен отношению числа нейтронов в данном поколении к их числу в предыдущем поколении.

Число нейтронов  $N$  в момент времени  $t$  определяется по формуле

$$N = N_0 e^{-\frac{(k-1)t}{T}},$$

где  $N_0$  – число нейтронов в начальный момент времени,  $T$  – среднее время жизни одного поколения.

### Примеры решения задач

**Задача 16.1.** Вычислить энергию ядерной реакции  ${}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \rightarrow p + {}^7_3\text{Li}$ . Выделяется или поглощается энергия при этой реакции?

#### Решение

Энергия ядерной реакции определяется по формуле:

$$Q = c^2(m_1 + m_2 - \sum m'_i), \quad (1)$$

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

Если массу частиц выражать в а.е.м., а энергию реакции в МэВ, то формула (1) примет вид

$$Q = 931(m_1 + m_2 - \sum m'_i). \quad (2)$$

При вычислении энергии ядерной реакции можно использовать массы атомов вместо масс их ядер. Из справочных данных находим

$$m_{{}^4_2\text{He}} = 4,00260 \text{ а.е.м.};$$

$$m_{{}^1_1\text{H}} = 1,00783 \text{ а.е.м.};$$

$$m_{{}^7_3\text{Li}} = 7,01601 \text{ а.е.м.}$$

Дефект массы реакции равен

$$2m_{{}^4_2\text{He}} - m_{{}^1_1\text{H}} - m_{{}^7_3\text{Li}} = -0,01864 \text{ а.е.м.}$$

Подставляя значения дефекта массы реакции в (2), получим

$$Q = 931(-0,01864) = -17,4 \text{ МэВ.}$$

Поскольку  $Q < 0$ , то энергия в результате реакции поглощается.

Ответ:  $Q = -17,4$  МэВ. Энергия поглощается.

**Задача 16.2.** Найти энергию реакции  ${}^9_4\text{Be} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^6_3\text{Li}$ , если известно, что кинетические энергии протона  $T_{\text{H}} = 5,45$  МэВ, ядра гелия  $T_{\text{He}} = 4$  МэВ и что ядро гелия вылетело под углом  $90^\circ$  к направлению движения протона. Ядро мишень  ${}^9_4\text{Be}$  неподвижно.

### Решение

$T_{\text{H}} = 5,45$ МэВ $T_{\text{He}} = 4$ МэВ <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black;"/> $Q - ?$	Энергия реакции $Q$ есть разность между суммой кинетических энергий ядер продуктов в реакции и кинетической энергией налетающего ядра:
---	--

$$Q = T_{\text{Li}} + T_{\text{He}} - T_{\text{H}}.$$

Для определения  $T_{\text{Li}}$  лития воспользуемся законом сохранения импульса

$$\vec{P}_{\text{H}} = \vec{P}_{\text{He}} + \vec{P}_{\text{Li}}.$$

Векторы  $\vec{P}_{\text{H}}$  и  $\vec{P}_{\text{He}}$  по условию задачи взаимно перпендикулярны, поэтому

$$P_{\text{Li}}^2 = P_{\text{He}}^2 + P_{\text{H}}^2.$$

Выразим импульсы ядер через их кинетические энергии. Можно воспользоваться классической формулой

$$p^2 = 2mT.$$

Тогда

$$m_{\text{Li}}T_{\text{Li}} = m_{\text{He}}T_{\text{He}} + m_{\text{H}}T_{\text{H}}.$$

Откуда

$$T_{\text{Li}} = \frac{m_{\text{He}}T_{\text{He}} + m_{\text{H}}T_{\text{H}}}{m_{\text{Li}}} = \frac{4 \cdot 4 + 1 \cdot 5,45}{6} = 3,58 \text{ МэВ}.$$

Подставив числовые значения, получим

$$Q = T_{\text{He}} + T_{\text{Li}} - T_{\text{H}} = (3,58 + 4 - 5,45) = 2,13 \text{ МэВ}.$$

Ответ:  $Q = 2,13$  МэВ.

**Задача 16.3.** Какую энергию  $W$  (в киловатт-часах) можно получить от деления массы  $m = 1$  г урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , если при каждом акте распада выделяется энергия  $Q = 200$  МэВ?

**Решение**

$m = 1$ г урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ $Q = 200$ МэВ <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black;"/> $W - ?$	как	Полученная энергия $W$ может быть представлена  $W = QN,$
---	-----	---

где  $N$  – число атомов, содержащихся в 1 г урана.

$$N = \frac{m}{M} N_A,$$

где  $M$  – молярная масса урана,  $N_A$  – число Авогадро.

Тогда

$$W = Q \frac{m}{M} N_A = 200 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{1 \cdot 10^{-3}}{235 \cdot 10^{-3}} 6,02 \cdot 10^{23} = 8,2 \cdot 10^{12} \text{ Дж.}$$

Учитывая, что  $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ , получим

$$W = \frac{8,2 \cdot 10^{12}}{3,6 \cdot 10^6} = 2,3 \cdot 10^4 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Ответ:  $W = 2,3 \cdot 10^4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ .

**Задача 16.4.** Определите, во сколько раз увеличится число нейтронов в цепной ядерной реакции за время  $t = 10$  с, если среднее время жизни  $T$  одного поколения составляет 80 мс, а коэффициент размножения нейтронов  $k = 1,002$ .

**Решение**

$T = 10$ с $T = 80$ мс = $8 \cdot 10^{-2}$ с $k = 1,002$ <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black;"/> $N/N_0 - ?$	как	Из формулы для числа нейтронов в момент времени $t$ получим отношение $N/N_0$ :  $N = N_0 e^{\frac{(k-1)t}{T}},$
---	-----	--

$$\frac{N}{N_0} = e^{\frac{(k-1)t}{T}} = e^{\frac{(1,002-1) \cdot 10}{8 \cdot 10^{-2}}} = 1,284.$$

Ответ:  $\frac{N}{N_0} = 1,284.$

### Задачи для самостоятельного решения

1. Вычислить дефект массы и энергию связи ядра элемента  ${}_{12}^{24}\text{Mg}$ .

Ответ:  $\Delta m = 3,5 \cdot 10^{-28}$  кг,  $E_{\text{св}} = 3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж.

2. Найти энергию  $Q$ , выделяющуюся при реакции  ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ .

Ответ:  $Q = 17,3$  МэВ.

3. Найти энергию  $Q$ , поглощенную при реакции  ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^{17}_8\text{O}$ .

Ответ:  $Q = 1,18$  МэВ.

4. Вычислить энергию термоядерной реакции  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ .

Ответ:  $E = 17,6$  МэВ.

5. Какое количество энергии освобождается при соединении одного протона и двух нейтронов в одно ядро?

Ответ:  $E = 8$  МэВ.

6. При делении одного ядра урана-235 выделяется энергия 200 МэВ. Каждую долю энергии покоя ядра урана-235 составляет выделившаяся энергия?

Ответ: 0,00091.

7. Какая масса  $m$  урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$  расходуется за время  $t = 1$  сут на атомной электростанции мощностью  $P = 5000$  кВт? КПД принять равным 17%. Считать, что в каждом акте распада выделяется энергия  $Q = 200$  МэВ.

Ответ:  $m = 31$  г.

8. Найти электрическую мощность атомной электростанции, расходующей 0,1 кг урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$  в сутки, если КПД станции 16%.

Ответ:  $N = 15$  МВт.

9. Сколько ядер урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$  должно делиться в 1 с, чтобы тепловая мощность ядерного реактора была равна 1 Вт?

Ответ:  $3,1 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ .