

## Ядерные реакции

*Энергетический выход ядерной реакции* — это разность  $Q$  кинетической энергии продуктов реакции и кинетической энергии исходных частиц. Если  $Q > 0$ , то реакция идёт с *выделением энергии*; если  $Q < 0$ , то реакция идёт с *поглощением энергии*.

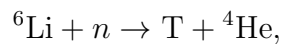
**ЗАДАЧА 1.** Ядерная реакция, в которой частица массы  $m$  налетает на неподвижную частицу-мишень массы  $M$ , может идти, если энергия налетающей частицы превышает пороговое значение  $T$ . Какая энергия поглощается в этой реакции?

$$J \frac{m+M}{M} = \delta$$

**ЗАДАЧА 2.** (МФТИ, 1979) Радон — это  $\alpha$ -радиоактивный газ с атомным весом  $A = 222$ . Какую долю полной энергии, освобождаемой при распаде радона, уносит  $\alpha$ -частица?

$$286\% = \frac{v}{v-v} = \frac{J}{vL}$$

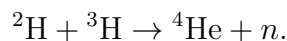
**ЗАДАЧА 3.** (МФТИ, 1976) При захвате нейтрона ядром лития происходит ядерная реакция



в которой выделяется энергия  $Q = 4,8$  МэВ. Найти распределение энергии между продуктами реакции, считая кинетическую энергию исходных частиц пренебрежимо малой.

$$E_{\text{T}} = \frac{m_{\alpha}}{m_{\alpha} + m_{\text{T}}} Q = 2,74 \text{ МэВ}, E_{\alpha} = \frac{m_{\text{T}}}{m_{\alpha} + m_{\text{T}}} Q = 2,06 \text{ МэВ}$$

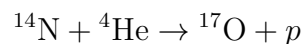
**ЗАДАЧА 4.** (МФТИ, 1979) В результате взаимодействия ядер дейтерия и трития образуются ядро гелия и нейтрон:



При этом выделяется значительная энергия. Какую часть её уносит с собой нейтрон? Кинетическими энергиями дейтерия и трития до реакции можно пренебречь по сравнению с выделившейся энергией.

$$8\%$$

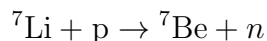
**ЗАДАЧА 5.** (МФТИ, 1980) Ядерная реакция



может идти, если налетающие на неподвижные ядра азота  $\alpha$ -частицы имеют энергию, превышающую пороговую энергию  $E_{\text{п}} = 1,45$  МэВ. На сколько энергия  $\alpha$ -частиц должна быть больше пороговой, чтобы кинетическая энергия образующихся в реакции протонов была равна нулю?

$$\Delta E = E_{\text{п}} \left( \frac{m_{\text{O}} + m_{\text{N}}}{m_{\text{O}} + m_{\text{N}}} \right) \left( \frac{m_{\alpha} - m_{\text{O}}}{m_{\alpha} + m_{\text{O}}} \right) \approx \frac{11}{2} E_{\text{п}} \approx 25 \text{ кэВ}$$

ЗАДАЧА 6. (МФТИ, 1980) В ядерной реакции



протоны налетают на покоящиеся ядра лития. Если энергия налетающих протонов равна  $E = 1,92$  МэВ, то нейтроны, образующиеся в реакции, покоятся. На сколько можно уменьшить энергию налетающих протонов, чтобы реакция вообще могла идти?

$$\Delta E \approx E \frac{6}{7} = 1,64 \text{ МэВ}$$

ЗАДАЧА 7. (МОШ, 2007, 11) Если направить поток протонов на кусок льда из тяжёлой воды  $\text{D}_2\text{O}$ , то при минимальной кинетической энергии протонов  $E_1 = 1,4$  МэВ происходит ядерная реакция с образованием ядер  ${}^3_2\text{He}$ . Какую минимальную кинетическую энергию  $E_2$  надо сообщить ядрам дейтерия, чтобы при их попадании на кусок льда из обычной воды произошла эта же ядерная реакция?

$$E_2 = 2E_1 = 2,8 \text{ МэВ}$$

Массы покоя протона, нейтрона и электрона:

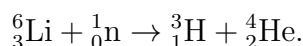
$$m_p = 1,00728 \text{ а. е. м.}, \quad m_n = 1,00867 \text{ а. е. м.}, \quad m_e = 0,00055 \text{ а. е. м.}$$

ЗАДАЧА 8. а) Какую минимальную работу (против действия ядерных сил) необходимо совершить, чтобы разбить ядро  ${}^7_3\text{Li}$  на составляющие его нуклоны? Масса нейтрального атома данного изотопа лития равна 7,01601 а. е. м.

б) Вычислите энергию связи ядра  ${}^{27}_{13}\text{Al}$ . Масса атома алюминия равна 26,98146 а. е. м.

$$\text{а) } 39,2 \text{ МэВ; б) } 225,1 \text{ МэВ}$$

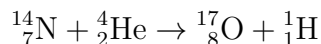
ЗАДАЧА 9. Найдите энергетический выход ядерной реакции



Массы атомов (в а. е. м.): 6,01513 (литий); 3,01605 (тритий); 4,00260 (гелий).

$$Q = 4,8 \text{ МэВ}$$

ЗАДАЧА 10. Ядерная реакция



идёт с поглощением энергии  $Q$ .

а) Вычислите величину  $Q$ , если массы атомов изотопов, участвующих в реакции, равны (в а. е. м.): 14,00307 (азот); 4,00260 (гелий); 16,99913 (кислород); 1,00783 (водород).

б) (Порог реакции) Какую минимальную кинетическую энергию  $T$  должна иметь  $\alpha$ -частица, налетающая на неподвижное ядро азота, чтобы эта реакция могла идти?

$$\text{а) } Q = 1,2 \text{ МэВ; б) } T \approx \frac{1}{6} Q = 0,2 \text{ МэВ}$$

ЗАДАЧА 11. Какую минимальную кинетическую энергию должен иметь протон, чтобы разбить неподвижное ядро дейтерия на протон и нейтрон? Масса атома дейтерия равна 2,01410 а. е. м.

$$3,35 \text{ МэВ}$$

Задача 12. (МФО, 2014, 11) За год из 4 г радиоактивного вещества распадается 1 г. Сколько граммов из 4 г этого вещества распадётся за два года? А за три года? За  $n$  лет?

$$\ln \left( \frac{m}{m_0} \right) = -\lambda t$$

Задача 13. (МФТИ, 1978) В микрокалориметр теплоёмкостью  $C = 100$  Дж/°С помещён образец изотопа кобальта с относительной атомной массой  $A = 61$ . Масса образца  $m = 10$  мг. При распаде ядра  $^{61}\text{Co}$  выделяется энергия  $W = 2 \cdot 10^{-19}$  Дж. Через время  $\tau = 50$  мин температура калориметра повысилась на  $\Delta t = 0,06$  °С. Оценить период полураспада  $^{61}\text{Co}$ . Число Авогадро  $N_0 = 6 \cdot 10^{23}$ .

$$N_0 \approx \frac{C \Delta t}{W \tau} = \lambda$$

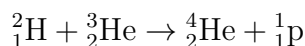
Задача 14. (МФТИ, 1979) В некоторый момент времени счётчик радиоактивного излучения, расположенный вблизи препарата  $^{18}\text{F}$  с малым периодом полураспада, зафиксировал  $N_0 = 100$  отсчётов в секунду. Через время  $\tau = 22$  мин показание уменьшилось до  $N_1 = 87$  отсчётов в секунду. Определите период полураспада  $^{18}\text{F}$ .

$$N_1 = N_0 e^{-\lambda \tau}$$

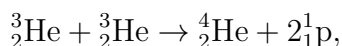
Задача 15. (МФТИ, 1979) Ампула с радиоактивным препаратом  $^{24}\text{Na}$  (период полураспада  $\tau = 15$  час) охлаждается потоком воздуха. В начале опыта воздух нагревается на  $\Delta t = 2$  °С. Через какое время охлаждающий ампулу воздух будет нагреваться на  $\Delta t_1 = 1,8$  °С?

$$\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t} = -\lambda \tau$$

Задача 16. (МФТИ, 1989) Термоядерная реакция



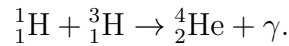
идёт с выделением энергии  $E_1 = 18,4$  МэВ (кинетическая энергия образовавшихся частиц на величину  $E_1$  больше кинетической энергии исходных). Какая энергия  $E_2$  выделяется в реакции



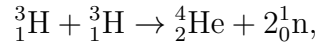
если дефект масс ядра  ${}^3_2\text{He}$  на  $\Delta m = 0,006$  а. е. м. больше, чем у ядра  ${}^2_1\text{H}$ ? Одной атомной единице массы (а. е. м.) соответствует энергия 931,5 МэВ.

$$E_2 = E_1 - \Delta m c^2 \approx 12,8 \text{ МэВ}$$

ЗАДАЧА 17. (МФТИ, 1989) При слиянии протона и ядра трития образуются  $\alpha$ -частица и  $\gamma$ -квант:



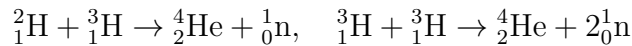
Дефект масс ядра  ${}^4_2\text{He}$  составляет  $\Delta m = 0,0304$  а. е. м. (одной а. е. м. — атомной единице массы — соответствует энергия 931,5 МэВ). Кинетическая энергия частиц, образующихся в реакции



на  $Q = 11,3$  МэВ больше кинетической энергии исходных частиц. Определить, какую энергию уносит  $\gamma$ -квант в первой реакции, если кинетическими энергиями ядер  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^3_1\text{H}$  и  ${}^4_2\text{He}$  в ней можно пренебречь.

$$E_{\gamma} \approx (2m_{\text{H}} + Q) \frac{E_1}{E_2} = 19,8 \text{ МэВ}$$

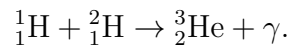
ЗАДАЧА 18. (МФТИ, 1989) В термоядерных реакциях



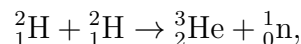
суммарная кинетическая энергия образовавшихся частиц больше суммарной кинетической энергии исходных частиц на величины  $E_1 = 17,6$  МэВ и  $E_2 = 11,3$  МэВ соответственно. Определить дефект масс ядра  ${}^3_1\text{H}$ , если у ядра  ${}^2_1\text{H}$  он составляет 0,00239 а. е. м. Одной атомной единице массы (а. е. м.) соответствует энергия 931,5 МэВ.

$$\Delta m \approx 0,009 \text{ а. е. м.}$$

ЗАДАЧА 19. (МФТИ, 1989) При слиянии протона и ядра дейтерия образуются ядро  ${}^3_2\text{He}$  и  $\gamma$ -квант:



Энергия кванта значительно больше кинетических энергий ядер  ${}^3_2\text{He}$ ,  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$  и равна 5,5 МэВ. Кинетическая энергия частиц, образующихся в реакции



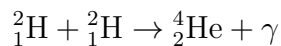
на 3,3 МэВ больше кинетической энергии исходных частиц. Определить дефект масс ядра  ${}^3_2\text{He}$ . Дефект масс измеряется в атомных единицах массы (а. е. м.), одной а. е. м. соответствует энергия 931,5 МэВ.

$$\Delta m \approx 0,0083 \text{ а. е. м.}$$

ЗАДАЧА 20. (МФТИ, 1990) Образовавшееся в результате ядерной реакции неподвижное ядро  ${}^{40}_{19}\text{K}$  испускает  $\gamma$ -квант с энергией  $E_{\gamma} = 9,4$  кэВ. Определить кинетическую энергию ядра после испускания кванта. Одной атомной единице массы соответствует энергия  $E_1 = 931,5$  МэВ.

$$E_2 = \frac{E_{\gamma}^2}{2E_1} \approx 0,10 \text{ эВ}$$

Задача 21. (МФТИ, 1990) В ядерной реакции



образуется медленно движущаяся по сравнению со скоростью света  $\alpha$ -частица и квант света  $\gamma$  с энергией  $Q = 19,7$  МэВ. Пренебрегая скоростями вступающих в реакцию ядер, найти скорость образовавшейся  $\alpha$ -частицы. Энергию покоя  $\alpha$ -частицы принять равной  $mc^2 = 3730$  МэВ.

$$\frac{v}{c} \approx \frac{Q}{2mc^2} = a$$

Задача 22. (МФТИ, 1974) В настоящее время представляется возможным достижение давлений (например, с помощью специальным образом сфокусированного лазерного излучения), при которых все линейные размеры твёрдых тел можно уменьшить в 10 раз. Во сколько раз у такого «сверхплотного» вещества критическая масса меньше, чем у обычного?

В критическом состоянии, когда начинается цепная реакция, число вторичных нейтронов, рождающихся в веществе, равно числу нейтронов, покидающих его через поверхность. (Вторичными называют нейтроны, возникающие при взаимодействии с делящимся веществом уже имеющихся в нём нейтронов.)

$$k = 1$$

Задача 23. (IPhO, 2000)<sup>1</sup> Предполагается, что к моменту окончательного формирования Земли в ней присутствовали изотопы  ${}^{238}\text{U}$  и  ${}^{235}\text{U}$ , но не продукты их распада. Распад  ${}^{238}\text{U}$  и  ${}^{235}\text{U}$  используется для оценки возраста Земли  $\tau$ .

а) Период полураспада изотопа  ${}^{238}\text{U}$  составляет  $4,5 \cdot 10^9$  лет. Периоды полураспада продуктов распада в получающейся радиоактивной цепочке намного меньше, и в первом приближении ими можно пренебречь. Цепочка распада заканчивается на стабильном изотопе свинца  ${}^{206}\text{Pb}$ . Найдите число атомов  ${}^{206}\text{Pb}$ , обозначаемое  ${}^{206}n$ , которое получается в процессе радиоактивного распада за время  $t$ , как функцию числа  ${}^{238}N$  атомов  ${}^{238}\text{U}$ , сохранившихся к настоящему моменту, и периода полураспада  ${}^{238}\text{U}$ . (Если вам удобно, используйте в качестве единицы времени  $10^9$  лет.)

б) Аналогично,  ${}^{235}\text{U}$  распадается с периодом полураспада  $0,710 \cdot 10^9$  лет через цепочку короткоживущих продуктов, заканчивающуюся стабильным изотопом  ${}^{207}\text{Pb}$ . Получите выражение для  ${}^{207}n$  через  ${}^{235}N$  и период полураспада  ${}^{235}\text{U}$ .

в) Урановая руда, загрязнённая рудой свинца, анализируется при помощи масс-спектрометра. Измерения относительных концентраций изотопов  ${}^{204}\text{Pb}$ ,  ${}^{206}\text{Pb}$  и  ${}^{207}\text{Pb}$  дают соотношения  $1,00 : 29,6 : 22,6$  соответственно. Изотоп  ${}^{204}\text{Pb}$  используется для калибровки; он не является продуктом радиоактивного распада. Анализ чистой свинцовой руды даёт соотношения  $1,00 : 17,9 : 15,5$ . Зная, что отношение концентраций  ${}^{238}N : {}^{235}N$  равно  $137 : 1$ , получите уравнение для возраста Земли  $\tau$ .

г) Предполагая, что  $\tau$  много больше периодов полураспада обоих изотопов урана, рассчитайте приближённое значение возраста Земли.

д) На самом деле это приближённое значение не является значительно большим по сравнению с наибольшим периодом полураспада, но оно может быть использовано для более точного расчёта величины  $\tau$ . Произведите такой расчёт и оцените возраст Земли с точностью 2%.

$$\frac{{}^{206}n}{{}^{207}n} = \frac{{}^{238}N_0 \left(1 - \frac{t}{T_{238}}\right) \left(\frac{206}{238}\right)}{{}^{235}N_0 \left(1 - \frac{t}{T_{235}}\right) \left(\frac{207}{235}\right)} = \frac{{}^{238}N_0}{{}^{235}N_0} \cdot \frac{\left(1 - \frac{t}{T_{238}}\right) \left(\frac{206}{238}\right)}{\left(1 - \frac{t}{T_{235}}\right) \left(\frac{207}{235}\right)}$$

<sup>1</sup>Первое задание на IPhO-2000 состояло из пяти независимых задач, и это — одна из них.