Глава 6. Ядерные реакции

6.1. Выход и сечение ядерной реакции

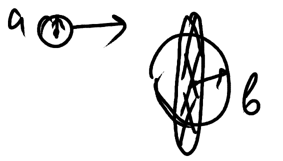
Ядерная реакция — процесс сильного взаимодействия атомного ядра с элементарными частицами либо другими ядрами

$$a + X \to Y + b \qquad\qquad X(a,b)Y$$

Реакция может пойти по нескольким каналам с в общем случае разной вероятностью.

$$a + X \begin{cases} \nearrow Y + b & \text{канал } 1 \\ \to Y' + b' & \text{канал } 2 \\ \searrow Y'' + b'' & \text{канал } 3 \\ \quad \ldots & \end{cases}$$

Тв. шары



$\sigma = \pi (a+b)^2$

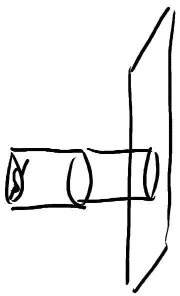
(Эффективное) (поперечное) сечение σ (реакции)

Наглядно: σ – площадь вокруг мишени, т.ч. если ц.м налетающей частицы пройдёт через эту площадь, то реакция произойдёт.

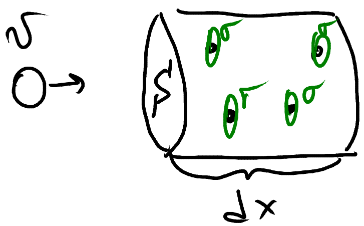
Строго: σ – отношение числа взаимодействий в ед. времени к плотности потока налетающих частиц

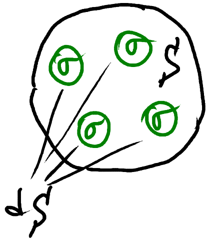
$$\Phi = \frac{dN}{dS\,dt} \qquad \sigma = \frac{dN/dt}{\Phi}$$

$[\sigma] = м^2$; В ЯФ $[\sigma] = 1$ барн $= 10^{-24} см^2 = 10^{-28} м^2$



Найдём вероятность реакции:



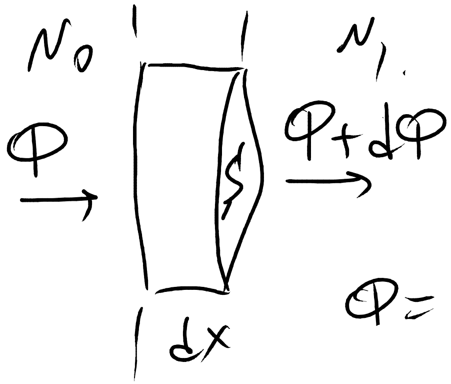


$dP = \frac{dS}{S}$; $dS = \sigma \cdot dN$) → число мишеней в dV

$n = \frac{dN}{dV}$ – концентрация мишеней

$dS = \sigma n\, dV \Rightarrow dP = \frac{\sigma n\, dV}{S}$

$$\boxed{dP = \sigma n\, dx}$$ вероятность реакции



$$\Phi = \frac{dW}{S\,dt}$$

За 1 сек через S проходит.

$$N_0 = \Phi \cdot S \quad ; \quad N_1 = (\Phi + d\Phi)S = N_0 + dN_0$$

$$dN_0 = -dP \cdot N_0$$

$$d\Phi = -\Phi\, dP = -\Phi \sigma n\, dx$$

$$\int \frac{d\Phi}{\Phi} = \int \sigma n\, dx \qquad \ln \Phi = -\sigma n x + \ln \Phi_0$$

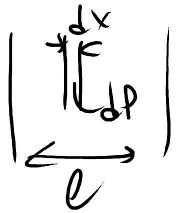
$$\Phi = \Phi_0 e^{-\sigma n x}$$

Выход реакции – отношение числа взаимодействий к числу налетающих частиц

yield

$$Y = \frac{\Delta N}{N};$$

Для тонкого слоя вещества мишени налетающие част. вз-ет максимум с одним ядром мишени.



$$\Delta N = N\cdot \Delta P = N\int dP = N\int_0^l \sigma n\, dx = N\cdot \sigma n\cdot l$$

$$Y = \sigma n l = \sigma n'$$

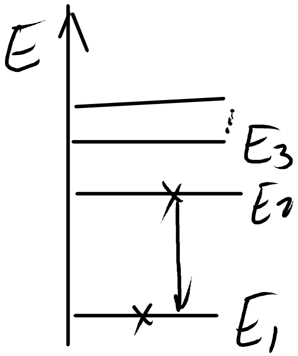
$n' = n\cdot l$ – поверхностная плотность мишеней

$$\frac{\text{число част.}}{м^3}\cdot м = \frac{\text{число}}{м^2}$$

6.2. Типы ядерных реакций

Для не очень быстрых налетающих частиц

(1936г., Н. Бор) **Реакция идет в 2 стадии**



$a \to (X) \Rightarrow (C^*)$

1) Захват частицы a ядром X и образование составного (компаунд) ядра C^* в возбужденном состоянии.

Энергия a перераспред. по всему C^*.

Время жизни C^* $\gg$ время пролета част. a и ядра X

2) Распад составного ядра C^*. Не зависит от способа образования

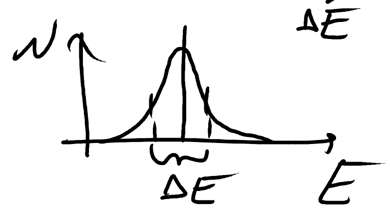
$$a + X \to C^* \to Y + b$$

Сечение: $\sigma(a,b) = \underbrace{\sigma_a}_{\text{сечение образования сост. ядра}} \cdot \underbrace{W_b}_{\text{вероятность распада с испусканием частицы } b}$

$E_{возб} = T_a \quad (m_a \ll m_X)$

У сост. ядра в данном сост. есть время жизни Δt

Принцип неопр-ти: $\Delta E \Delta t \geq \hbar \Rightarrow \Delta E \sim \dfrac{\hbar}{\Delta t}$



Вероятность распада $W \sim \dfrac{1}{\Delta t}$

$\Rightarrow \Delta E = \Gamma = \hbar W$

ширина уровня — соотв. вероятности распада

В общ. случае

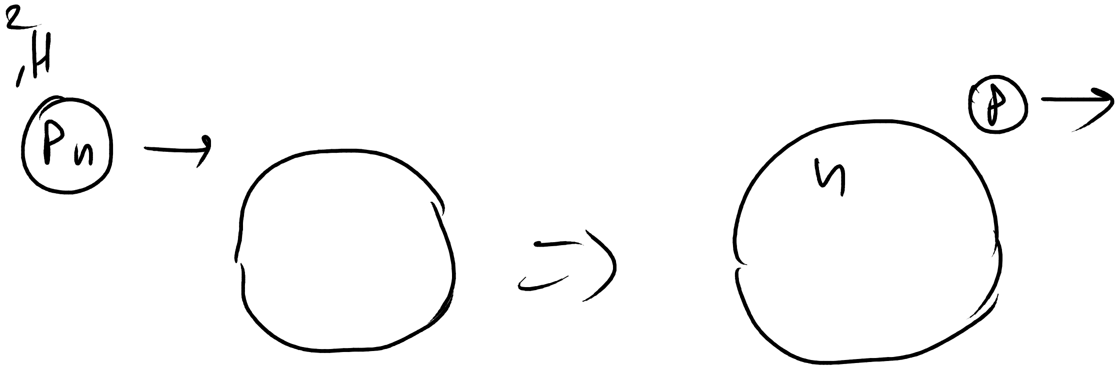
$W = W_\gamma + W_n + W_p + \ldots$

$\Gamma = \Gamma_\gamma + \Gamma_n + \Gamma_p + \ldots \qquad W_b = \dfrac{\Gamma_b}{\Gamma}$

Прямая реакция — быстрые частицы $T >$ десятки МэВ

C^* не образуется

Пример — реакция срыва



6.3. Энергия реакции

ЗСЭ: $E_0 + T = E_0' + T' \Rightarrow E_0 - E_0' = T' - T$

$X(a,b)Y + Q$

$a + X \rightarrow Y + b + Q$

$$\boxed{Q = E_0 - E_0' = T' - T}$$

энергия реакции

$Q > 0$ экзотермическая

$Q < 0$ эндотермическая

$$Q = \left[(m_X + m_a) - (m_Y + m_b)\right] c^2 =$$

$$= \Delta_X + \Delta_a - (\Delta_Y + \Delta_b)$$

Δ — дефект масс

6.4. Энергетическая схема ядерной реакции

Эксперимент $\quad v_a \neq 0 \quad v_x = 0$

$\overset{a}{m} \quad \overset{X}{M}$

a налетает на покоящееся X $\quad \vec{p}, T, \vec{v}, \ldots$

Л-система (лабораторная СО)

Теория $\quad$ Ц-система (система центра масс) $\quad \vec{\tilde{p}}, \tilde{T}, \vec{\tilde{v}}, \ldots$

В Ц-сист. $\quad \vec{\tilde{p}} = \mu \cdot \vec{v}_{отн}; \quad \tilde{T} = \dfrac{\tilde{p}^2}{2\mu};$

$\vec{v}_{отн} = \vec{v}_a - \vec{v}_x$

$\mu = \dfrac{mM}{m+M}$ – приведенная масса 2-х частиц с массами m и M

Т.к. обычно част. X покоится, то

$$T = T_a = \left/ v_{отн} = v_a \right/ = \frac{m v_{отн}^2}{2} = \left/ v_{отн} = \frac{\tilde{p}}{\mu} \right/ = \frac{m}{2}\left(\frac{\tilde{p}}{\mu}\right)^2 =$$

$$= \frac{m}{2}\frac{\tilde{p}^2}{\mu^2} = \frac{m}{\mu}\frac{\tilde{p}^2}{2\mu} \Rightarrow \boxed{T = \frac{m}{\mu}\tilde{T} = \frac{m+M}{M}\tilde{T}}$$

$$Q = \tilde T' - \tilde T$$

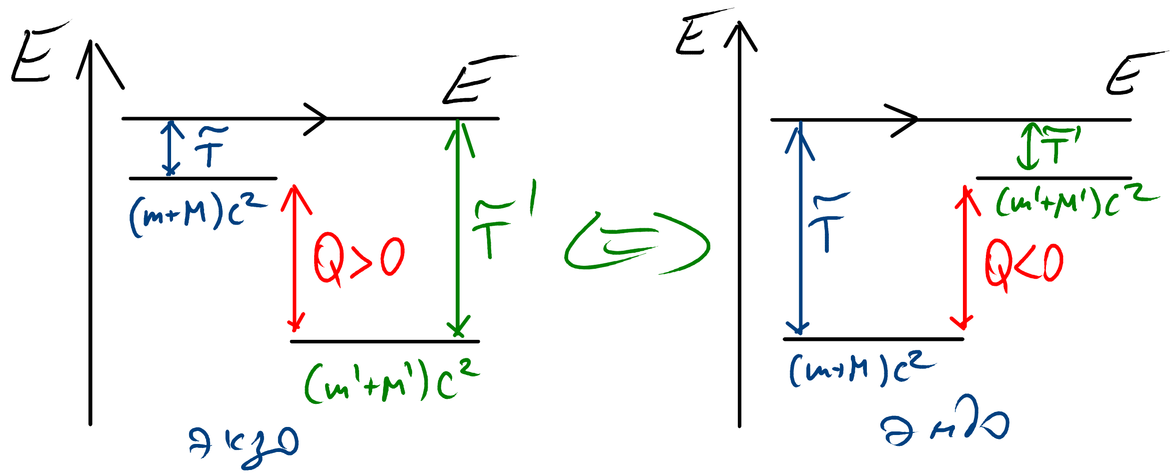
$$\frac{\tilde p'^2}{2\mu'} - \frac{\mu}{m} T = Q$$

$$\boxed{\tilde p' = \sqrt{2\mu'\left(Q + \frac{\mu}{m} T\right)}}$$

импульс в Ц-сист. после взаимодействия

В Л-сист. $T = \tilde T + T_c$ → кин. эн. движ. Ц.М.

При вз-и $2^х$ час. $T_c = const$ $\Rightarrow$ $Q = T' - T = \tilde T' + \cancel{T_c} - (\tilde T + \cancel{T_c}) = \tilde T' - \tilde T$



6.6. Порог реакции

В Ц-сист: $\tilde{T} \ge |Q|$; $\exists\, \tilde{T}_{min} = |Q|$ энергия уходит целиком на созд. b и Y.

$T = T_{min}$: $\quad \overset{a}{\underset{\tilde{v} \neq 0}{\circ}} \to (X) \Rightarrow \underset{\tilde{v} = 0}{(Y)\, \overset{b}{\circ}}$

Перейдем в Л-сист.

$\tilde{T} = \tilde{T}_{min}$: $\quad \underset{p}{(a)} \to (X) \Rightarrow \underset{p}{((Y)\,b)} \to$ Продукты реакции при $T = T_{min}$ движутся как единое целое.

ЗСЭ: $T_{пор} = \tilde{T}_{min} + T_{цм} = |Q| + \dfrac{p^2}{2(m'+M')} \approx$ $\qquad m + M \approx m' + M'$

$$\approx |Q| + \frac{p^2}{2(m+M)}$$

$$T_{пор} = \frac{p^2}{2m}$$

$$p^2 = 2m\,T_{пор}$$

$$T_{пор} = |Q| + \frac{p^2}{2(m+M)}$$

$$\Rightarrow \quad T_{пор} = |Q| + \frac{\cancel{2}m\,T_{пор}}{\cancel{2}(m+M)}$$

$$T_{пор}\left(1 - \frac{m}{m+M}\right) = |Q|$$

$$\boxed{T_{пор} = \frac{m+M}{M}|Q|}$$

порог реакции (нерел)

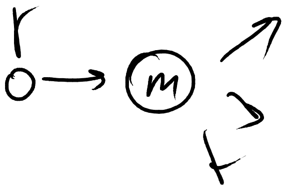
$$E_{пор} = |Q|\left(1 + \frac{|Q|}{2Mc^2}\right)$$

порог реакции под действием γ-кванта

Реакция под действием γ-кванта

$$p^2c^2 = \sqrt{T(T+2mc^2)}$$

пороговая энергия $E_{пор} = pc$



$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^4 = inv$$

Л-сист
Ц-сист } ЦСО

$$(E_{пор} + mc^2)^2 - E_{пор}^2 = (m_1 + m_2 + \dots)^2 c^4$$

$$\cancel{E_{пор}^2} + 2mc^2 E_{пор} + m^2c^4 - \cancel{E_{пор}^2} = \left(\sum_i m_i\right)^2 c^4$$

$$E_{пор} = \frac{\left(\sum_i m_i\right)^2 c^4 - m^2c^4}{2mc^2} = \frac{c^2}{2m}\left(\left(\sum_i m_i\right)^2 - m^2\right) =$$

$$= \frac{c^2}{2m}\underbrace{\left(\sum_i m_i - m\right)}_{|Q|/c^2}\underbrace{\left(\sum_i m_i + m\right)}_{\frac{|Q|}{c^2}+2m} = \frac{\cancel{c^2}}{2m}\,\frac{|Q|}{\cancel{c^2}}\left(\frac{|Q|}{c^2} + 2m\right)$$

$$E_{пор} = |Q|\left(1 + \frac{|Q|}{2mc^2}\right)$$