

Выход реакции при данной энергии падающих частиц, т. е. отношение числа происшедших актов реакции к числу упавших на мишень частиц при условии, что на все ядра мишени падает одинаковый поток бомбардирующих частиц. Выход можно рассчитать, зная эффективное сечение процесса σ : $V = \sigma n$, где n — число атомов мишени в столбике сечением 1 см^2 и высотой, равной толщине мишени l .

Если ρ — плотность вещества мишени, то

$$n = l\rho \frac{6 \cdot 10^{23}}{A}.$$

Для толстой мишени, в которой происходит как изменение энергии, так и уменьшение потока частиц, выражение для выхода ядерных реакций имеет более сложный вид.

Ослабление потока падающих частиц в тонкой мишени происходит по закону

$$I = I_0 e^{-\sigma n}.$$

Классификация ядерных реакций. Ядерные реакции обычно классифицируют в соответствии с природой бомбардирующих частиц, вызывающих реакции: ядерные реакции под действием нейтронов, заряженных частиц (протонов, α -частиц, дейтронов) и под действием γ -квантов.

Последние обусловлены электромагнитным, а не ядерным взаимодействием, но так как они приводят к преобразованию ядер, их также относят к ядерным реакциям. Некоторые ядерные реакции принято различать в соответствии с характером превращения: кулоновское возбуждение ядра, деление ядер, синтез ядер, процессы множественного рождения частиц. Кроме того, разделяют ядерные реакции, идущие на легких ядрах ($A < 50$), средних ($50 < A < 100$) и тяжелых ($A > 100$), а также ядерные реакции при малых ($< 1 \text{ кэв}$), средних (от 1 кэв до 1 Мэв), больших (от 1 до 100 Мэв) и высоких ($> 100 \text{ Мэв}$) энергиях, хотя, конечно, приведенные границы областей весьма условны.

§ 29. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

Пользуясь различными законами сохранения можно предсказать многие особенности ядерных реакций.

Используются следующие точные законы сохранения:

- 1) сохранение электрического заряда;
- 2) сохранение полного числа нуклонов (в реакциях без образования античастиц);
- 3) сохранение полной энергии;
- 4) сохранение импульса;
- 5) сохранение момента количества движения;

Кроме того, используются и другие законы сохранения:

6) при пренебрежении слабыми взаимодействиями — закон сохранения четности волновой функции;

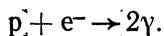
7) при пренебрежении электромагнитными взаимодействиями — закон сохранения изотопического спина.

Рассмотрим подробнее особенности применения этих законов к ядерным реакциям.

1. Как показывает опыт, во всех без исключения ядерных реакциях суммарный электрический заряд частиц, вступающих в реакцию, равен суммарному электрическому заряду продуктов реакции.

2. В ядерных реакциях обычного типа без образования античастиц сохраняется полное число нуклонов.

Закон сохранения числа нуклонов свидетельствует, например, о том, что протон не может аннигилировать с электроном, т. е. запрещает процессы типа



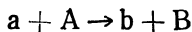
Это определяет невозможность «аннигиляции» атома водорода и стабильность нашего мира.

Проиллюстрируем первые два закона сохранения на примере нескольких ядерных реакций:

Реакция	Электрический заряд	Число нуклонов
$H_1^1 + Li_3^7 \rightarrow Be_4^7 + n_0^1$	$1 + 3 = 4 + 0$	$1 + 7 = 7 + 1$
$n_0^1 + N_7^{14} \rightarrow C_6^{14} + p_1^1$	$0 + 7 = 6 + 1$	$1 + 14 = 14 + 1$
$\gamma + Al_{13}^{27} \rightarrow Mg_{12}^{26} + p_1^1$	$0 + 13 = 12 + 1$	$0 + 27 = 26 + 1$
$H_1^2 + H_1^3 \rightarrow He_2^4 + n_0^1$	$1 + 1 = 2 + 0$	$2 + 3 = 4 + 1$

3. Известно, что в изолированной системе сохраняются полная энергия и полный импульс. Систему из двух соударяющихся ядерных частиц можно считать изолированной (замкнутой), так как остальные ядра вещества удалены на расстоянии порядка 10^{-8} см, а размеры самих ядер малы (10^{-12} см).

Закон сохранения полной энергии для реакции типа



может быть записан в виде

$$m_a c^2 + M_A c^2 + T_a + T_A = m_b c^2 + M_B c^2 + T_b + T_B, \quad (91)$$

где $m_i c^2$ — энергии покоя частицы или ядра, T_i — их кинетические энергии.

Если обозначить сумму кинетических энергий исходного ядра и налетающей частицы через $T_1 = T_a + T_A$, а сумму их энергий покоя через

$$E_1 = m_a c^2 + M_A c^2,$$

соответственно сумму кинетических энергий продуктов реакции, как $T_2 = T_b + T_B$ и их энергий покоя

$$E_2 = m_b c^2 + M_B c^2,$$

то условие (91) запишется в виде

$$E_1 + T_1 = E_2 + T_2.$$

Перестройка ядер в процессе реакции сопровождается изменением их внутренней энергии и, следовательно, массы покоя ядер. Разность энергий покоя называется *энергией реакции* и обозначается Q :

$$Q = (m_a + M_A) c^2 - (m_b + M_B) c^2 = T_2 - T_1. \quad (92)$$

Когда $Q > 0$, в результате реакции выделяется кинетическая энергия за счет уменьшения энергии покоя. Такая реакция называется *экзоэнергетической* и может идти при любой кинетической энергии падающей частицы, достаточной для преодоления потенциального барьера.

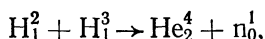
При $Q < 0$ реакция идет с уменьшением кинетической энергии, за счет которой возрастает энергия покоя. Такая реакция называется *эндоэнергетической* и может идти только при больших энергиях падающей частицы, превышающих некоторое пороговое значение $(T_a)_{\text{мин}}$. Значение $(T_a)_{\text{мин}}$ можно получить, решая совместно уравнения для сохранения энергии и импульса

$$(T_a)_{\text{мин}} = |Q| \frac{m_a + M_A}{M_A}.$$

(В случае эндоэнергетических реакций, идущих под действием γ -квантов $(T_\gamma)_{\text{мин}} = |Q|$.)

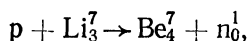
Когда $Q = 0$, происходит упругое рассеяние, при котором сохраняется не только полная, но и кинетическая энергия, а значит и энергия покоя (т. е. масса частиц).

Примером экзоэнергетической реакции может служить реакция



где кинетическая энергия ядра гелия и нейтрона равна $17,6 \text{ Мэв}$. Однако эта реакция из-за необходимости преодолевать кулоновский потенциальный барьер идет с заметной вероятностью только при энергиях дейтона $\geq 0,2 \text{ Мэв}$.

Примером эндоэнергетической реакции может служить реакция



где $Q = -1,65 \text{ Мэв}$.

4. Закон сохранения импульса для реакции, сопровождающей вылетом частицы «b» ($a + A \rightarrow b + B$), имеет вид:

$$\vec{p}_a + \vec{p}_A = \vec{p}_b + \vec{p}_B.$$

Обычно предполагается, что мишень покоится, т. е. $p_A = 0$.

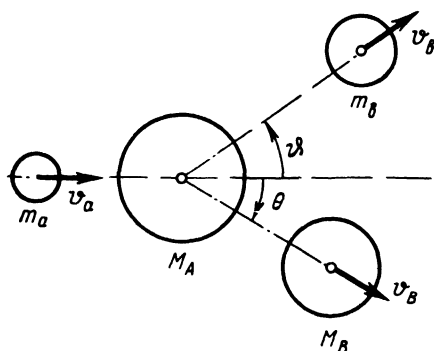


Рис. 72. Схема ядерной реакции

импульса на оси x и y . Если ось x направлена вдоль v_a , то

$$m_a v_a = m_b v_b \cos \varphi + M_B v_B \cos \theta, \quad (95)$$

$$0 = m_b v_b \sin \varphi - M_B v_B \sin \theta. \quad (96)$$

Решая систему трех уравнений (94), (95) и (96), для четырех величин: v_a , v_b , φ , θ — можно найти, например, связь скоростей частиц b и B при данных углах их вылета φ и θ , а также найти связь угла вылета одной из частиц — продуктов с углом вылета второй частицы и скоростями.

5. При ядерной реакции сохраняется суммарный момент количества движений взаимодействующих частиц (под частицами мы здесь понимаем также ядра — мишени и отдачи) и проекция его на выбранное направление, например,

$$\vec{I}_1 = \vec{i}_a + \vec{I}_A + \vec{l}_{aA} = \vec{i}_b + \vec{I}_B + \vec{l}_{bB} = \vec{I}_2,$$

где \vec{i}_a , \vec{I}_A , \vec{i}_b , \vec{I}_B — спины соответствующих частиц и ядер; \vec{l}_{aA} , \vec{l}_{bB} — орбитальные моменты соответствующих пар частиц, характеризующие их относительное движение.

Применение закона сохранения момента количества движения с учетом того, что векторы (i , I , ...) являются квантовомеханическими величинами, приводит к определенным правилам отбора, с которыми мы уже встречались при рассмотрении α - и β -распадов и γ -излучения.

Пользуясь законами сохранения энергии и импульса, можно определить связь между угловым и энергетическим распределением продуктов реакции. Например, для обычного случая, изображенного на рис. 72, закон сохранения энергии имеет вид

$$\frac{m_a v_a^2}{2} + Q = \frac{m_b v_b^2}{2} + \frac{M_B v_B^2}{2}. \quad (94)$$

Закон сохранения импульса может быть записан в виде двух уравнений для проекций

Перечисленные пять законов сохранения справедливы и в ядерных превращениях типа радиоактивных распадов (α - и β -распады), а также в любых взаимодействиях между элементарными частицами (см. гл. 8).

6. Закон сохранения четности выполняется только в сильных и электромагнитных взаимодействиях. Для ядерных реакций того же типа $a+A \rightarrow b+B$ закон сохранения четности записывается в виде (см. § 8)

$$P_a P_A (-1)^{l_{aA}} = P_b P_B (-1)^{l_{bB}},$$

где P_a, P_A, P_b, P_B — внутренние четности взаимодействующих и образующихся частиц и ядер; l_{aA}, l_{bB} — орбитальные моменты пар частиц (a, A) и (b, B).

Применение закона сохранения четности также приводит к некоторым правилам отбора [5].

7. В главе 2 уже говорилось, что ядерные силы инвариантны по отношению к вращению в изотопическом пространстве, т. е. характер взаимодействия не зависит от сорта нуклона. Это свойство называется «изотопической инвариантностью» взаимодействия. Однако оно не относится к электромагнитным взаимодействиям частиц и нарушается, если их учитывать. Ситуация здесь аналогична инвариантности взаимодействия относительно вращения в обычном трехмерном пространстве, приводящей к закону сохранения момента количества движения.

Проекция изотопического спина на ось ζ для ядра определяется выражением

$$\tau_z = \frac{Z - N}{2}.$$

Следовательно, полное значение изотопического спина может быть только больше этой величины:

$$\tau \geq \frac{Z - N}{2}.$$

Опыт изучения ядерных реакций, обусловленных сильными взаимодействиями, показывает, что в них выполняется закон сохранения изотопического спина, который приводит к определенным правилам отбора по изотопическому спину. Так, например, α -частица ($\tau=0$) может быть испущена ядром только в том случае, если его начальное и конечное состояния имеют одинаковые значения изотопического спина.

К закону сохранения изотопического спина мы вернемся еще раз в разделе об элементарных частицах.

§ 30. РАЗЛИЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ РЕАКЦИИ

В настоящее время еще не создана завершенная и вполне строгая теория ядерных реакций. Поэтому течение ядерных реак-