

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

§ 1. Основные понятия и определения

1. Существуют различные толкования термина «ядерные реакции» В самом широком смысле ядерной реакцией называется любой процесс, начинающийся столкновением двух, редко нескольких, микрочастиц (простых или сложных) и идущий, как правило, с участием сильных взаимодействий (см. гл. VII, § 1). С этой точки зрения ядерными реакциями в числе прочих являются и такие процессы, как, например, упругое рассеяние нуклон — нуклон, рождение нового пиона при столкновении пиона с нуклоном и др. Этому довольно всеобъемлющему определению удовлетворяют и ядерные реакции в узком смысле этого слова, под которыми понимаются процессы, начинающиеся столкновением простой или сложной микрочастицы (нуклон, дейтрон, γ -квант, пион, ...) с ядром. Мы будем в основном придерживаться первого, более широкого понимания термина «ядерные реакции», поскольку нас интересуют и ядра, и элементарные частицы.

В этой главе рассматриваются ядерные реакции в узком смысле. Реакции, возникающие при столкновении элементарных частиц, будут рассмотрены в гл. VII.

В экспериментальных установках обычно более тяжелая из сталкивающихся частиц покоится, а более легкая на нее налетает. Покоящаяся частица называется частицей мишени (или, если это ядро, ядром мишени). Налетающие частицы в русском языке специального названия не получили (в английском языке употребляется термин projectile — снаряд). В ускорителях на встречных пучках (см. гл. IX, § 2, п. 13) обе сталкивающиеся частицы движутся, так что разделение на мишень и пучок налетающих частиц терять смысл.

Отметим, что нашему определению реакции удовлетворяет, как частный случай, и упругое рассеяние частиц.

2. Ядерные реакции нужны для различных целей.

Самим физикам изучение ядерных реакций необходимо для получения информации о свойствах новых изотопов, новых частиц, возбужденных состояний ядер и элементарных частиц. Не следует забывать, что в микромире из-за наличия квантовых закономерностей на частицу или ядро нельзя «посмотреть». Поэтому основным

методом изучения ядер и элементарных частиц является изучение их столкновений, т. е. ядерных реакций.

В прикладном отношении ядерные реакции нужны для использования внутриядерной энергии, а также для получения радиоактивных изотопов.

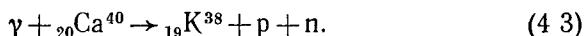
3. Для записи ядерных реакций в литературе используется несколько способов. Наиболее наглядной и универсальной является запись, аналогичная принятой в химии: слева пишется сумма начальных частиц, затем ставится стрелка, указывающая направление течения процесса, после чего справа пишется сумма конечных продуктов реакции. Например, в форме



записывается реакция столкновения протона с ядром лития ${}_3\text{Li}^7$, приводящая к образованию двух α -частиц. Реакция, в которой протон, сталкиваясь с ядром кислорода ${}_8\text{O}^{17}$, образует нейтрон и ядро фтора ${}_9\text{F}^{17}$, записывается в форме



Таким способом, конечно, можно описывать реакции не только с двумя, но и с несколькими частицами в конечном состоянии. Например, реакция отщепления протона и нейтрона γ -квантом от ядра ${}_{20}\text{Ca}^{40}$ записывается в форме



В этой же форме можно записывать и любые реакции взаимопревращений элементарных частиц. Так, в виде



изображается процесс столкновения отрицательно заряженного пиона π^- с протоном, ведущий к образованию нейтрона и нейтрального пиона π^0 .

Для ядерных реакций в узком смысле слова часто используется иная форма записи, в которой сначала пишется ядро-мишень, затем в скобках налетающая частица и отделенные запятой частицы, получающиеся в результате реакции. В конце пишется ядро-продукт. Реакции (4.2), (4.3) в этих обозначениях имеют соответственно вид $\text{O}^{17}(p, n)\text{F}^{17}$, $\text{Ca}^{40}(\gamma, pn)\text{K}^{38}$. Часто пользуются еще более короткой записью, не указывая ядер, участвующих в реакции. Скажем, символ (p, n) означает реакцию выбивания нейтрона протоном из некоторого ядра.

4. Для количественного изучения свойств ядерных реакций необходимы какие-то численные величины, описывающие интенсивность и другие характеристики реакции. Реакция



в которой в начальном и конечном состояниях имеются по две частицы, полностью характеризуется *дифференциальным эффективным сечением* $d\sigma/d\Omega$ рассеяния в область телесного угла $d\Omega = \sin \vartheta d\vartheta d\varphi$, где ϑ , φ — азимутальный и полярный углы вылета одной из частиц (угол ϑ отсчитывается от направления движения налетающей частицы), обычно легкой.

Если частицы бесспиновые или если в начальном состоянии спины налетающей частицы и мишени ориентированы хаотично, то весь процесс обладает цилиндрической симметрией относительно оси, проходящей через мишень в направлении движения падающих частиц. Поэтому дифференциальное сечение будет зависеть только от угла ϑ , и его можно записать в виде

$$\frac{d\sigma}{\sin \vartheta d\vartheta} = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\varphi = 2\pi \frac{d\sigma}{d\Omega}.$$

Форма зависимости дифференциального сечения от угла называется *угловым распределением*. Часто используется понятие *интегрального сечения* *), получающегося из дифференциального интегрированием по углам:

$$\sigma = \int d\Omega \frac{d\sigma}{d\Omega}.$$

Интегральное сечение характеризует интенсивность реакции. Так, если в реакции получается новый изотоп, то его количество пропорционально интегральному сечению соответствующей реакции. Дифференциальное сечение рассеяния, в отличие от интегрального, зависит от выбора системы координат. Подавляющее большинство экспериментальных исследований проводится в лабораторной системе координат (ЛС), в которой мишень покоится. Теоретические исследования удобнее производить в системе центра инерции (СЦИ), в которой покоится центр инерции сталкивающихся частиц. Формулы перехода из одной системы в другую приведены в приложении II. В ядерных реакциях в узком смысле слова обычно масса налетающей частицы во много раз меньше массы ядра, так что при не очень высоких энергиях центр инерции почти совпадает с координатой ядра, т. е. ЛС и СЦИ практически совпадают. Наиболее сильно эти системы различаются в реакциях при сверхвысоких энергиях, когда кинетическая энергия налетающей частицы во много раз превосходит сумму масс покоя обеих сталкивающихся частиц. В этом случае СЦИ движется относительно ЛС со скоростью, близкой к скорости света.

Совокупность значений масс, энергий и импульсов участвующих в реакции частиц часто называют кинематикой процесса. Не все кинематические величины независимы. В реакциях с двумя части-

*) Интегральное сечение часто называют просто сечением соответствующего процесса.

цами известных масс в конечном состоянии задание энергии падающей частицы и углов θ и φ вылета одной из частиц полностью определяет кинематику, так как, например, угол вылета и энергия второй частицы однозначно определяются с помощью законов сохранения энергии и импульса. В реакциях с тремя и больше частицами в конечном состоянии полная кинематика процесса описывается большим числом величин. Соответственно от большего числа величин будет зависеть и дифференциальное сечение.

5. Если в реакции участвуют частицы с ненулевыми спинами, то сечение зависит от ориентации спинов. Поэтому, если налетающие частицы или частицы мишени поляризованы, т. е. имеют спины, ориентированные не хаотично, а хотя бы частично упорядоченно, то сечение уже будет зависеть от ориентации спинов. Количественно ориентация спинов пучка (и вообще любой системы) частиц описывается *вектором поляризации*, который равен среднему значению вектора спина, деленному на максимальное значение проекции этого спина. Абсолютную величину вектора поляризации часто называют просто *поляризацией* и измеряют в процентах. Если вектор поляризации не параллелен импульсу налетающей частицы, то угловое распределение может быть азимутально несимметричным, т. е. зависеть от полярного угла φ .

С другой стороны, при рассеянии неполяризованных частиц на неполяризованной мишени частицы в конечном состоянии могут оказаться поляризованными. Например, при упругом рассеянии протонов с энергией 140 МэВ на ядре углерода ${}_{6}\text{C}^{12}$ протоны, вылетающие под углом $\theta = 25^\circ$, оказываются сильно поляризованными. Именно, поляризация $\approx 80\%$ и направлена перпендикулярно плоскости рассеяния.

Вообще при столкновении неполяризованных частиц спин если и ориентируется, то лишь в направлении, перпендикулярном плоскости рассеяния. Это является следствием закона сохранения четности (см. § 2, п. 5).

Возникновение поляризации частиц при рассеянии часто используется для получения поляризованных пучков частиц. Поскольку полученный поляризованный пучок подвергается рассеянию на другой мишени, то процесс в целом представляет собой двойное рассеяние. Проводились опыты не только по двойному, но и по тройному рассеянию частиц (см., например, гл. V, § 5).

6. В реальных физических экспериментах далеко не всегда удается непосредственно измерять само дифференциальное или интегральное сечение рассеяния. Непосредственно измеряемой величиной является *выход реакции*. Выходом называется число частиц, зарегистрированных установкой в заданных физических условиях. Понятие выхода имеет очень широкий смысл. Действительно, регистрироваться могут частицы, вылетающие как под заданным углом, так и под всеми углами, как с определенной энергией, так

и со всеми энергиями, а также в каком-либо интервале энергий, и т. д. В частном случае, когда энергия падающего пучка строго фиксирована, регистрируются частицы одного сорта, вылетающие под заданным углом, а конечное ядро остается в одном и том же состоянии, выход пропорционален дифференциальному сечению.

Чтобы пояснить отличие выхода от сечения, рассмотрим такой пример. Пучок γ -излучения из бетатрона (гл. IX, § 2) падает на мишень из ядер кальция ${}_{20}\text{Ca}^{40}$. Измеряется выход $F(\vartheta)$ протонов под разными углами. Посмотрим, как связана величина $F(\vartheta)$ с сечением. Здесь мы должны принять во внимание три обстоятельства. Во-первых, вылетающие из бетатрона γ -кванты имеют различные энергии. Распределение этих квантов по энергии задается некоторой функцией $f(E)$, указывающей процент квантов, вылетающих с теми или иными энергиями. Во-вторых, кроме основного процесса



могут идти многие другие: ядро ${}_{19}\text{K}^{39}$ может возникать не только в основном, но и в возбужденных состояниях ${}_{19}\text{K}^{39*}$, ${}_{19}\text{K}^{39**}$; наряду с протоном из того же ядра ${}_{20}\text{Ca}^{40}$ может вылетать еще и нейтрон и вообще несколько частиц. Регистрируя протон, мы не знаем ни энергии кванта, вызвавшего реакцию, ни точного вида самой реакции. Мы регистрируем лишь суммарный эффект. Поэтому выход $F(\vartheta)$ связан сложным образом с сечениями многих процессов:

$$F(\vartheta) \sim \int dE f(E) \sum_i \frac{d\sigma_i(E)}{d\Omega}, \quad (4.5)$$

где через $d\sigma_i(E)/d\Omega$ обозначено сечение реакции i -го типа при энергии E , проинтегрированное по всем (отличным от углов ϑ , φ вылета протона) независимым кинематическим переменным для реакций с вылетом нескольких частиц

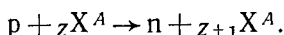
И в-третьих, по ряду чисто технических причин, точное определение множителя пропорциональности в (4.5) часто оказывается настолько трудным, что экспериментаторы либо ограничиваются измерением относительных величин, либо проводят контрольное измерение на мониторе, т. е. на ядре, для которого нужные абсолютные значения сечений уже известны.

7. Для осуществления реакций с ядрами используются разнообразные частицы: протоны, нейтроны, дейтроны, α -частицы, фотоны, электроны, тяжелые ионы (например многократно ионизированные N^{14} , O^{16}), а также пионы, нейтрино, мюоны, каоны, гипероны, антинуклоны. В качестве мишеней могут использоваться любые достаточно долго живущие ядра, а также протоны. Не существует нейтронных мишеней. Поэтому такой фундаментальный процесс, как нейтрон-нейтронное рассеяние, до сих пор почти не изучен экспериментально. Вообще экспериментально затруднено изуче-

ние реакций, в которых ни одна из сталкивающихся частиц не может служить мишенью. Например, непросто получить информацию о рассеянии пионов на каонах.

§ 2. Законы сохранения в ядерных реакциях

1. В физике ядерных реакций очень существенны законы сохранения. Каждый закон сохранения состоит в том, что определенная физическая величина должна быть одинаковой до и после столкновения. Тем самым требование сохранения всегда накладывает какие-то ограничения, или, как их называют, запреты, на характеристики конечных продуктов. Так, из закона сохранения электрического заряда следует, что суммарный заряд продуктов реакции должен равняться суммарному заряду исходных частиц. Поэтому, например, в реакциях (p, n) электрический заряд ядра должен возрастать на единицу:



Аналогично проявляется закон сохранения барионного заряда (гл. VII, § 2, а также гл. II), действие которого для ядерных реакций в узком смысле слова при низких энергиях сводится к тому, что суммарное число нуклонов не меняется при реакции.

2. Перейдем теперь к законам сохранения энергии и импульса в реакциях. Эти законы имеют одинаковую форму в квантовой и неквантовой теориях, но меняются при переходе от нерелятивистской теории к релятивистской. В наиболее общем случае релятивистской теории эти законы имеют соответственно вид

$$E_{1 \text{ рел}} + E_{2 \text{ рел}} = E'_{1 \text{ рел}} + E'_{2 \text{ рел}} + \dots + E'_{n \text{ рел}}, \quad (4.6)$$

$$\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \mathbf{p}'_1 + \mathbf{p}'_2 + \dots + \mathbf{p}'_n, \quad (4.7)$$

где $E_{1 \text{ рел}}$ и $E_{2 \text{ рел}}$ — энергии, а $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ — импульсы сталкивающихся частиц. Штрихами отмечены соответствующие величины для частиц, возникающих в результате реакции.

Соотношения (4.6), (4.7) написаны в произвольной инерциальной системе координат. В ЛС в этих уравнениях надо положить $\mathbf{p}_2 = 0$, а в СЦИ будет $\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = 0$.

В (4.6) закон сохранения энергии выражен через полные энергии частиц $E_{1 \text{ рел}}, E_{2 \text{ рел}}, E'_{1 \text{ рел}}, \dots, E'_{n \text{ рел}}$, где $E_{1 \text{ рел}} = c \sqrt{m_1^2 c^2 + \mathbf{p}_1^2}$ и т. д., а m_1, m_2, m'_1, \dots — массы соответствующих частиц. Если вычтуть из полной энергии энергию покоя mc^2 , то получится кинетическая энергия

$$E = E_{\text{рел}} - mc^2. \quad (4.8)$$

В частности, говоря об энергии частиц пучка, полученного в ускорителе, всегда имеют в виду кинетическую энергию.