

ГЛАВА XV

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ И АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ

§ 109. Основные виды и обозначения ядерных реакций. Конкурирующие процессы в ядерных реакциях

Можно различать пять типов ядерных реакций. Ниже даны их схемы, отмечены характерные черты и указаны параграфы, где приведены сведения о них.

(Обозначения в схемах: A —исходное ядро, B —получающееся ядро, a —частица, захваченная ядром, b —частица, выброшенная из ядра; звездочка означает возбужденное состояние ядра.)

- | | | |
|---|--|--|
| <p>I. Радиоактивный распад:
$A \rightarrow B + b$</p> | <p>Реакция вызывается неустойчивостью ядра и происходит спонтанно по статистическому закону</p> | <p>(§ 87, 88, 89, 92, 93, 115)</p> |
| <p>II Реакции с образованием промежуточного ядра:
$A + a \rightarrow *C \rightarrow B + b$</p> | <p>Происходят при энергии налетающей частицы примерно до 100 Мэв. Вторая стадия реакции (распад за время порядка 10^{-13} сек промежуточного ядра C, образующегося в возбужденном состоянии) не зависит от первой стадии</p> | <p>(§ 90, 92, 94, 109, 110, 115, 116, 117, 120, 121)</p> |
| <p>III. Реакции скальвания:
$A + a \rightarrow B + b_1 + b_2 + \dots$</p> | <p>Происходят без образования промежуточного ядра при очень большой энергии налетающей частицы (сотни, тысячи, сотни тысяч мегаэлектронвольт). Налетающая частица мгновенно разрушает ту часть ядра, в которую проникает. Выброс частиц и образовавшихся мезонов осуществляется преимущественно в направлении движения налетающей частицы</p> | <p>(§ 98, 99, 100)</p> |
| <p>IV. Деление тяжелого ядра на два средних:
$A + a \rightarrow B_1 + B_2 + b_1 + b_2 + \dots$</p> | <p>Проникновение частицы a в тяжелое ядро делает его неустойчивым. Процесс деления завершается радиоактивным распадом осколочных ядер</p> | <p>(§ 95, 107, 116, 117, 118)</p> |
| <p>V. Радиационный захват частицы:
$A + a \rightarrow *B \rightarrow B + \gamma$,
и обратный процесс—
ядерный фотоэффект
(фоторасщепление)</p> | <p>При проникновении частицы a с небольшой энергией в ядро A образуется ядро B в возбужденном состоянии. Реакция завершается излучением γ-фотона. При обратном процессе возбужденное поглощением γ-фотона ядро распадается с выбросом одной или нескольких частиц</p> | <p>(§ 92, 116, 117, 118)</p> |

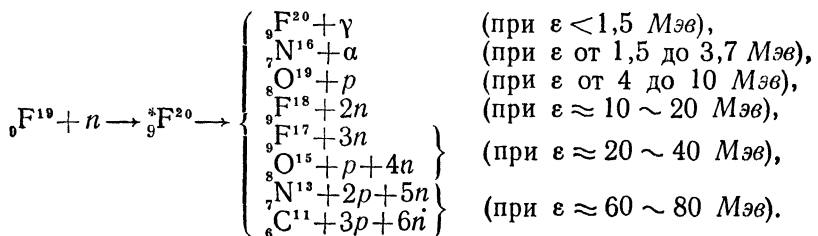
В частных случаях выброшенная из ядра частица b может по своей природе оказаться тождественной с частицей a . Такие реакции называют *упругим* (или *неупругим*) рассеянием. Под упругим рассеянием понимают процесс, в результате которого падающая частица a вылетает (в системе центра масс) с той же энергией, а исходное ядро A остается в прежнем состоянии. В случае, если ядро A переходит в возбужденное состояние, а частица a испускается с энергией, меньшей начальной на величину энергии возбуждения, говорят о неупругом рассеянии ¹⁾.

В других частных случаях налетающей частицей может быть γ -фотон (ф-то-расщепление ядер). Испусканием γ -фотонов завершаются многие ядерные реакции (когда образовавшееся ядро переходит в свое нормальное состояние), и поэтому в схемах I—IV должно подразумеваться испускание γ -фотонов, хотя это непосредственно и не указано. Особое указание об испускании γ -фотона сделано только в схеме V, где этим подчеркивается, что не происходит выброса других частиц и что, следовательно, вся энергия возбуждения уносится γ -фотоном.

В общепринятом обозначении ядерных реакций впереди ставят символ исходного ядра, затем в скобках ставят буквенное обозначение: на первом месте — налетающей частицы, на втором — выброшенной частицы (n — нейтрон, p — протон, d — дейтон, τ — три-тон, α — альфа-частица, γ — фотон), и за скобками в конце — символ образующегося ядра ²⁾. При обозначении вида реакции символы исходного и образующегося ядер опускают. Так, (n, p) означает, что облучение мишени производится нейтронами и из ядер выбрасываются протоны; (n, n) указывает, что происходит упругое рассеяние нейтронов, а (n, n') — неупругое. Деление ядер обозначают символом f ³⁾.

Тождественные частицы, проникающие в одинаковые ядра, могут вызывать в зависимости от их энергии различные превращения составного ядра.

Например, в зависимости от энергии ϵ нейтрона, проникающего в ядро фтора, могут происходить следующие реакции:



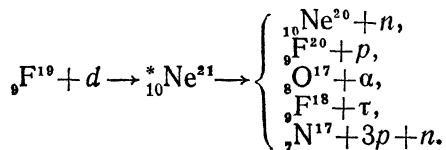
¹⁾ К неупругому рассеянию относят и такие реакции, при которых энергия ядра A не изменяется, но меняется его внутреннее состояние.

²⁾ Например, запись $\text{Mg}^{24}(\alpha, n)\text{Si}^{27}$ означает, что при ядерной реакции по схеме II в ядро Mg^{24} проникает α -частица. Стало быть, возникает составное ядро с зарядом на две единицы больше и с массовым числом, возросшим на четыре единицы, т. е. ядро Si^{28} . Далее, приведенная запись указывает, что из составного ядра происходит выброс одного нейтрона, вследствие чего образуется ядро Si^{27} .

³⁾ Например, запись $\text{Bi}^{209}(d, f)$ обозначает реакцию деления, которая вызвана проникновением в ядро Bi^{209} дейтона, так что деление испытывает составное ядро полония Po^{211} .

Часто при одной и той же энергии налетающей частицы оказывается возможной не одна, а несколько различных ядерных реакций (*конкурирующих процессов*).

Вообще ход ядерной реакции определяется величиной энергии и родом налетающей частицы и вместе с тем разной вероятностью конкурирующих процессов. Так, при проникновении дейтронов в те же ядра фтора ${}^9\text{F}^{19}$, для которых выше были перечислены реакции с нейтронами, возможны следующие процессы:

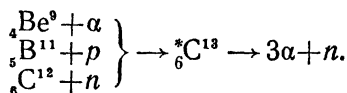


Здесь три первые реакции являются конкурирующими процессами, которые вызываются медленными дейтронами, причем наиболее вероятен выброс нейтрона с образованием ядра неона. При энергии дейтронов порядка 6 Мэв добавляется четвертый конкурирующий процесс с выбросом ядра сверхтяжелого изотопа водорода — тритона. Вероятность этого процесса возрастает с увеличением энергии дейтронов и при $10\text{—}15 \text{ Мэв}$ мало отличается от вероятности выброса протонов.

Энергия налетающей частицы	Налетающая частица	Ядерные реакции	
		для ядер среднего веса ($25 \leq A \leq 80$)	для тяжелых ядер ($80 \leq A \leq 240$)
0—1 кэв	n	$(n, n), (n, \gamma)$	$(n, \gamma), (n, n)$
1—500 кэв	n	$(n, n), (n, \gamma)$	$(n, n), (n, \gamma)$
	p	$(p, n), (p, \gamma), (p, \alpha)$	
	d	$(d, p), (d, n)$	
	α	$(\alpha, n), (\alpha, \gamma), (\alpha, p)$	
0,5—10 Мэв	n	$(n, n), (n, n'), (n, p), (n, \alpha)$	$(n, n), (n, n'), (n, p), (n, \gamma)$
	p	$(p, n), (p, p'), (p, \alpha)$	$(p, n), (p, p'), (p, \gamma)$
	d	$(d, p), (d, n), (d, pn), (d, 2n)$	$(d, p), (d, n), (d, pn), (d, 2n)$
	α	$(\alpha, n), (\alpha, p), (\alpha, \alpha')$	$(\alpha, n), (\alpha, p), (\alpha, \gamma)$
10—50 Мэв	n	$(n, 2n), (n, n'), (n, n), (n, p), (n, np), (n, 2p), (n, \alpha)$	Те же, что и для ядер среднего веса
	p	$(p, 2n), (p, n), (p, p'), (p, np), (p, 2p), (p, \alpha)$	
	d	$(d, p), (d, 2n), (d, pn), (d, 3n), (d, d'), (d, \tau)$	
	α	$(\alpha, 2n), (\alpha, n), (\alpha, p), (\alpha, np), (\alpha, 2p), (\alpha, \alpha')$	

При больших энергиях дейтронов, порядка 40 *Мэв* и больше, преобладающее значение приобретают процессы глубоких превращений промежуточного ядра и в качестве продукта реакции наблюдается значительный выход ядер азота.

Заметим, что часто одно и то же промежуточное ядро образуется из разных исходных ядер. Например:



В помещенной выше таблице указаны ядерные реакции, отличающиеся (при энергии налетающей частицы 0—50 *Мэв*) наиболее значительным выходом продуктов реакции. В каждой строке указаны конкурирующие процессы в порядке, который приблизительно соответствует их уменьшающейся вероятности. (В таблице не приведены реакции деления, так как они наблюдаются только у небольшого числа наиболее тяжелых ядер.)

§ 110. Энергетический эффект, энергия возбуждения и порог ядерных реакций

Уравнения ядерных реакций составляют по тому же принципу, как и уравнения обычных химических реакций. Но в отличие от термохимических уравнений (т. I, § 80, 1959 г.; в пред. изд. § 132), которые принято писать для молей реагирующих веществ, т. е. для авогадрова числа молекул, уравнения ядерных реакций записывают для отдельных ядер (символы молекул в термохимических уравнениях означают величины внутренней энергии молей веществ; символы ядер в уравнениях ядерных реакций означают внутренние энергии отдельных ядер).

Под *энергетическим эффектом* Q ядерной реакции понимают убыль внутренней энергии ядер и частиц, причем исходные и образовавшиеся ядра и частицы сопоставляют в их основных состояниях:

энергетический эффект реакции (Q)	=	энергия исходных ядер и частиц в покое и в их основных состояниях	—	энергия образовавшихся ядер и выброшенных частиц в покое и в их основных состояниях.
---------------------------------------	---	---	---	--

Пользуясь законом пропорциональности массы и энергии (§ 86) $E = m_{\text{ат.ед.м.}} \cdot 931,15 \text{ Мэв}$, внутреннюю энергию ядер и частиц выражают через их массу покоя. Так, для реакции

