

### § 89. Составное ядро

**1.** Многие ядерные реакции при невысоких энергиях проходят через стадию образования так называемого *составного, или промежуточного, ядра*. Представление о составном ядре было введено в физику в 1936 г. Нильсом Бором. Он руководствовался следующими соображениями. Частица, проникшая внутрь ядра, как правило, сильно взаимодействует с его нуклонами — настолько сильно, что ее энергия взаимодействия с отдельным нуклоном обычно того же порядка, что и кинетическая энергия самой частицы. Поэтому весьма вероятен захват частицы ядром. Частица застревает в ядре, причем из-за взаимодействия с нуклонами ядра ее энергия уменьшается настолько, что она длительное время не может покинуть ядро. Более того, частица, попавшая в ядро, вообще теряет свою индивидуальность и действует как система новых нуклонов, присоединившихся к прежним нуклонам ядра. Из-за множества столкновений между нуклонами в поведении новых и прежних нуклонов принципиально пропадает всякое различие. С другой стороны, если первоначальная энергия влетевшей частицы не слишком велика, в системе не окажется нуклонов столь большой энергии, чтобы один или несколько из них немедленно покинули ядро. Задерживаясь в ядре на некоторое время, нуклоны образуют систему частиц, которую в течение этого времени можно рассматривать как связанную. Эта система и есть составное, или промежуточное, ядро.

Составное ядро возникает в возбужденном состоянии и стремится потерять энергию возбуждения за счет какого-либо возможного для него процесса. В принципе оно не отличается от радиоактивного ядра. Один из возможных механизмов радиоактивного превращения состоит в том, что энергия захваченной частицы, беспорядочно распределившаяся между нуклонами составного ядра, в результате флуктуационных процессов вновь сконцентрируется на одной из частиц. Тогда такая частица и вылетит из ядра. Не обязательно, чтобы это была та же частица, которая влетела в ядро. Она может быть и другой: протон, нейтрон,  $\alpha$ -частица и пр. Возможны несколько каналов радиоактивного распада составного ядра.

**2.** Необходимо особо подчеркнуть, что говорить о возбужденном составном ядре имеет смысл только тогда, когда оно существует достаточно долго. «Достаточно долго», конечно, надо понимать не в макроскопическом, а в ядерном масштабе. Например, чтобы нейтрон со скоростью  $10^9$  см/с пролетел через ядро, не испытав столкновений, для него требуется время порядка  $10^{-13} : 10^9 \approx 10^{-22}$  с. Это и есть «ядерное время», которым надо пользоваться для суждения о длительности процессов, происходящих в атомном ядре. Если составное ядро живет в возбужденном состоянии  $10^{-14}$  с, то в ядерном масштабе это время должно

считаться «очень большим». Из-за короткодействующего характера ядерных сил за это время влетевший нейtron успеет претерпеть в ядре более  $10^{-14} : 10^{-22} \approx 10^8$  столкновений, чего с избытком достаточно, чтобы его движение в ядре приобрело запутанный характер, совершенно не зависящий от того, с какой скоростью и в каком направлении нейtron влетел в исходное ядро. Таким образом, возникает система нуклонов, поведение которой совершенно не зависит от истории ее образования. В ядерном масштабе времени такая система ведет себя так, как если бы она существовала бесконечно долго. А это и есть необходимое условие того, чтобы такую систему можно было рассматривать как составное ядро.

Наряду с описанным процессом образования и распада составного ядра возможен и конкурирующий процесс. Это процесс *радиационного захвата*. В этом процессе ядро переходит в возбужденное состояние также в результате захвата какой-то частицы. Но в основное состояние оно возвращается путем испускания  $\gamma$ -кванта. Последний процесс происходит под действием уже электромагнитных сил, т. е. в ядерном масштабе по-прежнему достаточно «медленно». Поэтому и при радиационном захвате может также образоваться составное ядро.

Заслуживает внимания тот парадоксальный с точки зрения классической физики факт, что силы кулоновского отталкивания между протонами и другими положительно заряженными частицами ядра (например, между  $\alpha$ -частицами) не способствуют, а препятствуют выходу этих частиц из ядра. Об этом факте уже говорилось (§ 73, пункт 12) в связи с влиянием центробежного барьера на  $\alpha$ -распад. Объяснение его состоит в том, что силам отталкивания соответствует положительная энергия. Она увеличивает высоту, а с ней и ширину кулоновского потенциального барьера. Выход же протона и всякой положительно заряженной частицы из ядра есть *подбарьерный процесс*. Он тем менее вероятен, чем выше и шире потенциальный барьер. Особенно существенно это обстоятельство проявляется в случае средних и тяжелых ядер.

3. Таким образом, процесс столкновения частицы  $a$  с ядром  $A$  разбивается на два этапа. На первом этапе частица  $a$  сближается с ядром  $A$ . Завершением этапа является образование составного ядра  $C^*$  в возбужденном состоянии. Схематически этот процесс можно изобразить так:



На втором этапе происходит распад составного ядра по схеме



Ядерная реакция в целом изображается схемой



Эффективное сечение  $\sigma_{ab}$  реакции (89.3) найдется, если эффективное сечение  $\sigma_{C^*}$  образования составного ядра умножить на вероятность  $W_b$  распада этого ядра по каналу  $b$ :

$$\sigma_{ab} = \sigma_{C^*} W_b. \quad (89.4)$$

Если то же составное ядро распадается по другому каналу  $b'$  с вероятностью  $W_{b'}$ , то  $\sigma_{ab'} = \sigma_{C^*} W_{b'}$ . Исключение  $\sigma_{C^*}$  дает

$$\sigma_{ab}/\sigma_{ab'} = W_b/W_{b'}. \quad (89.5)$$

Пусть теперь такое же составное ядро  $C^*$  с той же энергией возбуждения образуется в результате столкновения других частиц  $m$  и  $M$ :  $m + M \rightarrow C^*$ . Ввиду тождественности этого ядра с прежним оно будет распадаться по тем же каналам с образованием тех же частиц  $b$  и  $b'$  и с прежними вероятностями  $W_b$  и  $W_{b'}$ , а потому  $\sigma_{mb}/\sigma_{mb'} = W_b/W_{b'}$ . Таким образом,

$$\sigma_{ab}/\sigma_{ab'} = \sigma_{mb}/\sigma_{mb'}. \quad (89.6)$$

Выполнение такого соотношения является подтверждением того, что обе реакции, рассмотренные выше, идут с образованием составного ядра. Если же соотношение (89.6) не выполняется, то схема с образованием составного ядра либо не выполняется, либо составное ядро еще не совсем сформировалось.

4. Другой характерной особенностью ядерных реакций, идущих через составное ядро, при выполнении определенных условий является *симметрия в системе центра масс* углового распределения разлетающихся частиц, которые образуются при распаде составного ядра. Предположим, что результирующий спин составного ядра равен нулю. Тогда частицы, образующиеся при распаде составного ядра, в системе центра масс будут с одинаковой вероятностью разлетаться вперед и назад. (Направление «вперед» задается скоростью налетающей частицы.) Про такое угловое распределение говорят, что оно обладает *симметрией «вперед-назад»*. Для обоснования высказанного утверждения заметим, что первоначальная система из-за наличия импульсов и угловых моментов у налетающей частицы и исходного ядра симметрией «вперед-назад» не обладает. Но такая симметрия появится в процессе формирования составного ядра. В самом деле, в системе центра масс результирующий импульс исходной системы равен нулю. При формировании составного ядра не только сохранится равенство нулю полного импульса, но и произойдет хаотическое распределение импульсов отдельных нуклонов по направлениям в пространстве. То же самое относится и к их спинам, так как по предположению спин составного ядра равен нулю. Остается только орбитальный момент импульса частиц. Но в системе центра масс он перпендикулярен к импульсу налетающей частицы. При формировании составного ядра он, ко-

нечно, сохранится, но хаотически перераспределится между нуклонами составного ядра. Получится составное ядро, обладающее симметрией «вперед-назад». Естественно, что такая симметрия сохранится и при распаде составного ядра.

## § 90. Ядерные реакции, идущие через составное ядро

1. Энергетический спектр составного ядра — непрерывный. Действительно, пусть составное ядро образуется от слияния частицы  $a$  и другого ядра  $A$ . В начальном состоянии частица  $a$  и исходное ядро  $A$  бесконечно далеко удалены друг от друга. Движение такой системы двух частиц *инфинитно*, а потому ее полная энергия положительна и не должна квантоваться. Следовательно, она не будет квантоваться и после того, как частица проникнет в ядро, так как энергия сохраняется. Таким образом, энергия возбуждения составного ядра, вообще говоря, превышает энергию, которую необходимо затратить для удаления из ядра хотя бы одной частицы типа  $a$ .

Но если вероятность распада составного ядра достаточно мала, то имеет смысл говорить о почти стационарных, или *квазистационарных состояниях* его, в которых оно длительное время совершает движение в ограниченной области пространства. Такое движение в течение ограниченного времени приближенно можно рассматривать как финитное. Время  $\tau$ , в течение которого это движение допустимо, называется *временем жизни составного ядра*. Вероятность распада  $W$  ядра в единицу времени связана с  $\tau$  соотношением  $W = 1/\tau$ . Для таких составных ядер приближенно можно говорить о *квазистационарных состояниях* и соответствующих им *квазистационарных уровнях энергии*. Но каждый квазистационарный уровень характеризуется не только энергией, но и определенной шириной  $\Gamma$ , которая может быть определена с помощью соотношения неопределенностей

$$\Gamma = \hbar/\tau. \quad (90.1)$$

Таким образом, энергетический спектр составного ядра состоит из ряда дискретных полос конечной ширины. Строго говоря, такова же структура энергетического спектра и всякого радиоактивного ядра. Только радиоактивное ядро живет настолько долго, что вероятность его распада ничтожна, так что квазистационарные уровни энергии обычно нет надобности отличать от стационарных.

2. Применим изложенные соображения к вопросу об эффективном сечении ядерных реакций, предполагая для простоты, что налетающая частица электрически нейтральна. Главнейшими из таких частиц являются нейтроны. Для них, в отличие от положительно заряженных частиц, не существует кулоновского потенциального барьера, а потому они легко могут проникать в