

удается учитывать специфически ядерное и кулоновское взаимодействия раздельно, представляя амплитуду f_{ab} из (4.26) в виде произведения

$$f_{ab} = P_a^{1/2} f_{ab}^{\text{ядерн}} P_b^{1/2}$$

чисто ядерной амплитуды $f_{ab}^{\text{ядерн}}$ на величины $P_a^{1/2}$, $P_b^{1/2}$, характеризующие вероятности проникновения частиц a и b сквозь кулоновское поле ядра или, как говорят, сквозь кулоновский барьер. Величины P_a и P_b называют *проницаемостями*. Проницаемость стремится к единице при высоких энергиях и к нулю при низких.

Отметим, что введенная проницаемость совпадает с рассчитываемой в гл. VI, § 3 вероятностью проникновения α -частицы через потенциальный барьер в процессе радиоактивного α -распада ядра. Влияние кулоновского отталкивания или, что то же самое, кулоновского барьера приводит к тому, что сечение экзотермической реакции при низких энергиях вместо того, чтобы расти по закону $\sim 1/v$, быстро стремится к нулю (рис. 4.6, а). Аналогично ведет себя и сечение эндотермической реакции с участием заряженной частицы (рис. 4.6, б). Необходимость преодоления кулоновского барьера является основной причиной трудности осуществления термоядерных реакций (см. гл. XI, § 4).

Полное сечение *упругого* рассеяния при наличии заряда формально бесконечно, поскольку кулоновские силы имеют бесконечный радиус действия. На практике, конечно, величина сечения ограничена экранирующим действием электронных оболочек, а также тем, что при очень больших прицельных расстояниях угол рассеяния становится пренебрежимо малым.

Проведенное в этом параграфе рассмотрение неприменимо и к нейтральным частицам нулевой массы — фотонам. Вызываемые фотонами фотоядерные реакции будут рассмотрены в § 11.

§ 5. Механизмы ядерных реакций

1. В этом параграфе мы будем говорить о ядерных реакциях только в узком смысле. Ядерная реакция представляет собой сложный процесс перестройки атомного ядра. Как и при описании структуры ядра, здесь практически невозможно получить точное решение задачи. И подобно тому, как структуру ядра аппроксими-

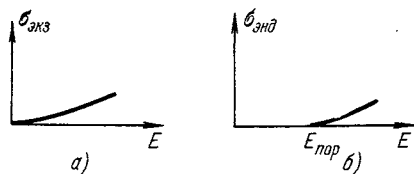


Рис. 4.6. Зависимость сечений экзотермической (а) и эндотермической (б) реакций от энергии налетающей заряженной частицы в области малых энергий.

руют различными ядерными моделями, течение ядерных реакций аппроксимируют различными механизмами реакций.

Существует много различных механизмов реакций. Мы рассмотрим лишь основные из них. В этом параграфе будет дана классификация механизмов, а в последующих параграфах будет детально рассмотрен каждый механизм.

2. Важную роль в ядерных реакциях играет введенный Нильсом Бором (1936) *механизм составного ядра*, согласно которому реакция протекает в две стадии с образованием промежуточного ядра C :



Понятие составного ядра применимо только в тех случаях, когда время жизни *) составного ядра достаточно велико, т. е. значительно больше характерного ядерного времени $\tau_{\text{ядерн}}$ (гл. I, § 1, п. 3).

Таким образом, ядерная реакция идет через составное ядро, если время ее протекания значительно превышает $\tau_{\text{ядерн}} \approx 10^{-21}$ с.

3. Реакции, идущие через составное ядро, подразделяются на *резонансные* и *нерезонансные*. Поясним смысл этих терминов. Как мы знаем, энергия возбуждения ядра может принимать только дискретный ряд значений, соответствующих уровням ядра. Однако при более точном рассмотрении оказывается, что представление об уровнях с точно фиксированной энергией справедливо только в отношении основных состояний стабильных ядер. Все остальные уровни ядер не обладают определенной энергией — они в той или иной степени «размазаны» по энергии. Оценку ширины Γ размытия уровня можно получить из соотношения неопределенностей время-энергия. Согласно этой оценке (см. (2.54)) $\Delta E = \Gamma/2 = \hbar/2\tau$. Ширина уровня тем больше, чем короче его время жизни. В начале книги (гл. II, § 1, п. 3) мы говорили, что ядро может возбуждаться только на энергию, соответствующую одному из его уровней. Поэтому и составное ядро может образоваться лишь в том случае, если энергия налетающей частицы попадает в интервал Γ неопределенности положения уровня.

Если ширины уровней составного ядра меньше расстояний между ними, то при фиксированной энергии падающих частиц реакция может идти лишь через одиночный уровень. Зависимость сечения реакции от энергии будет носить резонансный характер. Соответственно этому и реакции такого типа называются *резонансными*.

Если же уровни расположены настолько густо, что расстояния между ними меньше их ширины, то уровни сливаются друг с другом.

*) Среднее время жизни τ составного ядра определяется таким образом, что за это время число возбужденных ядер уменьшается в $e \approx 2,72$ раза. Подробнее см. в гл. VI, § 1.

В этом случае реакция будет идти при любой энергии. Такие реакции называются *нерезонансными*. Для описания нерезонансных реакций применяется статистическая теория.

4. Если время взаимодействия налетающей частицы с ядром не превышает характерного ядерного времени, то механизм реакции существенно меняется. Важнейшую роль здесь играют *прямые процессы*, в которых налетающая частица эффективно сталкивается с одним-двумя нуклонами ядра, не затрагивая остальных. Например, реакция (p, n) может произойти в результате столкновения протона с одним нейтроном ядра.

В особую категорию прямых процессов следует отнести реакции срыва (d, p) , (d, n) и обратные им реакции подхвата (p, d) , (n, d) . К прямым процессам относятся такие реакции фрагментации или, что то же самое, скальвания, при которых нуклон высокой энергии, сталкиваясь с ядром, откалывает от него фрагмент, состоящий из нескольких нуклонов.

Промежуточное положение между реакциями через составное ядро и прямыми процессами занимает механизм *предравновесных ядерных реакций*.

5. Кроме перечисленных выше, существует ряд других возможных механизмов ядерных реакций.

Для описания упругого рассеяния, осредненного по резонансам, используется оптическая модель, в которой ядро трактуется как сплошная среда, способная преломлять и поглощать дебройлевские волны падающих на него частиц.

Если налетающая частица заряжена и имеет относительно большую массу (протоны, α -частицы и особенно многократно ионизированные тяжелые ионы таких элементов, как углерод, азот и др.), то становится возможным кулоновское возбуждение, при котором налетающая частица не очень близко подходит к ядру и воздействует на него только своим кулоновским полем. Кулоновское возбуждение используется, например, для изучения низко лежащих вращательных уровней тяжелых ядер.

Многими специфическими свойствами обладают фотоядерные реакции, возникающие при столкновении с ядрами достаточно жестких γ -квантов.

Несколько особняком в физике ядра стоит механизм деления тяжелых ядер, связанный с глубокой перестройкой ядра. Деление ядер будет рассмотрено в гл. X.

Наконец, любая частица с энергией в несколько сотен МэВ и выше может вызвать взрыв ядра, разбив его на большое количество мелких осколков. Такие процессы называются процессами образования звезд, так как их фотографии в эмульсиях и следовых камерах имеют форму звезд.

Роль разных механизмов реакций не одинакова для различных частиц и энергий. Кроме того, как правило, различные механизмы

действуют параллельно, т. е., как говорят, конкурируют друг с другом. Поэтому выяснение механизма реакции часто оказывается сложной задачей.

§ 6. Составное ядро. Общие свойства

1. При рассмотрении реакций, идущих через составное ядро, прежде всего возникает вопрос, за счет каких физических причин составное ядро является долгоживущим (разумеется, в масштабах ядерных, а не макроскопических промежутков времени). Эти причины таковы.

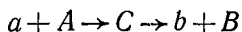
Во-первых, из-за короткодействия ядерных сил движение нуклонов в ядре может быть сильно запутанным. Вследствие этого энергия влетевшей в ядро частицы быстро распределяется между всеми частицами ядра. В результате часто оказывается, что ни одна частица уже не обладает энергией, достаточной для вылета из ядра. В этом случае ядро живет до флуктуации, при которой одна из частиц приобретает достаточную для вылета энергию.

Во-вторых, эффект кулоновского отталкивания между протонами из-за малой проницаемости кулоновского барьера на несколько порядков уменьшает вероятность вылета протонов из средних и тяжелых ядер. Еще раз отметим тот парадоксальный факт, что силы отталкивания могут увеличивать время пребывания протонов внутри ядра.

В-третьих, вылет частиц из составного ядра может затрудняться различными правилами отбора. Примером может служить рассматриваемая ниже в § 7, п. 3 реакция лития с протонами.

В-четвертых, реакции с испусканием γ -квантов, например (n, γ) , для средних и тяжелых ядер часто затрудняются тем, что ядру приходится очень сильно перестраивать свою структуру при испускании γ -кванта. На эту перестройку уходит время порядка 10^{-13} — 10^{-14} с, а то и больше, что значительно превышает характерное ядерное время 10^{-21} с.

2. Перейдем теперь к рассмотрению характерных особенностей реакций, идущих через составное ядро. Важнейшей особенностью является независимость процесса распада от способа образования составного ядра. Составное ядро живет настолько долго, что практически полностью «забывает», каким способом оно образовалось. Поэтому сечение σ_{ab} реакции



можно представить в виде произведения двух сомножителей: сечения σ_{aC} образования составного ядра и обозначаемой через Γ_b/Γ вероятности распада составного ядра по каналу b :

$$\sigma_{ab} = \sigma_{aC} \Gamma_b / \Gamma, \quad (4.38)$$