

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.

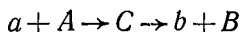
Во-первых, из-за короткодействия ядерных сил движение нуклонов в ядре может быть сильно запутанным. Вследствие этого энергия влетевшей в ядро частицы быстро распределяется между всеми частицами ядра. В результате часто оказывается, что ни одна частица уже не обладает энергией, достаточной для вылета 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  $\gamma$ -квантов, например  $(n, \gamma)$ , для средних и тяжелых ядер часто затрудняются тем, что ядру приходится очень сильно перестраивать свою структуру при испускании  $\gamma$ -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  $\sigma_{ab}$  реакции



можно представить в виде произведения двух сомножителей: сечения  $\sigma_{ac}$  образования составного ядра и обозначаемой через  $\Gamma_b/\Gamma$  вероятности распада составного ядра по каналу  $b$ :

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

где

$$\Gamma = \Gamma_a + \Gamma_b + \Gamma_{b'} + \dots, \quad (4.39)$$

$b, b'$  — различные каналы реакции, а величина  $\Gamma_a/\Gamma$  равна вероятности распада составного ядра по входному каналу. При этом величины  $\Gamma_a, \Gamma_b, \Gamma_{b'}, \dots$ , а следовательно, и  $\Gamma$  не зависят от того, какой канал является входным. Поэтому сечение реакции с тем же составным ядром, но другим входным каналом

$$b' + B' \rightarrow C \rightarrow b + B \quad (4.40)$$

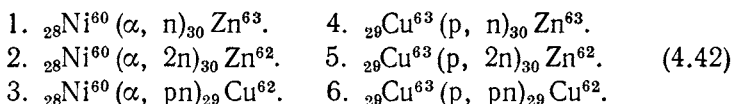
имеет вид

$$\sigma_{b'b} = \sigma_{b'c} \Gamma_b / \Gamma \quad (4.41)$$

с тем же множителем  $\Gamma_b/\Gamma$ . Отсюда, в частности, следует, что

$$\sigma_{ab} : \sigma_{ab'} = \sigma_{b'b} : \sigma_{b'b'}.$$

Соотношения такого типа могут служить для проверки гипотезы о применимости механизма составного ядра. В качестве примера можно привести результаты опытов, в которых ядра  ${}_{29}\text{Cu}^{63}$  и  ${}_{28}\text{Ni}^{60}$  облучались соответственно протонами и  $\alpha$ -частицами. Энергии протонов и  $\alpha$ -частиц подбирались таким образом, чтобы энергия возбуждения составного ядра  ${}_{30}\text{Zn}^{64}$  была в обоих случаях одна и та же. Регистрировались реакции:



Если гипотеза о составном ядре справедлива, то для сечений  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$  этих шести реакций должно выполняться соотношение  $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = \sigma_4 : \sigma_5 : \sigma_6$ . Как видно из рис. 4.7, это соотношение выполняется довольно хорошо.

Величины  $\Gamma_b, \Gamma_{b'}$  имеют размерность энергии и называются *парциальными ширинами*, а их сумма  $\Gamma$  называется *полной шириной*.

3. Второй характерной особенностью механизма составного ядра является то, что угловое распределение продуктов реакций, идущих через составное ядро, в СЦИ симметрично относительно угла  $\phi = 90^\circ$  (так называемая симметрия вперед-назад).

На рис. 4.8 приведено угловое распределение, типичное для реакций, идущих через составное ядро. Напротив, скажем, угловое распределение реакции  $(\gamma, p)$  на  ${}_{29}\text{Cu}^{65}$  при  $E = 25$  МэВ имеет указанную на рис. 4.9 форму с максимумом при  $60^\circ$ , т. е. заметно вытянуто вперед. Из асимметрии углового распределения следует, что эта реакция, по крайней мере частично, идет не через составное ядро. Подчеркнем, что наличие симметрии лишь не противоречит механизму составного ядра, т. е. не исключает других возможных механизмов.

Симметрия вперед-назад доказывается в теории ядерных реакций. Ее можно пояснить следующим образом. Исходная система налетающая частица — ядро симметрией вперед-назад не обладает. Физической величиной, искажающей эту симметрию, является импульс налетающей частицы в СЦИ. Но этот импульс исчезает после

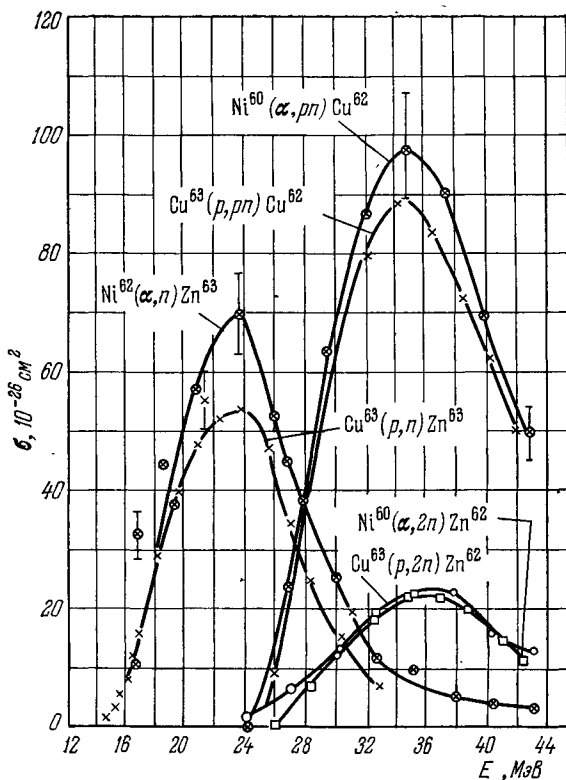


Рис. 4.7. Сечения реакций (p, n), (p, 2n) и (p, pn) на ядре изотопа меди  ${}_{29}\text{Cu}^{63}$  и реакций  $(\alpha, n)$ ,  $(\alpha, 2n)$  и  $(\alpha, pn)$  на ядре изотопа никеля  ${}_{28}\text{Ni}^{60}$ .

$E$  — энергия возбуждения составного ядра. Сплошные линии проведены через экспериментальные точки.

того, как налетающая частица поглотится ядром. Составное ядро уже характеризуется только одной векторной величиной — полным моментом. Посмотрим теперь, из каких величин составляется этот полный момент и какими свойствами симметрии составляющие его величины обладают. Полный момент составного ядра складывается из спинов исходных частиц и орбитального момента относительного движения. Спины исходных частиц ориентированы хаотично, т. е.

симметрично по всем направлениям, а относительный орбитальный момент перпендикулярен импульсу налетающей частицы и хаотично ориентирован в плоскости, перпендикулярной этому импульсу.

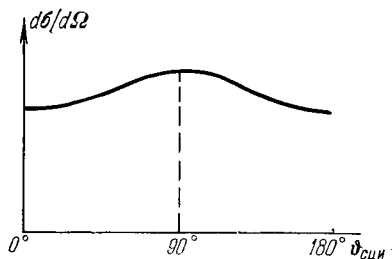


Рис. 4.8 Схематическое изображение угловых распределений продуктов реакции, идущей через составное ядро.

Такие угловые распределения симметричны относительно  $90^\circ$  в СЦИ.

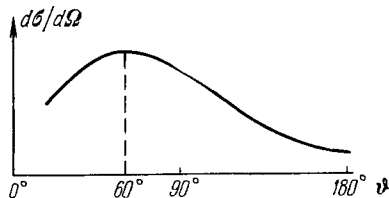


Рис. 4.9. Угловое распределение протонов с энергией, большей 9 МэВ, в реакции  $(\gamma, p)$  на ядре изотопа меди  ${}_{29}\text{Cu}^{65}$ .

Ядро  ${}_{29}\text{Cu}^{65}$  облучалось  $\gamma$ -квантами с непрерывным спектром энергий:

$$E_{\gamma \text{ max}} = 25 \text{ МэВ.}$$

Таким образом, все характеризующие составное ядро векторные величины обладают симметрией вперед-назад. При распаде эта симметрия сохраняется, что и приводит к симметрии углового распределения реакции.

## § 7. Составное ядро. Резонансные реакции

1. До сих пор мы рассматривали свойства, присущие как резонансным, так и нерезонансным реакциям, идущим через составное ядро. Перейдем теперь к особенностям резонансных реакций. Из рассуждений § 5, п. 3 следует, что в области расположения изолированного (т. е. удаленного от своих соседей) уровня  $E_0$  эффективное сечение  $\sigma_{ab}$  реакции должно иметь резонансный максимум. В квантовой механике доказывается, что форма этого резонанса описывается формулой Брейта — Вигнера \*)

$$\sigma_{ab} = \pi \lambda_a^2 \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2/4}. \quad (4.43)$$

Из этой формулы видно, что резонанс тем острее, чем меньше величина  $\Gamma$ , которая тем самым имеет смысл ширины уровня, через

\*) Здесь и в дальнейшем мы для простоты приводим формулу Брейта — Вигнера для бесспиновых частиц, вступающих в реакцию из  $S$ -состояния относительного движения. В общем случае правую часть формулы (4.43) нужно умножить на статистическую величину  $g(J) = \frac{2J+1}{(2j_a+1)(2j_A+1)}$ , где  $J$  — момент уровня составного ядра,  $j_a$  и  $j_A$  — спины сталкивающихся частиц.