

НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ И СЛИЯНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ПРИ ОКОЛОБАРЬЕРНЫХ И ПОДБАРЬЕРНЫХ ЭНЕРГИЯХ

А.В.Тараканов*, В.М.Шилов

Показано, что многоканальная модель с граничными условиями в виде только сходящейся волны во внутренней области ядра правильно описывает экспериментальные данные по сечениям слияния и неупругого рассеяния для легких ядер при околобарьерных и подбарьерных энергиях, где число открытых каналов невелико.

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики ОИЯИ.

Inelastic Scattering and Fusion of Heavy Ions at Near- and Subbarrier Energies

A.V. Tarakanov, V.M. Shilov

It is shown that the multichannel model with the ingoing-wave boundary conditions describes well experimental data on fusion and inelastic cross sections of light nuclei at near- and subbarrier energies, where the number of open channels is small.

The investigation has been performed at the Laboratory of Theoretical Physics, JINR.

1. ВВЕДЕНИЕ

Подбарьерное слияние тяжелых ионов в настоящее время хорошо описывается в рамках многоканальной модели с граничными условиями в виде только сходящейся волны во внутренней области ядра /1-3/. Формализм модели позволяет единым образом описывать многие процессы, происходящие в периферической области сталкивающихся ядер. В последнее время проведены эксперименты при подбарьерных энергиях, в которых наряду с сечением слияния измерены сечения неупругого возбуждения коллективных низколежащих уровней /4,5/, а также сечения малонуклонных передач /6/.

* Саратовский государственный университет

Представляет несомненный интерес единое описание этих процессов в рамках одной модели. В работе^{/4/} были предприняты первые попытки единого описания упругого и неупругого рассеяния и слияния для реакции $^{16}\text{O} + ^{18}\text{O}$. При этом были сделаны упрощающие предположения о постоянной связи под кулоновским барьером, предложенные в^{/2/}. В настоящей работе мы провели точные расчеты сечений всех каналов реакции при столкновении ядер $^{18}\text{O} + ^{44}\text{Ca}$ и $^{16}\text{O} + ^{18}\text{O}$.

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И ДЕТАЛИ РАСЧЕТОВ

На основе результатов^{/3/} мы кратко воспроизведем выражения для сечения неупругого рассеяния и сечения слияния. Радиальные волновые функции относительного движения двух ядер в основном ($\alpha = 0$) и неупругом ($\alpha \neq 0$) каналах описываются системой связанных дифференциальных уравнений

$$\left[\frac{d^2}{dr^2} + \frac{2\mu}{\hbar^2} (E - \epsilon_\alpha - V_\alpha(r)) - \frac{L(L+1)}{r^2} \right] \cdot R_\alpha(r) = \frac{2\mu}{\hbar^2} \sum_\beta V_{\alpha\beta}(r) \cdot R_\beta(r). \quad (1)$$

Здесь ϵ_α — энергия возбуждения в канале α , L — орбитальный угловой момент, $V_\alpha(r)$ — диагональная часть потенциала взаимодействия двух ядер, $V_{\alpha\beta}(r)$ — потенциал связи между основным и возбужденными каналами, μ — приведенная масса системы. На радиальные волновые функции $R_{\alpha L}(r)$ на больших расстояниях мы налагаем обычные граничные условия

$$R_{\alpha L_\alpha}(r) = [G_{L_\alpha}(x) - iF_{L_\alpha}(x)] \delta_{\alpha 0} - S_{\alpha\alpha_0}^{L_\alpha} [G_{L_\alpha}(x) + iF_{L_\alpha}(x)], \quad (2)$$

где $x = k_\alpha r$. На расстоянии $r = R_{kp}$, совпадающем с минимумом центрального потенциала, мы выбираем граничное условие в виде

$$R_{\alpha L_\alpha}(r) = A_{\alpha L_\alpha} h_{L_\alpha}^{(2)}(k_\alpha^1 r), \quad (3)$$

где

$$k_\alpha^1 = \left[\frac{2\mu}{\hbar^2} (E - \epsilon_\alpha - V_\alpha(R_{kp})) \right]^{1/2}.$$

Граничное условие (3) предполагает, что на расстоянии $r = R_{kp}$ мы имеем только сходящуюся волну. Поток частиц, дошедших до расстояния $r \approx R_{kp}$, определяет сечение слияния^{/7/}:

$$\sigma_{сл} = \frac{\pi}{k_0^2} \sum_{\alpha L} \frac{k_\alpha^1}{k_0} (2L+1) |A_{\alpha L_\alpha}|^2, \quad (4)$$

а элементы S-матрицы в неупругом канале определяют сечение неупругого рассеяния обычным образом:

$$\sigma_{\text{неупр.}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_{LL_0} (2L_0 + 1) |S_{\alpha\alpha_0}^L|^2. \quad (5)$$

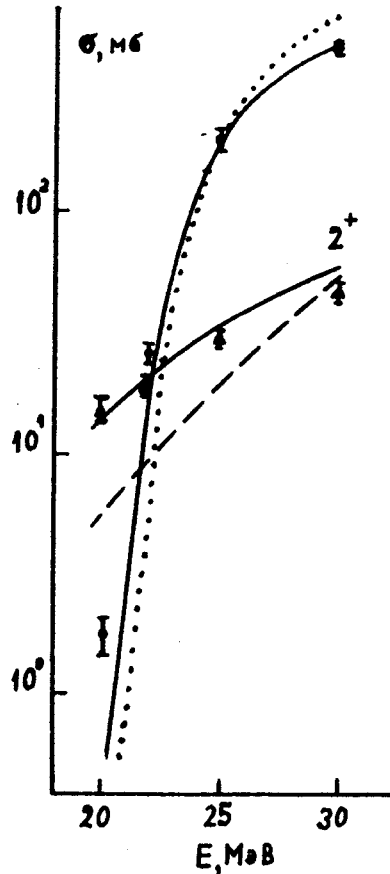
Во всех расчетах для потенциала связи между основным и возбужденными каналами мы будем использовать стандартное выражение макроскопической модели ^{/8/}:

$$V_{\alpha\beta}(r) = \delta_{\alpha} \left[-\frac{dV_{\text{яд}}(r)}{dr} + V_{\text{кул. возб.}}(r) \right], \quad (6)$$

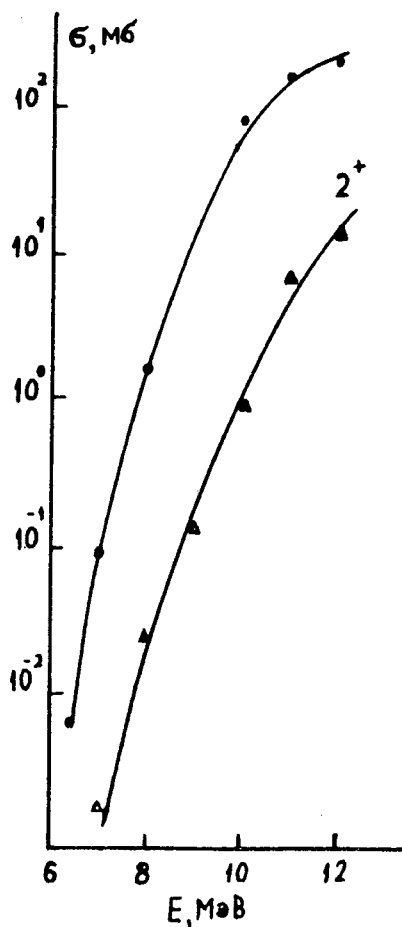
где δ_{α} — деформационная длина. Второе слагаемое в этой формуле описывает кулоновское возбуждение и на больших расстояниях ведет себя как $r^{-\lambda-1}$, где λ — спин возбуждаемого уровня.

Для реакции $^{18}\text{O} + ^{44}\text{Ca}$ в качестве ядерной части потенциала мы используем параметризацию потенциала, полученного в приближении внезапного удара в формализме "плотности энергии" ^{/9/}. В расчеты были включены два возбужденных уровня ядра ^{44}Ca — 2^+ и 4^+ с энергиями возбуждения 1,16 МэВ и 1,8 МэВ и параметрами динамической деформации δ_2 , равными 1,06 и 0,45 фм соответственно, и уровень 2^+ в ядре ^{18}O с энергией 1,98 МэВ и $\delta_2 = 1,01$ фм.

Рис.1. Рассчитанные сечения слияния и неупругого рассеяния с возбуждением уровня 2^+ в ядре ^{44}Ca — сплошные линии. Экспериментальные данные взяты из ^{/5/}. Штриховая линия — предсказания для сечения возбуждения уровня 2^+ в ядре ^{18}O . Точками показано сечение слияния без связи каналов.



На рис.1 сплошными линиями показаны сечения слияния и сечение возбуждения уровня 2^+ в ядре ^{44}Ca в зависимости от налетающей энергии. Экспериментальные данные взяты из работы ^{5/}. Штриховой линией показаны предсказания для сечения возбуждения уровня 2^+ в ядре ^{18}O . Видно, что при низких энергиях налетающих ионов функции возбуждения для двух ядер заметно отличаются друг от друга и имеют разный наклон, хотя параметры динамической деформации для них почти одинаковы. Это отличие связано с более высокой энергией возбуждения для ядра ^{18}O и исчезает при энергиях выше кулоновского барьера, как и следовало ожидать. На этом же рисунке точками показано сечение слияния, рассчитанное без учета связи каналов. Видно, что в этом случае мы имеем превышение экспериментальных данных по сечению слияния при надбарьерных энергиях и занижение при подбарьерных энергиях.



На рис.2 для реакции $^{18}\text{O} + ^{16}\text{O}$ мы показали сечение слияния и сечение возбуждения уровня 2^+ в ядре ^{18}O совместно с экспериментальными данными ^{4/}. В расчеты включен лишь один уровень в ядре ^{18}O с теми же параметрами, что и в предыдущем случае. Ядерная часть потенциала для этой реакции описывалась потенциалом вудс-саксоновского типа с параметрами $V_0 = 50$ МэВ, $r_0 = 1,29$ фм, $a = 0,46$ фм, взятыми из ^{4/}.

Мы видим на обоих рисунках, что модель граничных условий со связью с каналами неупругого возбуждения правильно описывает широкий круг экспериментальных данных. Ранее нами также было показано хорошее описание дифференциальных сечений упругого рассеяния при надбарьерных энергиях ^{3/} для реакции $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$.

Рис.2. Сечение возбуждения уровня 2^+ в ядре ^{18}O и полное сечение слияния для реакции $^{16}\text{O} + ^{18}\text{O}$. Экспериментальные данные взяты из ^{4/}.

В работе показано, что модель граничных условий ³/без привлечения дополнительных подгоночных параметров позволяет единым образом описывать упругое, неупругое рассеяние и полное слияние при околорбарьерных и подбарьерных энергиях. Это указывает на разумность сделанных предположений о механизме протекания реакции и позволяет с большой достоверностью экстраполировать теоретические сечения для легких ядер в область астрофизических энергий, недоступных в настоящее время для экспериментального изучения. Вызывает интерес также использование модели для описания сечений "холодного" слияния тяжелых ядер ¹⁰/, где динамические эффекты в периферической области ядер оказываются очень важными ^{11, 12}/.

Авторы признательны В.Б.Беляеву, В.В.Пупышеву и В.Д.Тонееву за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Г.Н., Пермяков В.П., Шилов В.М. Тезисы докладов XXXI Сессии по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Л.: Наука, 1981, с.495.
2. Dasso C.H., Landowne S., Winter A. — Nucl.Phys., 1983, A405, p.381.
3. Шилов В.М. ОИЯИ, P4-86-849, Дубна, 1986.
4. Thomas J. et al. — Phys.Rev., 1986, C33, p.1679.
5. De Castro Rizzo D.M. et al. — Nucl.Phys., 1984, A427, p.151.
6. Vulgaris E. et al. — Phys.Rev., 1986, C33, p.2017.
7. Афанасьев Г.Н., Шилов В.М. — ЯФ, 1977, 26, с.92.
8. Бор О., Мотгельсон Б. Структура атомного ядра. М.: Мир, т.2, 1977.
9. Ngo C. et al. — Nucl.Phys., 1975, A252, p.237.
10. Oganessian Yu.Ts. et al. — Nucl.Phys., 1975, A239, p.353.
11. Swiatecki W.J. — Nucl.Phys., 1982, A376, p.275.
12. Джолос Р.В., Пермяков В.П. В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, № 1 (21) -87, Дубна, 1987, с.46.

Рукопись поступила 13 июля 1987 года.