

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P7-87-482

А.В.Тараканов,* В.М.Шилов

ТУННЕЛИРОВАНИЕ
ПРИ РАСПАДЕ И СЛИЯНИИ СЛОЖНЫХ ЯДЕР

Направлено в журнал "Ядерная физика"

* Саратовский государственный университет

1987

I. Введение

Туннелирование заряженных частиц под кулоновским барьером является важной составной частью теорий подбарьерного слияния тяжелых ионов, деления ядер и α - распада. До недавнего времени для расчетов проникаемости использовали WKB - приближение^{/1/} или его упрощенные варианты. Неадекватность WKB - проникаемости для описания очень малых сечений подбарьерного слияния в настоящее время ясно продемонстрирована во многих экспериментальных и теоретических работах^{/2-5/}. Учет возбуждения коллективных уровней в сталкивающихся ядрах увеличивает проникаемость кулоновского барьера для тяжелых ядер на порядок и выше. Этот же эффект проявляется и в реакциях спонтанного испускания тяжелых кластеров, что было показано недавно оценочными расчетами в рамках теории возмущений в работе^{/6/}.

Проницаемость кулоновского барьера при одной и той же энергии должна быть различной при распаде и слиянии ядер. На это нарушение симметрии проникаемости при прохождении сложной частицы через несимметричный барьер впервые было обращено внимание в работе^{/7/}. Там же были проведены расчеты для потенциалов простейшей формы в одномерном двухканальном случае. В данной работе мы избавимся от этих ограничений и численные расчеты проведем для физически интересного случая распада ядра ^{222}Ra на ^{14}C и ^{208}Pb и слияния последних двух ядер. Анализ будет проводиться на основе многоканальной модели граничных условий^{/5,8/}.

2. Детали расчетов и обсуждение результатов

Мы начинаем с известной системы уравнений метода сильной связи каналов для радиальных волновых функций относительно движения ядер ^{14}C и ^{208}Pb :

$$\left[\frac{d^2}{dz^2} + \frac{2M}{\hbar^2} \left(E - \epsilon_\alpha - V_\alpha(z) - \frac{\lambda(\lambda+1)}{r^2} \right) \right] R_\alpha(z) = \frac{2M}{\hbar^2} \sum_{\beta} V_{\alpha\beta}(z) R_\beta(z). \quad (I)$$

Здесь ϵ_α - энергия возбуждения в канале α , λ - спин возбуждаемого уровня, $V_\alpha(z)$ - диагональная часть потенциала взаимодействия двух ядер, $V_{\alpha\beta}(z)$ - потенциал связи между основным и возбужденным каналами, M - приведенная масса системы. В данной работе мы будем

**Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА**

учитывать только каналы с неупругим возбуждением одного из сталкивающихся ядер.

Систему уравнений (I) будем решать с разными граничными условиями для реакций распада и слияния. В случае слияния для S' -волны мы полагаем на больших расстояниях

$$R_\alpha(z) = (G_\alpha - iF_\alpha) \delta_{\alpha 0} - S'_\alpha (G_\lambda + iF_\lambda), \quad (2)$$

где $F_\lambda(k_\lambda z)$ и $G_\lambda(k_\lambda z)$ — регулярная и нерегулярная кулоновские функции, k_α — волновой вектор в канале α . На расстоянии $z = R_{\text{кп}}$, совпадающем с минимумом центрального потенциала, мы выбираем граничное условие в виде

$$R_\alpha(z) = A_\alpha h_\lambda^{(2)}(k'_\alpha z), \quad (3)$$

где $h_\lambda^{(2)}(k'_\alpha z)$ — функция Ханкеля 2-го рода. Граничное условие (3) предполагает, что на расстоянии $z = R_{\text{кп}}$ мы имеем только сходящуюся волну^{5/}.

Поток частиц, дошедших до расстояния $z = R_{\text{кп}}$, определим как вероятность туннелирования при слиянии:

$$F = \sum_\alpha F_\alpha = \sum_\alpha \frac{k'_\alpha}{k_\alpha} |A_\alpha|^2. \quad (4)$$

В реакциях распада граничные условия возьмем в следующем виде. На больших расстояниях мы имеем расходящиеся волны во всех каналах:

$$R_\alpha(z) = S'_\alpha (G_\lambda(k_\lambda z) + iF_\lambda(k_\lambda z)), \quad (5)$$

а на расстоянии $z = R_{\text{кп}}$ мы имеем выходящую волну в основном канале и сходящиеся волны во всех каналах:

$$R_\alpha(z) = h_\lambda^{(1)}(k'_\alpha z) \delta_{\alpha 0} + A_\alpha h_\lambda^{(2)}(k'_\alpha z). \quad (6)$$

Часть полного потока, прошедшая через барьер, определяет вероятность туннелирования при распаде

$$T = \sum_\alpha T_\alpha = \sum_\alpha \frac{k_\alpha}{k'_\alpha} |S'_\alpha|^2. \quad (7)$$

В качестве центрального потенциала мы используем потенциал типа "proximity"^{9/}, а для потенциала связи используем стандартное выражение макроскопической модели^{10/}:

$$V_{\alpha\beta}(z) = \delta_\alpha \left[-\frac{dV_{\text{яд}}(z)}{dz} + V_{\text{кул.возд.}}(z) \right]. \quad (8)$$

Второе слагаемое в формуле (8) описывает кулоновское возмущение, которое на расстояниях больших кулоновского барьера ведет себя как $z^{-\lambda-1}$.

В численных расчетах для реакции $^{14}\text{C} + ^{208}\text{Pb} \rightleftharpoons ^{222}\text{Ra}$ мы будем учитывать четыре возбужденных состояния ядра ^{208}Pb : 3^- , 5^- , 2^+ и 4^+ с энергиями возбуждения ϵ_α , равными 2,6; 3,2; 4,1 и 4,3 МэВ и параметрами динамической деформации δ_α , равными 0,835; 0,49; 0,42 и 0,49 соответственно.

На рис.1 показаны центральный потенциал и потенциал связи для рассматриваемых ядер. В верхней части этого рисунка показано расположение радиусов половинной плотности $C_i = R_i - 1/2r_i$, где $R_i = 1,28 A_i^{1/3} + 0,8 A_i^{-1/3} - 0,76$ на расстояниях между центрами ядер $z = R_{\text{кп}}$ и $z = R_\epsilon$ (R_ϵ — радиус кулоновского барьера). Видно, что уже при $z = R_{\text{кп}}$ ядра практически отделены друг от друга. Таким образом, предположение о том, что туннелирование определяется спектром разделенных ядер, является оправданным.

На рис.2 показаны энергетические зависимости полных проницаемостей и проницаемостей в различных каналах при распаде T_α и слиянии F_α . Для наглядности удобно их отнести к проницаемости, рассчитанной без учета связи каналов. Отметим, что проницаемости при распаде T_α соответствуют распаду из возбужденного ядра ^{222}Ra , так как при спонтанном распаде мы имеем $Q_{\text{распада}} = 33,05$ МэВ. Расчеты показывают, что при низких энергиях полная проницаемость при распаде полностью определяется туннелированием в основном состоянии, а при слиянии заметный вклад в проницаемость дают и возбужденные каналы. Видно, что учет связи каналов приводит к усилению проницаемости для слияния уже при энергиях $E \approx V_\epsilon$, а при распаде усиление незначительно и начинается при более низких энергиях.

Показанные на рис.2 коэффициенты для распада T_α дают распределение потоков в асимптотической области, а коэффициенты для слияния F_α — на расстоянии $z = R_{\text{кп}}$, т.е. они учитывают также перераспределение потоков после прохождения кулоновского барьера.

Интересно выяснить, на каких расстояниях происходит наибольшее перераспределение падающего потока для реакций слияния и распада. Для решения этой задачи разложим точные канальные волновые функции

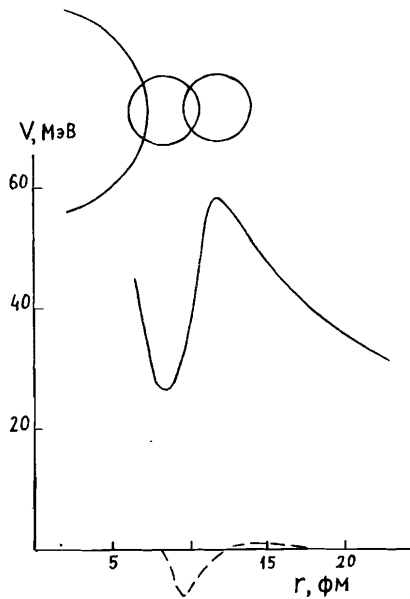


Рис.1. Центральный потенциал (сплошная линия) и потенциал связи (штриховая линия) в зависимости от расстояния между центрами ядер ^{12}C и ^{208}Pb . Вверху показаны конфигурации ядер при $z=R_{\text{кв}}$ и $z=R_0$.

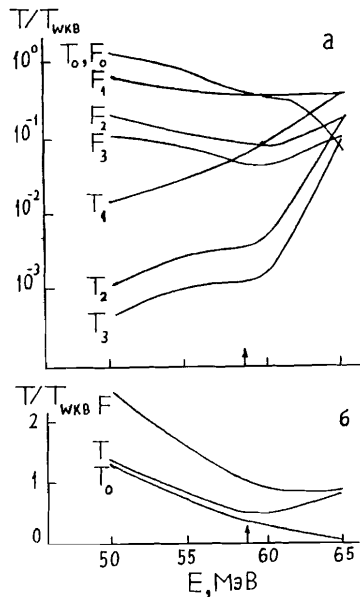


Рис.2. α - проникаемости в различных каналах при распаде T_α и слиянии F_α ; δ - полные проникаемости и проникаемость в основном канале. Стрелкой отмечена высота кулоновского барьера.

относительного движения по сходящимся и расходящимся волнам

$$R_\alpha(z) = f_\alpha(z) \psi_\alpha^{(-)}(z) + t_\alpha(z) \psi_\alpha^{(+)}(z), \quad (9)$$

для которых мы возьмем их квазиклассические выражения. Явный вид этих функций приведен в работе [11]. Выпишем здесь выражения только для сходящихся функций, нормированных на единичный поток:

$$\psi_\alpha^{(-)}(z) = \frac{1}{\sqrt{\kappa_\alpha(z)}} \exp\left[-i \int_R^z \kappa_\alpha(z') dz' + \frac{\pi}{4}\right] \quad \kappa_\alpha^2(z) > 0$$

$$\psi_\alpha^{(+)}(z) = \frac{i}{\sqrt{|\kappa_\alpha(z)|}} \exp\left[-\int_R^z |\kappa_\alpha(z')| dz'\right] + \frac{1}{2\sqrt{\kappa_\alpha(z)}} \exp\left[\int_R^z \kappa_\alpha(z') dz'\right] \quad \kappa_\alpha^2(z) < 0,$$

где
$$\kappa_\alpha^2(z) = K_\alpha^2 - \frac{2M}{\hbar^2} V_\alpha(z) - \frac{\lambda(\lambda+1)}{z^2}$$

локальное волновое число. Вблизи правой и левой точки поворота в подбарьерной области мы используем линейные комбинации функций Эйри $I_{2/3}$.

В верхней части рис.3 для реакции слияния при энергии $E=50$ МэВ мы показали функции $|f_\alpha(z)|^2$, описывающие поток в основном и возбужденном каналах, идущий налево. В средней части рисунка для реакции распада при той же энергии показаны функции $|t_\alpha(z)|^2$, описывающие поток, идущий направо. Стрелками показаны правая и левая точки поворота в основном и возбужденном каналах для этой энергии. Видно, что в реакции слияния система подходит к кулоновскому барьеру практически невозбужденной, а при распаде большая часть потока, идущего направо, оказывается в возбужденном состоянии. Это связано с тем, что в реакции слияния связь каналов перед точкой поворота осуществляется за счет плавно меняющегося потенциала кулоновского возбуждения, а в реакции распада - за счет большого и резко меняющегося ядерного потенциала связи (см. рис.1).

В нижней части рис. 3 мы показали распад для случая, когда ядро ^{208}Pb с самого начала находится в возбужденном состоянии 3^- с энергией 2,6 МэВ и распад происходит при энергии $E = 47,4$ МэВ. Видно, что система с большой вероятностью успевает перейти в основное состояние и в асимптотической области почти весь поток находится уже в основном канале. Таким образом, для расчетов времен жизни тяжелых ядер по отношению к спонтанному распаду или распаду из возбужденных состояний необходимо учитывать спектроскопические факторы тех конфигураций, когда один из распадающихся фрагментов находится в нижайших возбужденных коллективных состояниях.

Можно представить, что аналогичные процессы будут происходить и с реакциями одно- и двухнуклонных передач, если спектроскопические факторы в родительском ядре для некоторых дочерних ядер велики и эти каналы сильно связаны с основным каналом распада. Известно, например [13], что в ядре ^{222}Ra спектроскопический фактор для ядра ^{12}C в 20 раз больше, чем для ядра ^{14}C , но из-за проигрыша в Q реакц. в асимптотической области мы будем наблюдать ядро ^{14}C .

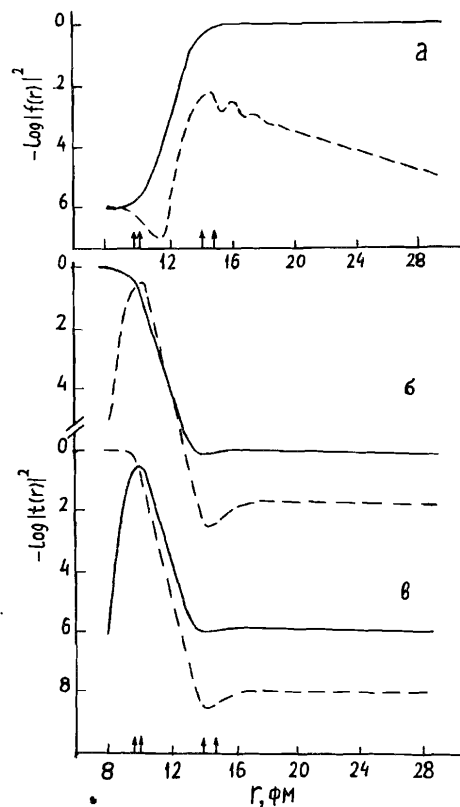


Рис.3. Разложение падающего потока по сходящимся и расходящимся волнам для реакций слияния и распада соответственно. Сплошные линии - потоки в основном канале реакции, пунктирные линии - в возбужденном канале, α - слияние при энергии $E = 50$ МэВ, δ - распад из основного состояния при полной энергии $E = 50$ МэВ, ℓ - распад из состояния 3^- при энергии $E = 47,4$ МэВ.

3. Заключение

В данной работе в реалистическом случае было продемонстрирована асимметрия полной проницаемости под кулоновским барьером в случае учета многих каналов реакции. Показано, что усиление проницаемости из-за связи с каналом неупругого возбуждения при распаде невелико, по сравнению с обратной реакцией слияния. Это может сказаться при описании конкуренции между делением и испарением частиц при снятии возбуждения составного ядра, так как параметры статистической испарительной модели обычно выбираются из реакций слияния.

При изучении реакций спонтанного испускания тяжелых кластеров необходимо учитывать, что начальная распадная конфигурация может состоять из возбужденных осколков, а также из соседних по N и Z ядер. Это приведет к уменьшению теоретических оценок для времен жизни тяжелых ядер 14 .

Авторы благодарны Ф.А.Гарееву, Б.Н.Захарьеву и Ю.М.Чувильскому за обсуждение проблем, затронутых в настоящей работе.

Литература

1. Hill D.L., Wheeler J.A.-Phys.Rev., 1953, 89, p.1102
2. Beckerman M. e.a.-Phys.Rev., 1981, C23, p.1581.
3. Jahnke W. e.a.-Phys.Rev.Lett., 1982, 48, p.17.
4. Dasso C.H., Landowne S., Winter A.-Nucl.Phys., 1983, A405, p.381
5. Шилов В.М. ОИЯИ, P4-86-843, Дубна, 1986.
6. Landowne S., Dasso C.H.-Phys. Rev., 1986, C33, p. 387.
7. Амирханов И.В., Захарьев Б.Н.-ЖЭТФ, 1965, 49, с.1097.
8. Афанасьев Г.Н., Пермяков В.П., Шилов В.М. Тезисы докладов XXXI Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. "Наука" Л., 1981, с.49б.
9. Васк В.В. e.a.-Phys.Rev., 1985, C32, p.195.
10. Бор О., Моттельсон Б. Структура атомного ядра т.2 "Мир", М., 1977.
11. Мигдал А.Б., Крайнов В.П. Приближение методы квантовой механики "Наука", М., 1968.
12. Справочник по специальным функциям. Под ред. Абрамовица М. и Стигана И. "Наука", М., 1979.
13. Кадменский С.Г., Фурман В.И., Чувильский Ю.М. В трудах Школы по структуре ядра, Алуста, 1985, ОИЯИ, Д4-85-851, Дубна, 1985, с.385.
14. Сэндулеску А., Поэнару Д.Н., Грейнер В.-ЭЧАЯ, 1980, т.II, с.1334.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 июня 1987 года.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Тараканов А.В., Шилов В.М.

P7-87-482

Туннелирование при распаде и слиянии сложных ядер

На основе многоканальной модели граничных условий продемонстрирована асимметрия полной проницаемости под кулоновским барьером при учете внутренней структуры сталкивающихся ядер. Для реакций распада усиление вероятности туннелирования по сравнению с одноканальным случаем оказалось небольшим. Показана важность учета состояний, в которых один из распадающихся фрагментов находится в возбужденном состоянии.

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод авторов

Tarakanov A.V., Shilov V.M.

P7-87-482

Tunnelling in decay and fusion reactions of complex nuclei

The total penetrability at energies below the Coulomb barrier is shown to be asymmetric in the framework of the coupled-channel boundary-condition model that takes into account the internal structure of the colliding nuclei. The increase of the tunnelling probability for the decay reactions is small as compared with the single-channel case. It is shown that the consideration of the initial excited states of decay fragments is important.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987