

T-19

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7-93-70

УДК 359.172.17

ТАРАКАНОВ
Александр Викторович

РЕАКЦИИ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ
ПРИ ОКОЛОБАРЬЕРНЫХ ЭНЕРГИЯХ

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1993

Работа выполнена в Лаборатории Теоретической Физики Объединенного Института Ядерных Исследований

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

В.М.Шилов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник

Б.Н.Захарьев

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Ю.М.Чувильский

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Санкт-Петербургский государственный университет

Автореферат разослан "____" "_____" 1993 г. Защита диссертации состоится "____" "_____" 1993 г на заседании специализированного Совета К.047.01.01. Лаборатории Теоретической Физики Объединенного Института Ядерных Исследований, г.Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
доктор физико-математических наук

А.Е.Дорохов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Экспериментальные исследования реакций слияния при подбарьерных энергиях продемонстрировали значительное, в несколько порядков, расхождение экспериментальных данных с теоретическими расчетами сечений слияния, выполненных в рамках одномерных моделей. Это стимулировало изучение влияния сложной структуры сталкивающихся ядер на вероятность подбарьерного туннелирования.

В последние годы, наряду с сечением слияния, проводили измерения функций возбуждения для низколежащих коллективных состояний. Поэтому представляет интерес единое описание реакций слияния и неупругого рассеяния.

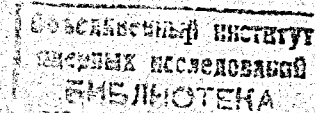
Одним из центральных аспектов в реакциях с тяжелыми ионами является явление туннелирования под кулоновским барьером. Так в связи с открытием асимметричного деления тяжелых ядер представляет интерес изучение явления туннелирования тяжелых кластеров под кулоновским барьером в реакциях распада. В силу несимметричности барьера туннелирование сложной частицы при распаде и слиянии может привести к различным эффектам. Различные эффекты, связанные с туннелированием, могут проявиться в реакциях слияния ядер, имеющих двугорбый потенциальный барьер.

Важной проблемой в реакции слияния является описание угловой заселенности составной системы в зависимости от энергии налетающего ядра. При слиянии ядер составное ядро может обладать большим внесенным угловым моментом и изучение спиновой заселенности важно для понимания динамики деления конечного ядра. Средний угловой момент, вносимый в конечное ядро, а также дисперсия углового момента, определяются распределением парциальных проницаемостей. Поэтому знание этих величин является дополнительным тестом для проверки существующих моделей слияния тяжелых ионов.

Связь различных каналов реакций приводит к расщеплению входного барьера на семейство барьеров. Представляет интерес как связана форма распределения барьеров со сложной структурой ядер и с наличием каналов передач нуклонов, имеющих положительное значение Q -реакции.

Цель работы – теоретические исследования реакций слияния, неупругих возбуждений низколежащих коллективных состояний и реакций передач нуклонов при околбарьерных энергиях. Исследование эффектов, связанных с туннелированием сложных частиц в реакциях распада и слияния. Описание угловой заселенности составного ядра.

Научная новизна. В рамках модели со связью каналов описаны реакции слияния и неупругих возбуждений легких и средних ядер. Рассмотрено влияние асимметрии кулоновского барьера на его проницаемость в реакциях



слияния и распада. Исследована связь формы распределения барьеров со структурой сталкивающихся ядер и с каналами передач нуклонов, имеющих положительное значение Q -реакции. В рамках квазиклассического приближения рассмотрено тунелирование через двугорбый барьер в реакциях слияния.

Практическая ценность. Полученные результаты могут быть использованы при анализе реакций слияния в области астрофизических значений энергии, где проведение экспериментов затруднено из-за малых значений сечений слияния. При оценке времени жизни составного ядра необходимо учитывать те распадные конфигурации, когда один из осколков находится в возбужденном состоянии, либо является соседним по N и Z ядром. Представляет также интерес экспериментальное исследование угловой заселенности составного ядра, получающегося при слиянии ядер, для которых внешний и внутренний барьеры приблизительно равны. Из экспериментальных данных по сечению слияния можно получить информацию о форме распределения барьеров. Это будет являться дополнительной проверкой моделей, которые дают одинаковые результаты для сечения слияния, но разные формы распределения.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы семь работ.

Апробация диссертации. Результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на семинарах ЛТФ, кафедрах теоретической и ядерной и теоретической и математической физики СГУ, на 40-ом и 42-ом совещаниях "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра".

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка литературы, содержащего 100 наименований. Общий объем диссертации 102 страницы машинописного текста. Диссертация содержит 17 рисунков и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность проблем, затронутых в диссертации, кратко излагается содержание работ и полученные результаты.

В главе 1 изложены основные модели, применяемые для описания сечения слияния. В первом параграфе рассмотрены одномерные модели, которые успешно описывают реакции слияния легких ядер. В этих моделях не учитывается внутренняя структура сталкивающихся ядер. Второй параграф посвящен многомерным моделям, в которых определяется процедура усреднения сечения слияния по дополнительному параметру. Для деформированных ядер это модель Вонга, для сферически симметричных ядер — модель, учитывающая колебания поверхности около положения равновесия. В конце главы представлены потенциалы, которые наиболее часто используются при описании реакций с тяжелыми ионами при низких энергиях.

В первом параграфе главы 2 рассмотрена модель граничных условий с сильной связью каналов.

Обе процедуры усреднения для сферических и деформированных ядер является частным случаем более общего подхода, основанного на учете сильной

связи каналов в периферийной области и сильного поглощения во внутренней области ядер.

Гамильтониан системы имеет вид:

$$H = T + H_{in}(\xi) + V(\vec{r}, \xi), \quad (1)$$

где T — гамильтониан относительного движения ядер, $H_{in}(\xi)$ — гамильтониан внутреннего движения, а $V(\vec{r}, \xi)$ — потенциал взаимодействия двух ядер, зависящий от относительного расстояния и внутренних координат. После разложения волновой функции в ряд по собственным функциям внутреннего гамильтониана $H_{in}\Phi_{I_n} = \epsilon_n\Phi_{I_n}$ и по парциальным волнам получается система связанных уравнений:

$$\left(\frac{\hbar^2}{2\mu} \frac{d^2}{dr^2} - \frac{\hbar^2 l_n(l_n + 1)}{2\mu r^2} - V_n(r) + E_n \right) R_{n,l_n}(r) = \sum_{n'} \langle (\mathcal{Y}_{l_n} \otimes \Phi_{I_n})_{JM} | V(r, \xi) | (\mathcal{Y}_{l_{n'}} \otimes \Phi_{I_{n'}})_{JM} \rangle R_{n',l_{n'}}(r) \equiv \sum_{n'} \langle n | V | n' \rangle R_{I_n, l_{n'}}(r) \quad (2)$$

где l_n — орбитальный угловой момент, $V_n(r)$ — диагональный матричный элемент от оператора взаимодействия ядер, $E_n = E_0 - \epsilon_n$, а в правой части при суммировании $n' \neq n$.

Во втором параграфе определены граничные условия для радиальной части волновой функции. На асимптотике накладываются обычные граничные условия в виде сходящейся волны в основном канале и расходящиеся волны во всех каналах реакции:

$$R_{n,l_n}(r) = [G_{l_n}(k_n r) - iF_{l_n}(k_n r)]\delta_{nn_0} - S_{nn_0}^{l_n} [G_{l_n}(k_n r) + iF_{l_n}(k_n r)],$$

$k_n^{(2)} = \left(\frac{2\mu E_n}{\hbar^2} \right)^{\frac{1}{2}}$ — асимптотическое волновое число в канале n . Чтобы ввести сильное поглощение во внутренней области ядра налагается граничное условие в виде сходящейся волны на расстоянии $r = R_{cr} = r_0(A_1^{\frac{1}{3}} + A_2^{\frac{1}{3}})$, где $r_0 \sim 1.0 fm$.

$$R_{n,l_n}(r = R_{cr}) = A_{n,l_n} h_{l_n}^{(2)} [k_{n,l_0}^{(2)}(R_{cr}) R_{cr}].$$

$h_{l_n}^{(2)}$ — функции Ханкеля, а $k_{n,l_n}^{(2)}(r) = k_n(1 - V_l(r)/E_n)^{\frac{1}{2}}$ — локальное волновое число в канале n .

Сформулированная таким образом модель позволяет описывать реакции слияния, упругого рассеяния и неупругих возбуждений ротационных и вибрационных уровней. Там же приведены формулы для сечений слияния, упругого и неупругого рассеяния.

В третьем параграфе рассмотрены приближения в рамках модели граничных условий. В частности показано, что за счет связи каналов происходит расщепление входного барьера на семейство барьеров. В четвертом параграфе

исследована реакция $^{18}O + ^{44}Ca$ и $^{16}O + ^{18}O$. В рамках модели со связью каналов получено хорошее описание сечений слияния и возбуждения уровня 2^+ в ^{44}Ca и ^{18}O .

В третьей главе исследованы реакции распада ядра ^{222}Ra на ^{14}C и ^{208}Pb и слияния последних двух ядер. В реакциях распада граничные условия берутся в следующем виде. На больших расстояниях имеется расходящиеся волны во всех каналах:

$$R_\alpha(r) = S_\alpha [G_\gamma(k_\alpha r) + iF_\gamma(k_\alpha r)], \quad (3)$$

а на расстояниях $r = R_{cr}$ - выходящая волна в основном канале и сходящиеся волны во всех каналах:

$$R_\alpha(r) = h_\gamma^{(1)}(k_\alpha r)\delta_{\alpha 0} + A_\alpha h_\gamma^{(2)}(k_\alpha r). \quad (4)$$

Получены энергетические зависимости полных проницаемостей и проницаемостей в различных каналах для обеих реакций. Исследовано перераспределение падающего потока при слиянии и распаде, когда один из осколков находится в основном и в возбужденном состоянии.

В четвертой главе рассмотрено влияние внутренней структуры эффективного барьера на туннелирование через кулоновский барьер. В первом параграфе приведены квазиклассические выражения для проницаемости двугорбого барьера.

$$T(E) = T_A T_B / \left\{ [1 + (R_A R_B)^{\frac{1}{2}}]^2 \cos^2 \nu + [1 - (R_A R_B)^{\frac{1}{2}}]^2 \sin^2 \nu \right\} \quad (5)$$

В этом выражении T_A и T_B - проницаемости через внутренний и внешний барьеры, а R_A и R_B - коэффициенты отражения, $R_{A,B} + T_{A,B} = 1$, а ν - действие S_L в промежутке между двумя барьерами. (В формуле мы опустили индекс углового момента.) В пренебрежении интерференцией падающих и отраженных волн между двумя барьерами, т.е. после усреднения по фазам в (5), получается простое выражение

$$T(E) = \frac{T_A T_B}{1 - R_A R_B} \quad (6)$$

Для очень тяжелых ядер реализуется случай, когда $V_{cr} \geq V_b$, где V_{cr} - значение потенциала в точке R_{cr} , а V_b - внешний кулоновский барьер. Во втором параграфе исследуются реакции $^{90}Zr + ^{90}Zr$, $^{86}Kr + ^{123}Sb$, $^{96}Zr + ^{124}Sn$. Для реакции $^{90}Zr + ^{90}Zr$ получены парциальные проницаемости на основе численного решения уравнения Шредингера и в рамках квазиклассического приближения. Продемонстрировано хорошее согласие точного и квазиклассического решения на основе формулы (5). Это позволило последние две реакции исследовать в рамках квазиклассического приближения. На примере реакции $^{64}Ni + ^{100}Mo$ показано, что учет внутреннего барьера позволяет улучшить описание угловой заселенности составного ядра.

В третьем параграфе рассматривается модель Стельсона, которая в настоящее время очень активно используется для анализа реакций слияния. В модели Стельсона вводится некоторое распределение барьеров $D(B)$. В этом случае сечение слияния определяется формулой

$$\sigma_{fus}(E) = \int \sigma(E, B) D(B) dB, \quad (7)$$

где

$$\int D(B) dB = 1$$

Хорошее согласие с экспериментальными данными получается при выборе функции $D(B)$ в виде плоской ступени, левая граница B_l которого усредняется по гауссовскому распределению $M(B - B_l)$. Дисперсия гауссовского распределения коррелирует с коллективностью нижайших состояний ядра, а ширина ступени - с энергией связи последнего нейтрона.

В четвертом параграфе исследуется связь распределения барьеров со структурой сталкивающихся ядер в рамках модели граничных условий. В приближении постоянства потенциала связи в районе кулоновского барьера, система уравнений (2) расщепляется. Для сечения слияния получается выражение

$$\sigma_{fus}(E) = \sum_{\alpha} |U_{\alpha 0}|^2 \sigma_{\alpha}(E, V_B + \xi_{\alpha}), \quad (8)$$

где матрица U_{ij} диагонализует матрицу, составленную из зависящих от номера канала энергий и потенциалов связи. Таким образом, сечение слияния определяется суммой σ_{α} сечений с "эффективными барьерами" $V_B + \xi_{\alpha}$ с весовыми множителями $P_{\alpha} = |U_{\alpha 0}|^2$.

Для качественных оценок влияния структуры ядра выбирается простая модель ядра, в которой нижайшее состояние для каждой мультипольности является однофононным, а следующее состояние - двухфононное с удвоенной энергией возбуждения.

На основе реакций $^{32}S + ^{100}Mo$ и $^{36}S + ^{96}Mo$ было проанализирована зависимость спектра распределения барьеров от числа уровней и от характера связи между уровнями. Были включены каналы одно- и двухнейтронных передач. Получены условия, при которых распределение барьеров совпадает с распределением, получаемым в модели Стельсона. Проведено сравнение распределения барьеров, сечения слияния и среднего углового момента, полученных в методе сильной связи каналов, феноменологической модели Стельсона и модели Вонга со статической деформацией.

В заключении кратко перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

Основные результаты, полученные в диссертации:

1. В рамках модели граничных условий без привлечения дополнительных подгоночных параметров единым образом описаны неупругое рассеяние и полное слияние ядер при околбарьерных и подбарьерных энергиях.

2. Продемонстрирована асимметрия полной проницаемости под кулоновским барьером в случае учета многих каналов реакции при распаде и слиянии ядер. Показано, что усиление проницаемости из-за связи с каналом неупругого возбуждения при распаде невелико, по сравнению с обратной реакцией слияния. Продемонстрировано, что начальная распадная конфигурация может состоять из возбужденных осколков, а также из соседних по N и Z ядер.
3. В рамках модели критического расстояния естественным образом получено объяснение энергетического сдвига для порога реакции слияния, а также изменения наклона в энергетической зависимости сечения слияния при околбарьерных энергиях. Показано, что внутренний барьер увеличивает средний угловой момент конечного ядра.
4. В рамках модели граничных условий исследована связь распределения барьеров со структурой сталкивающихся ядер. Показано, что важны не только прямые связи основного состояния системы с возбужденными, но и промежуточные связи, которые значительно обогащают спектр, приближая форму распределения к прямоугольной.
5. Исследовано влияние каналов передач нуклонов на поведение сечения слияния и угловой заселенности составного ядра. Каналы передач с положительными значениями Q-реакции изменяют наклоны в сечении слияния и среднем угловом моменте при промежуточных энергиях.
6. На примере реакций $^{32}\text{S} + ^{100}\text{Mo}$ и $^{36}\text{S} + ^{96}\text{Mo}$, приводящих к одному и тому же составному ядру, исследованы изотопические эффекты в реакции слияния. Для двух реакций получено, наряду с сечением слияния, хорошее описание угловой заселенности конечного ядра.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А.В.Тараканов, В.М.Шилов, *Неупругое рассеяние и слияние тяжелых ионов при околбарьерных энергиях*, Краткие сообщения ОИЯИ, Дубна, N 4[24]-87, с37- 41
2. А.В.Тараканов, В.М.Шилов, *Туннелирование при распаде и слиянии сложных ядер*, ЯФ, т48, вып.1(7), с 109- 113
3. А.В.Тараканов, В.М.Шилов, Р.Шмидт, *Слияние тяжелых ядер при околбарьерных энергиях*, Тезисы докладов 40- го совещания "Ядерная спектроскопия и форма атомного ядра", Ленинград, 1990- Л: Наука, 1990 г., с.433.
4. А.В.Тараканов, В.М.Шилов, Р.Шмидт, *Квазиклассическое описание слияния тяжелых ионов при околбарьерных энергиях*, ЯФ, т53, вып.5, с 1285- 1290

5. А.В.Тараканов, В.М.Шилов, *Угловые моменты составных ядер в реакциях околбарьерного слияния тяжелых ионов*, Тезисы докладов 42- го совещания "Ядерная спектроскопия и форма атомного ядра", Алма- ата, 1992, - : "Наука" С.- Петербургское отделение 1992 г., с.382.
6. В.М.Шилов, А.В.Тараканов, *Распределение эффективных барьеров в слиянии тяжелых ионов при околбарьерных энергиях*, Препринт ОИЯИ, Р7- 92- 453, Дубна, 1992 г.
7. В.М.Шилов, А.В.Тараканов, *Внутренний барьер для реакции $^{64}\text{Ni} + ^{100}\text{Mo}$* , Краткие сообщения ОИЯИ, 1[58]- 93, Дубна, 1993 г., с. 56- 60.

Рукопись поступила в издательский отдел

5 марта 1993 года.