

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Д - 563

4-83-8

**ДОБРОМЫСЛОВ**  
Михаил Борисович

**АНАЛИТИЧЕСКИ РЕШАЕМЫЕ МОДЕЛИ  
В ТЕОРИИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ  
С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ**

**Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра  
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1983

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник

Г.Н.Афанасьев

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
старший научный сотрудник

В.Ю.Гончар

кандидат физико-математических наук  
младший научный сотрудник

С.А.Гончаров

Ведущее учреждение: научно-исследовательский институт физики Ленинградского государственного университета им. А.А.Жданова

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1983 года на заседании Специализированного ученого совета К 047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской обл.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1983 года

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Ученый секретарь Совета  
кандидат физико-математических наук

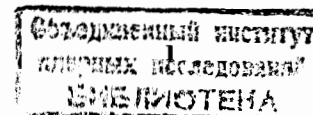
В.И.Журавлев

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние годы проявляется повышенный интерес к исследованиям ядра в реакциях с тяжелыми ионами. Объясняется это тем, что использование в экспериментах тяжелых ионов позволяет значительно расширить возможности исследований, проводимых с легкими частицами.

Одним из важных каналов, возможных в реакциях с участием тяжелых ионов, является канал полного слияния с образованием составного ядра. Изучение этой реакции представляет интерес в связи с попытками синтеза сверхтяжелых элементов. Однако при получении сверхтяжелых ядер имеются определенные трудности: в некоторых экспериментах для тяжелых ядер не обнаружено полного слияния. Тем не менее, для не слишком тяжелых налетающих ионов ( $A \leq 40$ ) при небольших энергиях столкновения ( $E/A \leq 10$  МэВ/нуклон) канал полного слияния является основным. Сечение образования составного ядра  $\sigma_{fus}$  составляет при этом большую часть полного сечения реакции  $\sigma_r$ . С увеличением скорости и массы налетающего иона сечение  $\sigma_{fus}$  становится намного меньше  $\sigma_r$ . Выяснение причины убывания  $\sigma_{fus}$  с ростом энергии для таких легких систем приведет к пониманию физики процесса слияния и для тяжелых ядер.

Неупругое взаимодействие тяжелых ионов с ядрами широко рассматривается в рамках оптической модели. Мнимая часть  $W$  оптического потенциала описывает выбывание падающего потока из упругого канала. Таким образом, сечение неупругого взаимодействия  $\sigma_z$  связано с  $W$ .



Интуитивно следует ожидать, что при  $W \rightarrow \infty$  можно получить модель сильного поглощения типа модели Блатта-Вайскопфа. Поэтому интересно исследовать зависимость  $\sigma_T$  от глубины  $W$  оптического потенциала и выяснить, можно ли получить упомянутую модель при  $W \rightarrow \infty$ .

Оптический потенциал широко используется при рассмотрении упругого и неупругого рассеяния тяжелых ионов. Так, потенциал с мнимой частью, зависящей от орбитального момента, используется для описания аномального рассеяния назад (АРН). Другой возможный подход для объяснения АРН заключается в том, что параметризуется непосредственно  $S$ -матрица с помощью полюсов Редже. Обычно учитывается один или несколько полюсов матрицы рассеяния, которые, как считается, вносят наибольший вклад при низких энергиях. При этом вводится большое число параметров. Возникает вопрос: как много полюсов следует учитывать?

Цель работы. В рамках квантовомеханических моделей, допускающих аналитическое решение: описать основные закономерности процесса слияния; исследовать зависимость полного сечения реакции от глубины мнимой части оптического потенциала; исследовать расположение полюсов и поведение вычетов  $S$ -матрицы с ростом номера полюса на комплексной плоскости углового момента.

#### Научная новизна и практическая ценность

Для описания процесса слияния двух ядер предложена квантовомеханическая модель, в которой сечение образования составного ядра  $\sigma_{fus}$  определяется сечением захвата частицы на квазистационарные уровни ион-ионного потенциала. При этом естественным образом вводится в рассмотрение критический угловой момент, ограничивающий вклад в  $\sigma_{fus}$  парциальных волн с большим орбитальным моментом. Качественно правильно воспроизводится поведение  $\sigma_{fus}$  как функции энергии.

Учтена диссипация энергии при столкновении ядер. "Сброс" кинетической энергии относительного движения сталкивающихся ядер на внутренние степени свободы рассматривался феноменологически. Величина потерь энергии зависит от пробега частицы. Проанализированы различные зависимости потерь от расстояния, пройденного частицей — линейная, квадратичная и экспоненциальная. Показано, что в случае линейной зависимости с помощью одного параметра, определяющего потери энергии на единицу пути, можно удовлетворительно описать экспериментальные данные по  $\sigma_{fus}$ .

Рассмотрена модель, в которой потери энергии относительного движения ядер учитываются квантовомеханически — как результат внутренних возбуждений осцилляторного типа. При этом образование сос-

тавного ядра происходит тогда, когда энергия налетающей частицы оказывается меньше высоты барьера. Объяснено поведение  $\sigma_{fus}$  в зависимости от энергии столкновения и от параметров возбуждаемого осциллятора.

При исследовании зависимости полного сечения реакции  $\sigma_T$  от глубины  $W$  мнимой части оптического потенциала показано, что при  $W \rightarrow \infty$ , так же как и при  $W \rightarrow 0$ ,  $S$ -матрица стремится к унитарному пределу и, следовательно, сечение  $\sigma_T \rightarrow 0$ . Впервые показано, что при  $W \rightarrow \infty$  невозможно получить модель сильного поглощения, как можно было бы ожидать.

Исследовано расположение полюсов и поведение вычетов  $S$ -матрицы с ростом номера полюса на комплексной плоскости углового момента. Показано, что необходимость учета большого числа полюсов связана с очень медленным убыванием вычетов  $S$ -матрицы.

#### Апробация диссертации

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, на международной школе в Румынии (1976), на конференции молодых ученых ЛТФ ОИЯИ (1980), а также были представлены на Международную конференцию по избранным вопросам структуры ядра (Дубна, 1976).

#### Публикации

По материалам диссертации опубликовано 5 работ.

#### Объем работ

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Содержит 110 страниц машинописного текста, 19 рисунков и библиографический список литературы из 108 названий.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность вопросов, затронутых в диссертации. Кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе рассматривается один из важных и интересных каналов реакции при столкновении тяжелых ионов с ядрами — канал полного слияния. Сделан обзор литературы. Изложены основные результаты.



Первый параграф носит обзорный характер. Здесь рассматриваются различные теоретические подходы к описанию процесса слияния.

Во втором параграфе рассматривается точно решаемая модель — комплексная прямоугольная яма с кулоновским потенциалом, позволяющая проанализировать и понять основные черты реакции слияния. Процесс слияния, в результате которого образуется составное ядро, отождествляется с захватом частицы на квазистационарные уровни. Сечение образования составного ядра  $\sigma_{fus}$  может быть записано в виде суммы парциальных сечений

$$\sigma_{fus} = \pi \lambda^2 \sum_{\ell=0}^{\ell_{cr}} (2\ell+1) T_{\ell}$$

где  $T_{\ell}$  есть проницаемость кулоновского барьера, а  $\ell_{cr}$  — наибольший из орбитальных моментов квазистационарных состояний, реализуемых в потенциале. Поведение сечения  $\sigma_{fus}$  как функции энергии относительного движения качественно правильно отражает экспериментально найденную энергетическую зависимость  $\sigma_{fus}$ . Однако в количественном отношении согласия с экспериментом достичь не удается. Обсуждаются возможности улучшения модели.

В третьем параграфе проводится рассмотрение процесса слияния с учетом потерь энергии относительного движения ядер. Учет таких потерь, идущих на внутренние возбуждения, принципиально важен для понимания механизма слияния.

Предполагается, что вследствие некоторого механизма (это может быть, например, столкновение нуклонов при перекрытии плотностей сталкивающихся ядер), который не конкретизируется, эффективная частица в области действия ядерного потенциала теряет энергию. Диссипация энергии учитывается феноменологически. Анализируются потери энергии как функция расстояния, пройденного частицей: линейная, квадратичная и экспоненциальная. Получено удовлетворительное фитирование экспериментальных данных при линейной зависимости потерь энергии от расстояния.

В четвертом параграфе рассматривается аналитически решаемая модель, в которой учет диссипации энергии относительного движения сталкивающихся ядер проводится квантовомеханически. Энергия расходуется на внутренние возбуждения, которые в этой модели рассматриваются как возбуждения осциллятора. Сечение образования составного ядра  $\sigma_{fus}$  определяется как разность сечений возбуждения:  $\sigma_{fus} = \sigma_{\tau}^0 - \sigma_{\tau}$ , вычисленных для случая, соответственно, отсутствия и наличия потенциального барьера при взаимодействии налетающей частицы с силовым центром.

Модель дает качественно правильное поведение  $\sigma_{fus}$  как функции  $E$ : рост сечения для малых энергий и уменьшение — для больших. Иссле-

дована зависимость  $\sigma_{fus}$  от частоты осциллятора и осцилляторной длины. Найдено, что эта зависимость имеет максимум при некоторых значениях параметров.

Обсуждается возможность захвата частицы на связанные состояния в такой модели.

Во второй главе исследуется зависимость полного сечения реакции от глубины мнимой части оптического потенциала.

Первый параграф носит вводный характер.

Во втором параграфе рассматривается оптический потенциал с  $\delta$ -образной мнимой частью —  $iW_0 R \delta(z-R)$ . Реальная часть потенциала ради простоты полагается постоянной. Получена парциальная  $S$ -матрица, выражающаяся через реальную  $\Psi_{\ell}$  и мнимую  $\Psi_{2\ell}$  части логарифмической производной внутренней волновой функции в точке сшивания решений при  $z=R$ . Показано, что парциальные проницаемости  $T_{\ell}$ , непосредственно связанные с  $S$ -матрицей

$$T_{\ell} = 1 - |S_{\ell}|^2$$

как функции глубины мнимой части имеют максимум при некотором конечном значении  $W_0$ . Таким образом при  $W_0 \rightarrow \infty$ , так же, как и при  $W_0 \rightarrow 0$ , проницаемости  $T_{\ell}$  стремятся к нулю, а  $S$ -матрица стремится к унитарному пределу. Полное сечение реакции при этом становится равным нулю.

Показано, что при  $W_0 \rightarrow \infty$  для функций  $\Psi_{\ell}, \Psi_{2\ell}$  невозможно получить такой вид, который давал бы модель сильного поглощения Блатта-Вайскопфа.

В третьем параграфе аналогичное рассмотрение выполнено для комплексной прямоугольной ямы. Показано, как и в случае  $\delta$ -образной мнимой части, что полное сечение реакции  $\sigma_{\tau}$  имеет максимум при некотором значении  $W_0$ . При этом проницаемости  $T_{\ell}$  коррелируют с ходом сечения  $\sigma_{\tau}$ : при фиксированной энергии  $T_{\ell}$  как функции мнимой части имеют максимум при том же значении  $W_0$ , при котором становится максимальным сечение  $\sigma_{\tau}$ . Показано, что при стремлении мнимой части потенциала к бесконечности полное сечение реакции  $\sigma_{\tau}$  стремится к нулю. В этом случае также невозможно получить модель сильного поглощения потока, прошедшего барьер.

В третьей главе для комплексного потенциала в виде прямоугольной ямы находятся полюсы и вычеты  $S$ -матрицы на комплексной плоскости углового момента. Анализируется сходимость ряда по полюсам в разложении  $S$ -матрицы.

В первом параграфе рассматривается однополюсное приближение и процедура учета нескольких полюсов в разложении  $S$ -матрицы по полюсам на комплексной плоскости углового момента.

Во втором параграфе рассматривается преобразование Ватсона на комплексной плоскости углового момента. При этом  $S$ -матрица представляется в виде суммы по полюсам и фонового члена. Для комплексной прямоугольной ямы без кулоновского взаимодействия найдено расположение полюсов матрицы рассеяния на комплексной плоскости углового момента. Показано, что реальная и мнимая части вычетов с ростом номера полюса выходят на практически постоянные значения, что приводит к плохой сходимости ряда по полюсам в разложении  $S$ -матрицы.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

#### Основные результаты диссертации, выдвигаемые на защиту

1. Рассмотрена квантовомеханическая модель, в которой сечение образования составного ядра  $\sigma_{fus}$  отождествляется с сечением захвата эффективной частицы на квазистационарные уровни ион-ионного потенциала. При этом естественным образом вводится критический угловой момент  $l_{cr}$ , ограничивающий вклад в  $\sigma_{fus}$  парциальных волн с большим значением углового момента.  $l_{cr}$  есть наибольший из моментов квазистационарных состояний, реализуемых в эффективном потенциале. Полученный  $l_{cr}$  оказывается зависящим от массовых чисел сталкивающихся ядер.

2. Учтены потери энергии относительного движения при столкновении двух ядер. Потери вводились феноменологически: величина "сброшенной" энергии определялась длиной пробега эффективной частицы. Достигнуто удовлетворительное описание экспериментальных сечений  $\sigma_{fus}$  для линейной зависимости потерь энергии от пройденного расстояния. При исследовании зависимости  $\sigma_{fus}$  от глубины ядерного потенциала  $V_0$  найдено, что увеличение  $V_0$  приводит к менее быстрому падению  $\sigma_{fus}$  с ростом энергии при больших  $E$ .

3. Диссипация энергии относительного движения ядер рассмотрена квантовомеханически - как результат внутренних возбуждений осцилляторного типа. Предполагается, что составное ядро в такой модели образуется всякий раз, как только энергия налетающего иона после возбуждения осциллятора оказывается меньше высоты барьера. Объяснено поведение  $\sigma_{fus}$  в зависимости от энергии столкновения и от осцилляторных параметров.

4. При исследовании зависимости полного сечения реакции  $\sigma_z$  от глубины  $W$  мнимой части оптического потенциала показано, что при  $W \rightarrow \infty$ , так же, как и при  $W \rightarrow 0$ ,  $S$ -матрица стремится к унитарному пределу. Сечение  $\sigma_z$  при этом стремится к нулю.

5. Впервые показано, что при неограниченном росте глубины  $W$  комплексного потенциала невозможно из оптической модели получить модель сильного поглощения.

6. С целью выяснения причины, по которой необходимо учитывать большое число полюсов Редже при низких энергиях, исследовано положение полюсов и поведение вычетов  $S$ -матрицы с ростом номера полюса на комплексной плоскости углового момента. Показано, что вычеты убывают очень медленно с ростом номера полюса. Вследствие этого ряд, суммируемый по полюсам, сходится плохо, поэтому необходимо учитывать большое число полюсов.

#### Результаты диссертации опубликованы в работах:

Афанасьев Г.Н., Добромыслов М.Б. О применимости полюсов Редже для описания ядерных реакций при низких энергиях. Дубна, 1976 - 8 с. (Сообщения/ОИЯИ: P4-10187).

Афанасьев Г.Н., Добромыслов М.Б., Ким Ынг Пхунг. Некоторые модели в теории слияния тяжелых ионов. - Дубна, 1976. - 15 с. (Сообщения/ОИЯИ: P4-9564).

Afanasyev G.N., Dobromyslov M.B., Kim Bung Poong, Shilov V.M. On the definition of the reaction and complete fusion channels in heavy ion reactions. - In: Proc. of Predeal Int. Summerschool on heavy ion physics. Predeal, 1976. p.563-570.

Афанасьев Г.Н., Добромыслов М.Б., Ким Ынг Пхунг, Шилов В.М. Влияние мнимой части оптического потенциала на полные сечения реакции. - Изв. АН СССР (сер. физ.), 1977, т. 41, № 10, с. 2121-2124.

Афанасьев Г.Н., Аврамов С., Добромыслов М.Б., Ким Ынг Пхунг, Шилов В.М. Влияние мнимой части оптического потенциала на сечения реакции. - Дубна, 1976. - 18 с. (Сообщ./ОИЯИ: P4-9892).

Тезисы XXUP Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Ташкент, 1977. с. 357, 358.

Афанасьев Г.Н., Добромыслов М.Б., Ким Ынг Пхунг. Выделение канала слияния в реакциях с тяжелыми ионами. - В кн.: Труды международной конференции по избранным вопросам структуры ядра. т.1, с. 139. Дубна, 1976.

Афанасьев Г.Н., Гальперин А.Г., Добромыслов М.Б., Пермяков В.П., Шилов В.М. Диссипация энергии в реакциях с тяжелыми ионами в рамках потенциальной модели. - Изв. АН СССР (сер. физ.), 1980, т. 44, № 7, с. 1502-1509. (Препринт ОИЯИ: P4-12918), Дубна, 1979, с. 12.

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 января 1983 года.