

**АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

H-312

На правах рукописи
УДК 539.17

НАСИРОВ АВАЗБЕК КАРИМОВИЧ

**ПОЛУМИКРОСКОПИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПИСАНИЯ
МНОГОНУКЛОННЫХ ПЕРЕДАЧ И СЛИЯНИЯ-ДЕЛЕНИЯ В
РЕАКЦИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ**

Специальность: 01.04.16 – физика элементарных частиц и атомного ядра

**АВТОРЕФЕРАТ
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук**

Ташкент
2003

Работа выполнена в Отделе физики тяжелых ионов Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан и Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Иргазиев Б.Ф.

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Чувильский Ю.М.

доктор физико-математических наук,
профессор Чудаков В.М.

Ведущая организация:

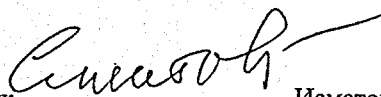
Физико-Энергетический Институт
г.Обнинск, Российская Федерация

Защита диссертации состоится «26» декабря 2003 года в 10⁰⁰ часов на заседании Специализированного совета Д 015.15.02 при Институте ядерной физики АН РУз. по адресу: 702132, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ АН РУз, большой зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ АН РУз и Фундаментальной библиотеке АН РУз.

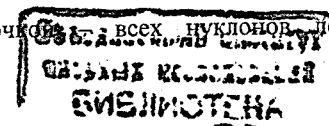
Автореферат разослан «24» ноября 2003 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета
Доктор физико-математических наук


Исматов Е.И.

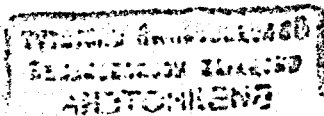
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время предпринимаются большие усилия для синтеза новых сверхтяжелых элементов (СТЭ) и получения новых радиоактивных изотопов, значительно удаленных от границы бета-стабильности в реакциях с тяжелыми ионами. Уже зарегистрированы события с образованием радиоизотопов сверхтяжелых элементов $Z=110, 111, 112$ (в GSI, ФРГ и в ЛЯР ОИЯИ, Дубна), $114, 116, 118$ (в ЛЯР ОИЯИ, Дубна), что указывает на существование острова стабильности, предсказанного теоретиками в конце 60-х годов XX века. С увеличением заряда СТЭ ширина функции возбуждения его образования, как остатка испарения, сужается, и наблюдаемые сечения образования СТЭ резко уменьшаются, до пикобарна. Оказалось что, оптическая модель, модель критической дистанции и модель поверхностного трения не в состоянии описать сечения слияния реакций между массивными ядрами. В этих моделях сам механизм слияния не рассматривается: обычно постулируется, что полное слияние ядер произойдет неизбежно после того, как налетающее ядро захватывается ядром мишени. Макроскопическая динамическая модель позволяет проследить эволюцию слияния ДЯС как слияние двух капель гипотетической ядерной жидкости. При этом важные свойства ядер такие, как их оболочечная структура и нуклонный состав не принимаются во внимание. Вследствие этого расхождение между предсказаниями макроскопической динамической модели для сечения слияния ядер и экспериментальными данными возрастает с увеличением массы сталкивающихся ядер или с увеличением массовой симметрии. Несмотря на успехи в экспериментах по синтезу СТЭ, представление о механизме слияния двух ядер до сих пор неоднозначно. Концепция двойной ядерной системы, выдвинутая профессором В.В. Волковым (Лаборатория ядерных реакций, ОИЯИ, Дубна) представляет более точную картину слияния. Слияние рассматривается как передача – оболочка за оболочку ~~оболочка~~ всех нуклонов легкого ядра тяжелому.



Теоретические модели, основанные на этой концепции, установили причину драматического падения сечения реакции при синтезе СТЭ. Это — конкуренция полного слияния ядер с квазиделением, которое составляет подавляющую часть сечения захвата ядер. Как показывает эксперимент оболочечная структура ядер играет решающую роль при образовании тех или иных продуктов реакций слияния-деления и в реакциях квазиделения, протекающих при низких энергиях. Однако, теория, учитывающая оболочечную структуру взаимодействующих ядер, пока не разработана. Следовательно, не построена самосогласованная теория взаимодействия тяжелых ионов, пригодная для расчета всех стадий столкновения и образования продуктов реакций. Каждая из стадий реакций, захват, слияние и образование ядра остатка, может быть проанализирована в рамках отдельных моделей. Эти модели нуждаются в предположениях о механизме реакций и определениях используемых параметров для того, чтобы описывать экспериментальные данные. Проявление оболочечных эффектов в массово-энергетическом распределении продуктов реакции и зависимость сечения образования продуктов реакции от входного канала вынуждает разработать теоретические методы, непосредственно включающие в рассмотрение микроскопические степени свободы взаимодействующих ядер. Только совершенная и самосогласованная теория позволяет однозначно установить механизм слияния массивных ядер.

Цель работы состоит в разработке полумикроскопического метода для исследования механизма реакций с тяжелыми ионами и учитывающего оболочечную структуру взаимодействующих ядер; в изучении влияния входного канала на вероятности образования продуктов реакции с помощью описания и интерпретации экспериментальных данных; в достижении прогнозирования благоприятных условий для синтеза сверхтяжелых элементов.



Научная новизна и практическая ценность. Впервые в работе разработан полумикроскопический метод описания нуклонного обмена и распределения энергии возбуждения между фрагментами продуктов реакций глубокоэластичных передач, а также сечения захвата и слияния ядер в столкновениях тяжелых ионов на основе концепции двойной ядерной системы. Впервые установлено влияние оболочечной структуры ядер на распределение энергии возбуждения между продуктами реакций и выявлена зависимость такого распределения от атомной массы изотопов. Динамика захвата ядер при столкновении тяжелых ионов исследовалась путем совместного решения макроскопических уравнений для относительного движения ядер и микроскопического уравнения Луивилля для чисел заполнения одночастичных состояний с небольшим шагом по времени $\Delta t = 2.5 \cdot 10^{-23}$ s. Кинетические коэффициенты макроскопических уравнений связаны с изменением внутреннего состояния ядер и нуклонным обменом между ними. Коэффициенты радиального и тангенциального трения, динамическое изменение ядро-ядерного потенциала в зависимости от относительного положения ядер получены усреднением оператора, связывающего макроскопические и микроскопические степени свободы, по одночастичным состояниям ядер. Ядро-ядерный потенциал вычисляется с помощью метода двойной свертки, в котором не предполагается, что ядра сферические. Это позволяет изучать столкновения деформированных ядер с разной взаимной ориентацией осей симметрии. Установлено, что причиной резкого падения сечения образования ядра-остатка в реакциях холодного слияния является конкуренция между полным слиянием и квазиделением, которая зависит от внутреннего барьера слияния и барьера квазиделения промежуточной ДЯС. Внутренний барьер слияния определяется разностью между значениями управляющего (driving) потенциала во входном канале и его максимумом. Благодаря вычислению управляющего потенциала с помощью экспериментальных значений энергий связи ядер,

оболочечные эффекты явно учитываются при вычислении вероятности полного слияния. Явный учет оболочечной структуры ядер сталкивающихся ядер в разработанном методе позволяет не только интерпретировать экспериментальные данные, но и рекомендовать оптимальные экспериментальные условия для синтеза того или иного сверхтяжелого элемента. В рамках разработанного метода проведены оценки возможности использования ряда реакций для синтеза сверхтяжелых элементов для экспериментов в ОИЯИ (Дубна, Россия), ГСИ (Дармштадт, ФРГ) и ГАНИЛ (Каэн, Франция).

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, приведенные в диссертации:

1. Полумикроскопический метод на основе концепции двойной ядерной системы для исследования связи между микроскопическими и макроскопическими характеристиками динамики ядер при глубоконеупругом столкновении тяжелых ионов.

2. Механизм диссипации кинетической энергии относительного движения ядер при глубоконеупругом столкновении тяжелых ионов, учитывающий оболочечную структуру одночастичных состояний. В основе механизма лежит частично-дырочные возбуждения в ядрах, составляющих двойную ядерную систему и нуклонный обмен между ними. Впервые установлена причина неравновесного распределения энергии возбуждения между первичными фрагментами глубоконеупругих столкновений и квазиделения.

3. Метод расчета потенциала ядро-ядерного взаимодействия для ядер с квадрупольной и октупольной деформацией при произвольной ориентации их осей аксиальной симметрии.

4. Установлено, что эффективные нуклон-нуклонные силы, зависящие от плотности среды (Мигдаловские силы) приводят к отталкиванию ядер при увеличении перекрытия их плотностей.

5. Выражения для радиального и тангенциального коэффициентов трения, формулы для динамических поправок к ядро-ядерному потенциалу и к приведенной массе, связанных с внутренним движением нуклонов в ядрах и обменом нуклонами между ними, и их использование для вычисления траекторий столкновения ядер.

6. Метод вычисления числа парциальных волн, ведущих к захвату ядер в зависимости от энергии пучка и ориентации осей симметрии сталкивающихся ядер.

7. Метод расчета вероятности слияния ядер, учитывающий конкуренцию полного слияния с квазиделением.

Апробация диссертации. Основные материалы диссертации неоднократно докладывались на семинарах Лабораторий теоретической физики и ядерных реакций ОИЯИ, Института ядерной физики АН Республики Узбекистан, Научно-исследовательского института ядерной физики МГУ им. Ломоносова, Научно-исследовательского института прикладной физики и кафедры теоретической физики Национального университета Узбекистан, Института теоретической физики Гиссенского университета (ФРГ), Физического факультета Технического университета Мюнхена (ФРГ), Физического факультета университета Мессина (Италия), Сектора синтеза сверхтяжелых элементов ГСИ (ФРГ), а также на Международных школах-семинарах по физике тяжелых ионов (Дубна, 1993, 1996, 1999, 2002), на XV Международной конференции по ядерной физике «Ядерная динамика низкой энергии» (Санкт-Петербург, 1995), на Международных конференциях «Коллективная ядерная динамика» (Киев, 1996), «Коллективные движения большой амплитуды в атомных ядрах» (Брело-Мессина, Италия, 1996), «Ядерная физика на границе стабильности» (Липари-Мессина, Италия, 2001), «Современные проблемы ядерной физики» (Самарканд, 2000, 2003, Бухара, 2001, Ташкент, 2002), на Международных симпозиумах «Новые проекты и направления исследований в ядерной физике» (Мессина, Италия, 2002) и «Ядерные

кластеры: от легких экзотических до сверхтяжелых ядер» (Рауишольцхаузен-Марбург, ФРГ, 2002).

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 20 научных статей в международных реферируемых периодических журналах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Она содержит 185 страниц машинописного текста, включая 7 таблиц, 66 рисунков и библиографический список из 198 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении даётся краткий обзор современных проблем физики столкновения тяжелых ионов, изложена постановка физической задачи, обоснована актуальность и важность исследуемых вопросов, кратко представлен материал диссертации.

В первой главе излагаются основные положения развиваемого подхода, основанного на концепции ДЯС и нерелятивистской квантовой механике. В разделе 1.2 обсуждается гамильтониан для описания столкновения двух массивных ядер: относительное движение представлено кинетической и потенциальной энергиями. Потенциальная энергия определяется двойной сверткой стационарной плотности нуклонов с эффективным нуклон-нуклонным взаимодействием, зависящим от плотности ядерной среды; внутреннее движение – состояние нуклонов во взаимодействующих ядрах описывается в формализме вторичного квантования; связь между относительным движением и состоянием нуклонов представлена членом, пропорциональным флуктуации плотности нуклонов. Эта флуктуация связана с появлением частично-дырочных возбуждений в каждом из ядер и с нуклонным обменом между ними. Изменение энергии, вызванное частично-дырочными возбуждениями вычисляется путем усреднения среднего поля одного ядра

с помощью одночастичных волновых функций другого ядра. Изменение энергии, связанное с нуклонным обменом определяется матричным элементом от среднего поля ДЯС на волновых функциях частиц, принадлежащих ядрам донора и акцептора. В разделе 1.3 выведен оператор эволюции для описания динамики сближения ядер и изменения в распределениях нуклонов при взаимодействии. Это позволяет получить выражение для временной зависимости члена связи между коллективными и внутренними степенями свободы. В разделе 1.4, показано, что усреднение этого выражения по одночастичным состояниям возбужденных ядер дает диссипацию (потерю энергии) относительного движения, поправку к ядро-ядерному потенциалу и изменению кинетической энергии за счет перенормировки приведенной массы. В разделе 1.5, в рамках теории линейного отклика с помощью того же гамильтониана найдены выражения для кинетических коэффициентов в уравнениях относительного движения. Показано, что они точно совпадают с теми, которые получены в разделе 1.4. Раздел 1.6 посвящен анализу флуктуационно-диссипативной теоремы для радиального движения. Получены формулы для первого и второго моментов импульса относительного движения, а также определены коэффициенты диффузии и трения. В разделе 1.7, обсуждается учет влияния остаточных сил с помощью их линеаризации, используя так называемое τ – приближение. Результаты численных расчетов для траектории столкновения тяжелых ионов ^{64}Ni с ядрами ^{208}Pb и их обсуждение приведены в разделе 1.8. Динамическая поправка к ядро-ядерному потенциалу, вызванная нуклонным обменом и частично-дырочными возбуждениями, отрицательного знака и достигает до 3 МэВ при максимальном перекрытии плотностей двух ядер, что усиливает притяжение ядер. Расчеты показали, что диссипация кинетической энергии приводит к захвату ядер, при котором образуется ДЯС. В разделе 1.9, разработанный метод применен для исследования отклонения от

соотношения Эйнштейна, связывающего коэффициенты трения и диффузии при полном тепловом равновесии. Учёт временной зависимости чисел заполнения одночастичных состояний приводит к существенному отклонению от соотношения Эйнштейна на начальной стадии столкновения ($\Delta t = 3 \cdot 10^{-22}$ s) в реакции $^{40}\text{Ar} + ^{108}\text{Ag}$ при энергии налетающего иона $E_{\text{лаб}} = 240$ МэВ. Это обстоятельство связано с тем, что установление термодинамического равновесия не происходит мгновенно.

Глава II посвящена вычислению коэффициентов радиального и тангенциального трения в реакциях глубоконеупругих передач. В разделе II.1 получена формула для кинетических коэффициентов с учетом времени релаксации частично-дырочных возбуждений. Уравнение движения для неравновесных чисел заполнения дополнено релаксационным членом, соответствующим установлению термодинамического равновесия. Такой подход известен под названием τ -приближения. Использование решения кинетического уравнения в τ -приближении при вычислении коэффициента трения позволило получить разумные численные значения, пригодные для расчета динамических траекторий столкновения тяжелых ионов. Раздел II.2 содержит выводы, вытекающие из сравнения полученных в работе результатов с классической теорией Гросса и Калиновски и с двухцентровой моделью, предполагающей немедленное установление термодинамического равновесия. Сравнение результатов, полученных для реакции $^{64}\text{Zn} + ^{196}\text{Pt}$ при $E_{\text{лаб}} = 440$ МэВ показало, что при уменьшении расстояния между центрами ядер разница между коэффициентами трения, полученными в разных подходах драматично возрастает: коэффициент трения Гросса и Калиновски становится на несколько порядков больше, чем коэффициенты трения обсуждаемой модели и двухцентровой модели. Отмечено, что коэффициент трения растет с ростом энергии возбуждения. Это видно из сравнения значений коэффициентов трения, вычисленных по траекториям сближения и удаления при

глубоконеупругом столкновении тяжелых ионов $^{64}\text{Zn}(440 \text{ МэВ}) + ^{196}\text{Pt}$ и $^{56}\text{Fe}(480 \text{ МэВ}) + ^{208}\text{Pb}$. Диссипация кинетической энергии происходит постепенно и до точки поворота сбрасывается около 40% первоначальной энергии, т.е. имеет место режим не сильного затухания.

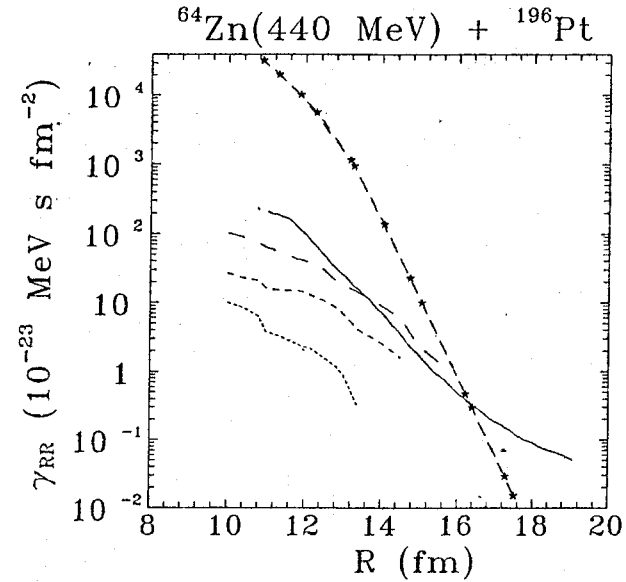


Рис.1. Сравнение радиального коэффициента трения, вычисленного в рамках настоящей модели для начальной стадии реакции $^{64}\text{Zn}(440 \text{ МэВ}) + ^{196}\text{Pt}$, в зависимости от расстояния между центрами ядер R (сплошная кривая), с результатами классической модели Гросса и Калиновски (кривая с звездочками) и микроскопической модели Ямаги при температуре ядер $\Theta = 2.0$ МэВ (кривая с длинными штрихами); $\Theta = 1.0$ МэВ (штриховая кривая); $\Theta = 0.5$ МэВ (точечная кривая).

В главе III рассмотрено распределение энергии возбуждения между фрагментами бинарных реакций. Полная кинетическая энергия в результате диссипации распределяется в основном между одночастичными степенями свободы взаимодействующих ядер. Потеря, вызванная возбуждением коллективных степеней свободы (деформация и поверхностные колебания) не рассматривалась. Представлена процедура расчета энергии возбуждения в протонных и нейтронных подсистемах, что позволило следить за изменением отношения энергий возбуждения фрагментов ДЯС, в зависимости от полной энергии возбуждения и от входного канала. Эти зависимости можно извлечь из экспериментов в реакциях глубоконеупругих передач. Результаты показывают, что легкое

ядро получает энергии возбуждения больше, чем тяжелое. Это согласуется с результатами наших расчетов (см. Рис. 2). Следует отметить, что эта закономерность оказалась общей для

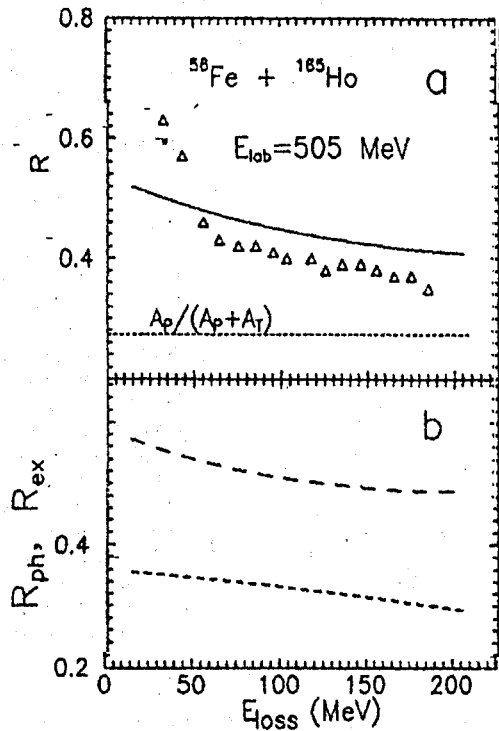


Рис. 2. а) Отношение энергии возбуждения снарядоподобного фрагмента E^*_P и общей энергии возбуждения для реакции ^{56}Fe (505 МэВ) + ^{165}Ho как функция общей энергии возбуждения $E_{\text{loss}} = E^*_P + E^*_T$. Треугольниками обозначены экспериментальные данные. Сплошная кривая получена по нашей модели. Точечная линия соответствует случаю теплового равновесия $E^*_P/E_{\text{loss}} = A_P/(A_P + A_T)$.

б) Вычисленные значения отношений $R_{\text{ex}} = E^*_{\text{ex}}(P)/(E^*_{\text{ex}}(P) + E^*_{\text{ex}}(E))$ — энергии возбуждения, связанные с обменом нуклонами (длинные штрихи) и частично-дырочными возбуждениями $R_{\text{ph}} = E^*_{\text{ph}}(P)/(E^*_{\text{ph}}(P) + E^*_{\text{ph}}(E))$ (штриховая линия) для реакции $^{56}\text{Fe}(505 \text{ МэВ}) + ^{165}\text{Ho}$ как функция общей энергии возбуждения E_{loss} .

всех реакций при энергиях около кулоновского барьера. Этот эффект объясняется с оболочечной структурой взаимодействующих ядер, которая препятствует быстрому установлению термодинамического равновесия. Расстояние между уровнями в легком ядре больше, чем в тяжелом, так как, при примерно одинаковой глубине потенциала, в легком ядре число нуклонов меньше, а расстояние между уровнями больше. В результате, энергия, приходящаяся на каждый переход между уровнями будет больше в легком ядре, чем в тяжелом. С помощью предложенного метода вычислены отношение энергий возбуждения протонной и нейтронной

подсистем, а также отношение между вкладами в энергию возбуждения, соответствующими частично-дырочным возбуждениям и нуклонному обмену. Следует отметить, что вклад обмена нейтронами в диссипацию кинетической энергии является определяющим. Расчеты показали, что в $^{40,44}\text{Ca}$ (285 МэВ) + ^{248}Sm реакциях зарядовая асимметрия растет с ростом времени. Это соответствует экспериментально наблюдаемому росту выхода продуктов реакции с массами, большими, чем масса ядра-мишени. В реакции с ^{48}Ca зарядовая асимметрия уменьшается, что также находится в согласии с экспериментально наблюдаемым увеличением выхода продуктов реакции с массой, меньшей массы ядра-мишени.

Исследовалось влияние N/Z — отношения бомбардирующего ядра на распределение энергии возбуждения. Показано, что отношение энергии возбуждения легкого и тяжелого фрагментов R^{PT} в $^{44,54}\text{Ca}$ (285 МэВ) + ^{248}Sm реакциях больше, чем в $^{40,48}\text{Ca}$ (285 МэВ) + ^{248}Sm реакциях. Во всех этих реакциях R^{PT} уменьшается с увеличением начального орбитального углового момента. Вклад протонного обмена в общую энергию возбуждения возрастает с увеличением N/Z — отношения в налетающем ядре и становится сравнимым с вкладом от нейтронного обмена. Это связано с тем, что с увеличением N/Z — отношения растет энергия отрыва протона, поверхность Ферми для протонов в снаряде становится более глубокой. В результате, средняя энергия возбуждения на передачу протона между тяжелым изотопом налетающего ядра и ядром-мишени, возрастает. Использование тяжелого изотопа как снаряд увеличивает различие между последним заполненным протонным уровнем снаряда и первым вакантным уровнем ядра мишени. Большое различие между поверхностями Ферми взаимодействующих фрагментов может увеличить количество переданных протонов от мишени к снаряду.

Исследовано влияние плотности одночастичных уровней вблизи поверхности Ферми в снарядоподобных фрагментах на отношение энергий возбуждений легкого и тяжелого фрагментов в глубоконеупругих

столкновениях. Показано, что двукратное увеличение плотности уровней снарядоподобных фрагментов (спектр уровней в тяжелом фрагменте остается неизменным) уменьшает отношение энергии возбуждений $R^{P/T}$ приблизительно в 1.5 раза. Тем самым подтверждается, что из-за меньшей плотности уровней в легком фрагменте его энергия возбуждения больше, чем в тяжелом. Таким образом, экспериментально установленное отклонение отношения энергии возбуждений $R^{P/T}$ в первичных продуктах реакций от термодинамического равновесия, может быть связано с разностью в плотностях уровней в легком и тяжелом ядрах. Для изучения механизма диссипации энергии проанализированы результаты экспериментов, в которых исследовалось влияние оболочечной структуры на обсуждаемую корреляцию между дисперсией зарядового числа продуктов σ_z^2 и потерей полной кинетической энергии. Крутизна кривой зависимости σ_z^2 от потери полной кинетической энергии для реакции ^{238}U (7.4 МэВ/А) + ^{238}U больше по сравнению с реакциями ^{208}Pb (7.5 МэВ/А) + ^{238}U и ^{208}Pb (7.6 МэВ/А) + ^{208}Pb . Известно, что плотность одночастичных уровней около поверхности Ферми в ^{238}U больше, чем в ^{208}Pb . При увеличении плотности уровней облегчается переход нуклонов между уровнями, так как уменьшается энергия возбуждения на переход, что было причиной уменьшения $R^{P/T}$. Расчёты показали, что в глубокоэластичных столкновениях тяжелых ионов крутизна кривой зависимости σ_z^2 от потери полной кинетической энергии при увеличении в 2 раза плотности уровней около поверхности Ферми в ядре-снаряде становится больше по сравнению с крутизной кривой, вычисленной при неизменной плотности уровней для всех рассмотренных реакций.

В главе IV исследована роль входного канала на вероятность процессе слияния массивных ядер в рамках концепции ДЯС. Механизм образования ядра-остатка рассмотрен как трех стадийный процесс.

Первая стадия – захват налетающего иона ядром мишени и образование ДЯС, поведение которой зависит от начальной энергии и орбитального момента столкновения. Необходимым условием для захвата является наличие потенциальной ямы и попадание системы в этот карман после диссипации относительной кинетической энергии. Если система не попадает в потенциальную яму, наблюдаются реакции квазиупругих или глубокоэластичных столкновений: а) В квазиупругом столкновении система не попадает в потенциальную яму из-за того, что энергия пучка мала и система не может преодолеть кулоновский барьер во входном канале; б) В глубокоэластичных столкновениях начальная энергия пучка достаточно высока от кулоновского барьера и силы трения не настолько интенсивны, чтобы после потери большей части начальной кинетической энергии система не смогла преодолеть кулоновский барьер из внутренней стороны в обратном пути. Случай б) аналогичен столкновению ионов, когда отсутствует яма в ядро-ядерном потенциале. В этих реакциях образуется короткоживущая ДЯС. Для экспериментаторов практический интерес представляет энергетическое окно – интервал для энергии пучка, $E_{\text{мин.}} < E_{\text{ц.м.}} < E_{\text{макс.}}$, в котором сечения захвата и слияния принимают свои максимальные значения. Минимальное значение $E_{\text{мин.}}$ определяется барьером входного канала, а максимальное значение $E_{\text{макс}}$ зависит от динамики столкновения.

Вторая стадия – трансформация ДЯС в нагретое составное ядро компактной формы путем передачи всех нуклонов легкого фрагмента в тяжелый фрагмент (полное слияние). Характерной чертой такого механизма слияния является малость области перекрытия плотностей ядер и сохранение оболочечной структуры обоих фрагментов. Двойная ядерная система может распадаться на пути к слиянию или может эволюционировать в сторону массовой симметрии и распадаться. Эти два канала ведут к квазиделению – процессу, при котором составное ядро не образуется, но продукты распада ДЯС имеют почти такие же

характеристики, как и продукты деления. Квазиделение сильно конкурирует с полным слиянием.

Третья стадия – выживание нагретого составного ядра по отношению к делению с испусканием нейтронов, протонов, альфа-частиц или гамма-квантов.

Метод вычисления сечения образования ядра-остатка построен согласно этому трёх-стадийному механизму. Сечение вычисляется как сумма парциальных вкладов, соответствующих фиксированному орбитальному моменту относительного движения. Парциальное сечение захвата вычисляется в рамках динамического подхода. Число парциальных волн, приводящих к захвату с образованием ДЯС, определяется решением уравнений движения для относительного расстояния между центрами ядер и орбитального углового момента. Эти уравнения выведены из полного гамильтониана, описанного в главе 1. Коэффициенты трения и потенциал ядро-ядерного взаимодействия вычисляются согласно методике, приведенной в главе 2. Каждое парциальное сечение является произведением трех величин, соответствующих трем стадиям: сечения захвата, фактора P_{CN} , учитывающего конкуренцию полного слияния с квазиделением и фактора выживания W_{sur} .

Сравнение результатов расчета для реакций $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ и $^{74,76}\text{Ge} + ^{208}\text{Pb}$, которые могут быть использованы для синтеза сверхтяжелого элемента $Z=114$, показывает, что максимум и ширина функции возбуждения захвата для $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ реакций, выше и шире чем в реакции $^{74,76}\text{Ge} + ^{208}\text{Pb}$. Это связано с тем, что потенциальная яма в ядро-ядерном взаимодействии для $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ реакции является более глубокой и широкой. Важность ширины функции возбуждения для захвата проявляется на стадии слияния. Необходимым условием для слияния является преодоление ДЯС внутреннего барьера слияния $V_{fus}^*(l; Z_1, A_1)$. Этот барьер определяется разностью между максимумом

управляющего потенциала в области больших значений массовой асимметрии и значением, соответствующим зарядовой асимметрии входного канала. Слияние становится невозможным при условии $E_{DNS}^* < B_{fus}^*$ для ДЯС, образованной при захвате, и она уйдет в канал квазиделения если $E_{DNS}^* > B_{qf}$, где $E_{DNS}^* = E_{c.m.} - V_{min}(l; Z_1, A_1)$, энергия возбуждения ДЯС; V_{min} – значение минимума ядро-ядерного потенциала взаимодействия для входного канала; B_{qf} – барьер квазиделения. При $E_{DNS}^* < B_{qf}$ может наблюдаться ядерная система в сильно деформированном состоянии. В реакциях с массивными ядрами B_{fus}^* может быть больше, чем максимальное значение энергии возбуждения ДЯС. Расчеты показали, что для $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ реакции, значение E_{DNS}^* изменяется от 19 МэВ до 41 МэВ, и эта энергия достаточна для преодоления барьера слияния $B_{fus}^* = 7$ МэВ. В случае $^{74,76}\text{Ge} + ^{208}\text{Pb}$ реакции, E_{DNS}^* лежит в интервале от 6 МэВ до 16 МэВ, тогда как барьер слияния $B_{fus}^* = 31$ МэВ, что исключает возможность слияния. Согласно предложенному методу, реакция $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ имеет явное преимущество для синтеза нового элемента $Z=114$, что и реализовано в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ в 1999 году. Расчет был выполнен в 1998 году [13].

Глава V посвящена исследованию роли входного канала при формировании составного ядра и остатков испарения, выживших в конкуренции с делением. Предложен метод расчета полного слияния, который учитывает конкуренцию между слиянием и квазиделением. Метод расчета усовершенствован благодаря учёту поверхностных колебаний, что позволило поднять верхний предел энергии пучка для захвата ядер. Динамика захвата ядер описывается классическими уравнениями для расстояния между центрами ядер, R , и орбитального углового момента, подобным тем, которые описаны в главе IV. Показана важность учета флуктуаций формы сферических ядер, связанных с поверхностными 2^+ - и 3^- - колебаниями. Объем перекрытия плотностей изменяется не сильно из-за большого значения параметра инерции

относительно деформации. Длинный путь ДЯС к слиянию определяется поверхностью потенциальной энергии $U(A, Z; R, I)$, представленной как функция от R и A_1 (или η). Полная потенциальная энергия вычисляется как сумма реалистических энергий связи ядер, образующих ДЯС, и потенциала взаимодействия между ними. Конкуренция между слиянием и квазиделением оценена по статистической модели. Правомерность использования статистического метода подтверждается тем, что термодинамическое равновесие в ДЯС устанавливается быстрее ($\tau_{\text{терм}} \sim 10^{-21}$ сек), чем происходит квазиделение ($\tau_{\text{кваз.дел.}} \sim 5 \cdot 10^{-21}$ сек). Фактор $P_{\text{CN}}(E_{\text{с.м.}}, l; Z_1, A_1)$, учитывающий конкуренцию между слиянием и квазиделением, определяется по статистической модели как отношение плотностей уровней над барьером в пути слияния к сумме плотностей уровней над B_{fus}^* и барьером квазиделения B_{qf}^* . $P_{\text{CN}}(E_{\text{с.м.}}, l; Z_1, A_1) = \rho(E_{\text{DNS}}^* - B_{\text{fus}}^*) / (\rho(E_{\text{DNS}}^* - B_{\text{fus}}^*) + \rho(E_{\text{DNS}}^* - B_{\text{qf}}^*))$. Таким образом, конкуренция между слиянием и квазиделением определяется соотношением между барьерами B_{fus}^* и B_{qf}^* . Последняя, третья стадия процесса – выживание образованного нагретого ядра относительно деления. Вычисление вероятности выживания в рамках современной статистической модели позволяет учитывать динамический аспект конкуренции процессов испарения-деления в сложной ядерной эволюции вдоль каскада охлаждения. В модели, при вычислении барьера деления, эмиссии нейтронов, протонов, альфа-частицы и гамма-каскада в конкуренции с делением, учитываются зависимости от углового момента и четности. В расчетах учтены зависимости оболочечной поправки к барьеру деления от температуры, задержка деления из-за диссипации при спуске от седловой точки. Плотности уровней вычислены в неадиабатическом методе, учитывающем ротационное и вибрационное усиления. Барьер деления вычисляется в рамках модели вращающейся капли с параметризацией Сьерка.

Роль входного канала в механизме образования продуктов реакций слияния-деления исследована в анализе экспериментальных данных, полученных в ГСИ (Дармштадт, ФРГ) и ЛЯР им. Флерова ОИЯИ (Дубна, Россия) для реакций, ведущих к одному и тому же возбужденному составному ядру ^{216}Th ($^{40}\text{Ar} + ^{176}\text{Hf}$, $^{86}\text{Kr} + ^{130}\text{Xe}$, $^{124}\text{Sn} + ^{92}\text{Zr}$) и ^{222}Th ($^{86}\text{Kr} + ^{136}\text{Xe}$ и $^{48}\text{Ca} + ^{174}\text{Yb}$). До сих пор не был объяснен факт о том, что максимальное значение сечения образования ядра-остатка в реакции $^{124}\text{Sn} + ^{92}\text{Zr}$ в четыре раза больше, чем в реакции $^{86}\text{Kr} + ^{130}\text{Xe}$ при том же значении энергии возбуждения E^* . Первая реакция является более симметричной ($|\eta_A| = |A_1 - A_2| / (A_1 + A_2) = 0.148$), чем вторая реакция ($|\eta_A| = 0.204$). Этот экспериментальный эффект интерпретирован с помощью анализа движущего потенциала для возбужденного составного ядра $^{216}\text{Th}^*$, образуемого в $^{86}\text{Kr} + ^{130}\text{Xe}$ и $^{124}\text{Sn} + ^{92}\text{Zr}$ реакциях. Если энергии связи составного ядра и ядер, составляющих ДЯС, определяются реалистическими значениями из таблиц, то значение внутреннего барьера слияния B_{fus}^* для $^{124}\text{Sn} + ^{92}\text{Zr}$ реакции меньше на 3.5 МэВ, чем барьер для $^{86}\text{Kr} + ^{130}\text{Xe}$ реакции. Это связано с оболочечными эффектами, включенными в движущий потенциал. Теоретические значения сечения слияния для $^{124}\text{Sn} + ^{92}\text{Zr}$ реакции примерно на порядок больше, чем соответствующие значения сечения для $^{86}\text{Kr} + ^{130}\text{Xe}$ реакции. При вычислении энергии связи ядер по модели жидкой капли нельзя объяснить разницу между экспериментальными данными об образовании $^{216}\text{Th}^*$ в $^{86}\text{Kr} + ^{130}\text{Xe}$ и $^{124}\text{Sn} + ^{92}\text{Zr}$ реакциях с помощью особенностей управляющего потенциала и внутреннего барьера слияния. Роль входного канала при синтезе массивного элемента в реакциях с тяжелыми ионами существенна и проявляется, в основном, через особенности оболочечной структуры сталкивающихся ядер. Для изучения влияния различия в массовых числах налетающего иона на образование остатков испарения возбужденного ядра тория рассматривались две реакции столкновения пучка ^{86}Kr с мишенями из двух изотопов ксенона, ^{130}Xe и ^{136}Xe .

Сравнение экспериментальных результатов показало, что сечение образования остатков испарения в реакции $^{86}\text{Kr} + ^{136}\text{Xe}$ в 500 раз превышает значение, полученное в реакции $^{86}\text{Kr} + ^{130}\text{Xe}$. Это объясняется, в основном, сильным увеличением выживаемости по отношению к делению составного ядра, образованного в реакции $^{86}\text{Kr} + ^{136}\text{Xe}$. Разница в сечениях слияния, вычисленных в рамках предложенного в диссертации метода, была не столь сильна. Хотя теоретические значения сечения слияния для реакции $^{86}\text{Kr} + ^{136}\text{Xe}$ больше, чем аналогичная величина для реакции $^{86}\text{Kr} + ^{130}\text{Xe}$.

В главе VI анализируется проблема синтеза сверхтяжелых элементов в рамках модели, разработанной на базе концепции ДЯС. Основное внимание уделено изучению конкуренции между квазиделением и полным слиянием. Исследована роль входного канала и влияния особенностей оболочечной структуры ядер на сечение образования ядер отдачи. Воспроизведены экспериментальные данные для синтеза элементов $Z=104, 108, 110, 111$ и 112 в реакциях холодного слияния с налетающими ионами ^{52}Ti , ^{58}Fe , ^{64}Ni и ^{70}Zn и мишенями ^{208}Pb и ^{209}Bi . Параметры плотности распределения нуклонов были фиксированы при описании экспериментальных данных, полученных в реакции $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb}$. Результаты вычислений для оценки функций возбуждения с образованием остатков испарения в остальных реакциях находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Надо подчеркнуть, что результат второго эксперимента для вероятности синтеза элемента $^{278}112$ в реакции $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb}$ при энергии пучка 3 МэВ выше, чем в первом эксперименте, совпал с теоретическим предсказанием. Представлены предсказания для синтеза СТЭ $^{279}113$ и $^{284}114$ в реакциях $^{70}\text{Zn} + ^{209}\text{Bi}$ и $^{76}\text{Ge} + ^{208}\text{Pb}$, соответственно. Для анализа механизма образования остатков испарения приведены функции захвата и слияния для всех реакций. Сечение захвата определяется глубиной и шириной потенциальной ямы ядро-ядерного взаимодействия, которые зависят от

формы и ориентации ядер, значением орбитального углового момента и величиной силы трения. Сечение слияния достаточно мало по сравнению с сечением захвата в связи с доминирующим вкладом квазиделения, при котором ДЯС распадается еще до образования составного ядра, т.е. равновесное составное ядро не успеет образоваться. С ростом заряда налетающего иона кулоновское отталкивание растет, при этом ядерное притяжение мало меняется, так как оно определяется объемом контактной области. В результате барьер квазиделения, удерживающий систему от развала, уменьшается. В то же время, увеличивается внутренний барьер слияния B_{fus}^* , который препятствует образованию составного ядра. Последнее обстоятельство связано с углублением поверхности потенциальной энергии с уменьшением массовой асимметрии для более массивных ядер. Следует отметить, что рельеф поверхности потенциальной энергии отражает особенности оболочечной структуры ДЯС, которая может сильно меняться в зависимости от того, какие ядра ее составляют. Анализ показал, что значение отношения B_{gr}^*/B_{fus}^* , вычисленное для реакции $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb}$ равно 0.53, тогда как оно равно 0.07 для реакции $^{86}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$. При этом фактор P_{CN} , учитывающий конкуренцию между слиянием и квазиделением, уменьшится от 0.03 до 10^{-7} . Это означает, что вероятность образования самого составного ядра ничтожно мала.

Максимальная величина возможной энергии возбуждения E_{max}^* определяется наибольшим значением энергии пучка $E_{max}^* = E_{с.ц.}^{max} - V_{яма}$, при котором еще происходит захват ядер и образуется ДЯС. Если энергия пучка превышает $E_{с.ц.}^{max}$, силы трения окажутся недостаточными и размер потенциальной ямы малым, чтобы система после точки поворота, потеряв часть относительной кинетической энергии, оказалась в потенциальной яме. Тогда происходит глубоконеупругое столкновение налетающего иона с ядром мишени.

Расчеты показали, что в случае реакции $^{86}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$, максимальная энергия ДЯС, E_{max}^* , и внутренний барьер слияния, B_{fus}^* , приблизительно равны. При дальнейшем увеличении энергии пучка для уверенного преодоления системой внутреннего барьера B_{fus}^* захват становится невозможным из-за малости «кармана» в ядро-ядерном потенциале. Поэтому можно предположить, что помимо колоссального вклада квазиделения в сечение реакции, динамика входного канала была причиной негативного результата экспериментов проведенных в Лаборатории Лоуренса в Беркли (США), ГСИ (Дармштадт, ФРГ), ГАНИЛе (Каэн, Франция) и РИКЕНе (Токио, Япония). В таких случаях, чтобы получить тот же сверхтяжелый элемент, необходимо подобрать более асимметричную пару ядер снаряд-мишень, создающую благоприятные условия во входном канале. Из наших предварительных оценок следует, что для синтеза элемента $Z=114$ исключительно благоприятным было использование пучка нейтронно-избыточного изотопа кальция ^{48}Ca в реакции на мишенях из $^{242,244}\text{Pu}$. В экспериментах, проведенных в ЛЯР им. Флерова (Дубна, Россия), впервые в мире были наблюдаены события испускания цепочки альфа-частиц и продуктов последующего деления, подтверждающие синтез сверхтяжелого элемента $Z=114$.

В заключении суммированы основные результаты диссертации.

1. Разработана полумикроскопическая модель ядро-ядерных столкновений при энергиях около кулоновского барьера. Модель основана на концепции ДЯС, учитывающей сохранение оболочечной структуры взаимодействующих ядер в процессе ядерных превращений. Достоинством метода является учёт связи между макроскопическими и микроскопическими степенями свободы, затрагиваемых при столкновении тяжелых ионов.

2. Расчеты показывают, что перераспределение энергии возбуждения происходит в течение целого времени взаимодействия, не только на начальном этапе. Нуклонный обмен, в особенности, обмен нейтронами

между сталкивающимися ядрами, является основным механизмом диссипации кинетической энергии относительного движения в начальной стадии столкновения. Для тяжелых ядерных систем частично-дырочное возбуждение в ядрах становится таким же важным как обмен нуклонами.

3. Влияние оболочечной структуры взаимодействующих ядер на процесс передачи нуклонов и распределение энергии возбуждения наблюдается в менее возбужденности массивных фрагментов по сравнению легкими фрагментами в бинарных реакциях. Этим впервые объяснена причина неравновесного распределения энергии возбуждения между фрагментами реакции. Но с ростом энергии возбуждения роль оболочечной структуры уменьшается, и распределение энергии стремится к равновесному.

4. Зарядовое распределение продуктов реакции хорошо согласуется с экспериментальными данными для ряда реакций. Однозначно установлено, что характеристики продуктов бинарных реакций с тяжелыми ионами зависят от отношения числа нейтронов и протонов и оболочечной структуры, а именно, энергии отрыва нуклонов и плотности уровней вблизи поверхности Ферми.

5. Разработан динамический метод вычисления глубоконеупругих столкновений и сечения захвата ядер, ведущего к образованию ДЯС. Преимуществом метода является последовательное рассмотрение относительного движения ядер и их внутреннего возбуждения. Коэффициенты радиального и тангенциального трения, а также изменение приведенной массы и ядро-ядерного потенциала определяются внутренним состоянием ядер и ориентацией осей аксиальной симметрии ядер. Продемонстрировано, что диссипация кинетической энергии в глубоко неупругих столкновениях тяжелых ионов является постепенным процессом. В результате этого ядра не могут образовать ДЯС при энергиях, значительно превышающих кулоновский барьер при малых орбитальных угловых моментах столкновения.

6. Предложен теоретический метод для описания функции возбуждения захвата и слияния ядер при столкновениях тяжелых ионов. Показано, что в случае слияния массивных ядер или ядер симметричной промежуточной массы существует сильная конкуренция между полным слиянием ядер и квазиделением. Определены новые события квазиделения, аналогичные ранее установленному быстрому делению, но происходящие при небольших орбитальных моментах столкновения. Введены определения внутреннего барьера слияния и барьера квазиделения, что позволяет легко квалифицировать быстротекущие процессы, предшествующие образованию аналогичных продуктов реакции.

7. Анализ экспериментальных данных о реакциях с разными массовыми асимметриями, ведущих к одному и тому же составному ядру в рамках разработанного метода показал, что сечение слияния и образования остатков испарения сильно связано с массовой асимметрией (макроскопический эффект) и оболочечной структурой ядер (микроскопический эффект). Тем самым впервые объяснена причина необычного результата: измеренная максимальная величина сечения остатка испарения в реакции $^{124}\text{Sn} + ^{92}\text{Zr}$ была четыре раза больше чем в случае реакции $^{86}\text{Kr} + ^{130}\text{Xe}$ при одной и той же энергии возбуждения.

8. Функции возбуждения слияния, рассчитанные по разработанному методу, были использованы как входные данные при вычислении функции возбуждения для образования остатков испарения в рамках улучшенной статистической модели. Полученные результаты для каскада де-возбуждения с испусканием нейтронов находятся в хорошем согласии с данными экспериментов в GSI (Дармштадт, Германия) по синтезу сверхтяжелых элементов $Z=104, 106, 108, 110, 111, 112$. Было установлено, что резкое уменьшение максимального значения измеренных функций возбуждения объясняется увеличением роли

квазиделения. Получены оценочные сечения для синтеза $Z=112$ в реакции $^{70}\text{Zn} + ^{209}\text{Bi}$. Неудача в синтезе $Z=118$ в $^{86}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$ реакции (Беркли, США) предсказана и объяснена.

В приложениях приведены методы вычисления времени жизни возбужденных одночастичных состояний, потенциала ядро-ядерного взаимодействия, коэффициента трения относительного движения ядер.

Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в работах:

1. Адамян Г.Г., Джолос Р.В., Насиров А.К., «Влияние частично-дырочных возбуждений и многонуклонных передач на потенциал взаимодействия ядер». Известия Российской Академии наук, серия физическая, 56 (1992), Nu.11, с.166-178.
2. Volkov V.V., Antonenko N.A., Cherepanov E.A., Nasirov A.K., Permjakov V.P. «Competition between complete fusion and quasifission in reaction between massive nuclei. Fusion barrier», Physics Letters, B319 (1993), с.425-430;
3. Антоненко Н.В., Волков В.В., Насиров А.К., Пермяков В.П., Черепанов Е.А., «Процесс формирования составного ядра в свете анализа полного слияния массивных ядер. Барьер слияния», Известия Академии наук СССР, серия физическая, 57, N.7 (1993) с.164-176.
4. Adamian G.G., Jolos R.V., Nasirov A.K., «Partition of excitation energy between reaction products in heavy ion of collisions», Zeitschrift fur Physik A347, (1994), p.206-210.
5. N.V.Antonenko, E.A.Cherepanov, A.K.Nasirov, V.P.Permjakov and V.V.Volkov, «Compound nucleus formation in reactions between massive nuclei. Fusion barrier», Physical Review C 51, (1995) p.2635-2645.
6. E. A. Cherepanov, V. V. Volkov, N. V. Antonenko, V. P. Permjakov and A. K. Nasirov, «Model of competition between complete fusion and quasi-fission in reactions with massive nuclei», Nucl. Phys. A, 583, (1995), 165c-168c,
7. G.G. Adamian, R.V. Jolos, A.I. Muminov, and A.K. Nasirov, «Effect of shell structure and the N/Z- ratio of a projectile on the excitation energy

distribution between interacting nuclei", Phys. Rev. C53 (1996) p.871; Preprint JINR, E4-204-95, Dubna, 1995.

8. Адамян Г.Г., Джолос Р.В., Муминов А.И., Насиров А.К., «Влияние N/Z-отношения в налетающем ядре на распределение энергии возбуждения продуктов реакций глубоконеупругих столкновений тяжелых ионов». Ядерная физика, 59, No.1, (1996) с.89-98.

9. G.G. Adamian, R.V. Jolos, A.I. Muminov and A.K. Nasirov, "Friction coefficient for deep-inelastic heavy-ion collisions", Phys. Rev. C56 No.2, (1997) p.373-380

10. Адамян Г.Г., Джолос Р.В., Муминов А.И., Насиров А.К., "Динамика глубоконеупругих столкновений тяжелых ионов. Самосогласованный расчет кинетических коэффициентов", Известия РАН, сер. физ. Т61, N1, (1997) p.191-196.

11. R.V. Jolos, A.K. Nasirov and A. I. Muminov, "Dynamic approach to fusion of massive nuclei", Paper: nucl-th/9709037, <http://xxx.lanl.gov/abs/nucl-th/9709037>. Preprint JINR, E4-97-302, Dubna, 1997.

12. G. Giardina, F. Hanappe, A.I. Muminov, A.K. Nasirov, "Competition between quasifission and fusion after capture in heavy-ion collisions", Preprint JINR, E4-98-279, Dubna, 1998.

13. R. V. Jolos, A. K. Nasirov and A. I. Muminov, "The role of the entrance channel in the fusion of massive nuclei", Eur. Phys. Jour. A4, (1999) p.245 - 250

14. Дж.Джиардина, А.И. Муминов, А.К. Насиров, Ф. Ханappe, "Конкуренция между квазиделением и слиянием в ядро-ядерных столкновениях", Известия РАН, сер. физическая, Том. 63, N5, 1999, стр. 935-943.

15. G. Giardina, P. D'Agostino, G. Fazio, M. Hermann, A.I. Muminov, A.K. Nasirov, G. Oliva, R. Palamara, R. Ruggeri, "Fusion-fission dynamics in the superheavy nucleus production", Pramaha- Indian Journal of Physics (Indian Academy of Science) Vol.23, No.11, (1999) p.1.

16. R.V. Jolos, A.K. Nasirov, G.G. Adamian, and A.I. Muminov, "Effect of shell structure on energy dissipation in heavy-ion collisions", Eur. Phys. Jour. A7, 2000, p.115-224.

17. G. Giardina, F. Hanappe, A.I. Muminov, A.K. Nasirov, L. Stuttgé, "Capture and fusion dynamics in heavy-ion collisions", Nuclear Physics A671 (2000) p.165-188.

18. Дж. Джиардина, П. Д'Агостино, Дж. Фацио, Дж. Олива, Р.Руджери, А.Такконе, А.И. Муминов, А.К. Насиров, М. Херман, Р. Паламара, "Образование испарительных остатков в синтезе сверхтяжелых элементов", Известия РАН, сер. физическая, Том. 64, N5, 2000, стр. 462.

19. G. Giardina, S. Hofmann, A.I. Muminov, and A.K. Nasirov, "Effect of the Entrance Channel on the Synthesis of Superheavy Elements", Eur. Phys. Jour, A8, 2000, p.205-216.

20. G. Fazio, G. Giardina, A. Lamberto, R. Ruggeri, C. Sacca, R. Palamara, A.I. Muminov, A.K. Nasirov, U. T. Yakhshiev, F. Hanappe, T. Materna, L. Stuttgé, "Entrance channel effect on the formation of heavy and superheavy nuclei", Journal of Physics Society of Japan, Vol.72, No.10, 2003, p.2509-2522

РЕЗЮМЕ

Диссертации Насирова Авазбека Каримовича на тему

«Полумикроскопический метод для описания реакций многонуклонных передач и слияния-деления в столкновениях тяжелых ионов»

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика элементарных частиц и атомного ядра

Ключевые слова: столкновение тяжелых ионов; диссипация энергии; реакции много-нуклонных передач; захват и слияние ядер; квазиделение двойной ядерной системы; коэффициент трения; орбитальный угловой момент; синтез сверхтяжелых элементов; числа заполнения одночастичных состояний.

Объект исследования: диссипация энергии столкновения и распределения энергии возбуждения между продуктами реакции при столкновении тяжелых ионов; механизм слияния ядер и проблемы синтеза сверхтяжелых ионов.

Цель исследования: разработка микроскопического и макроскопического методов расчета характеристик продуктов ядерных реакций многонуклонных передач, слияния и квазиделения; анализ, интерпретация и предсказание результатов экспериментов синтеза сверхтяжелых элементов.

Метод исследования: квантово-механические методы для изучения многочастичной системы; решение кинетических уравнений для ее микроскопических степеней свободы и вычисление кинетических коэффициентов для уравнений ее макроскопических переменных.

Полученные результаты и их новизна: впервые разработан микроскопический метод описания нуклонного обмена и распределения энергии возбуждения между продуктами реакций многонуклонных передач, а также на основе концепции двойной ядерной системы впервые разработан полумикроскопический метод расчета сечения захвата и слияния ядер в столкновениях тяжелых ионов. Методы успешно применяются для анализа экспериментов.

Практическая значимость: определение оптимальных экспериментальных условий для синтеза новых сверхтяжелых элементов или изотопов с определенными свойствами на ядерно-физических установках.

Степень внедрения и экономическая эффективность: метод применяется коллегами соискателя в Отделе физики тяжелых ионов при Институте ядерной физики АН РУз, в Мессинском университете (Италия) и в Брюссельском университете (Бельгия) для оценки возможности использования ряда реакций при синтезе сверхтяжелых элементов в сложных экспериментах в Лаборатории ядерных реакций им. Флерова ОИЯИ (Дубна, Россия) и в Обществе тяжело-ионных исследований (Дармштадт, ФРГ).

Область применения: прикладная ядерная физика и синтез сверхтяжелых элементов.

Физика – математика фанлари доктори | илмий даражасига талабгор

Насиров Авазбек Каримович 01.04.16 – элементар зарралар ва атом ядроси физикаси ихтисослиги бўйича

«Оғир ионлар тўқнашувидаги кўп нуклонли ўтишлар ва қўшилиш – бўлиниш реакцияларини талқин қилишнинг ярим – микроскопик усули»

мавзусидаги диссертациясининг

ҚИСҚАЧА МАЗМУНИ

Калитли сўзлар: оғир ионлар тўқнашуви; энергия сочилиши; кўп нуклонли узатишлар; ядроларнинг ушланиши ва қўшилиши; қўшалок ядро системасининг бўлиниши; ишқаланиш коэффициенти; орбитал бурчак моменти; ўта оғир элементларнинг олиниши; бир зарравий ҳолатларнинг тўлдириш сонлари.

Тадқиқот объектлари: оғир ионлар тўқнашувида энергия сочилиши ва қўзғалиш энергиясининг реакция маҳсулотлари орасида тақсимланиши; ядроларнинг қўшилиш механизми ва ўта оғир элементларни олиш муаммолари.

Ишнинг мақсади: оғир ионлар билан бўладиган кўп нуклонли узатишлар, ядролар қўшилиш ва қўшалок ядро системасининг бўлиниш жараёнларини талқин қилиш учун микроскопик ва макроскопик усул яратиш; ўта оғир элементларни олишдаги эксперимент натижаларини ўрганиш, таҳлил қилиш ва олдиндан айтиб бериш.

Тадқиқот методи: кўп заррали системаларни ўрганиш учун қўлланиладиган квант механикаси методлари; система микроскопик хоссалари билан боғлиқ ўзгарувчилар учун кинетик тенгламаларни ечиш ва унинг макроскопик хоссаларини ўрганиш учун зарур бўлган кинетик коэффицентларни ҳисоблаш.

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги: биринчи марта оғир ионлар тўқнашувида энергиянинг сочилиши ва қўзғалиш энергиясининг реакция маҳсулотлари орасида тақсимланишини анализ қилиш учун микроскопик усул яратилди; биринчи марта вазмин ядролар қўшилиш ва қўшалок ядро системасининг бўлиниш жараёнларини талқин қилиш учун қўшалок ядролар системаси ғояси асосида ярим микроскопик ҳисоблаш усули

яратилди ва эксперимент натижаларини анализ қилишда қўлланилмоқда.

Амалий аҳамияти: ядровий қурилмаларда ўта оғир элементларни ёки махсус хоссали изотопларни олиш экспериментларининг муваффақиятли ўтишини таъминловчи шароитни баҳолаш ва тавсия қилиш. Эксперимент натижаларини ўрганиш, таҳлил қилиш ва олдиндан айтиб бериш.

Тадбиқ этиш даражаси ва иқтисодий самарадорлиги: яратилган усуллар талабгорнинг Ядро физикаси институти, Мессина университети (Италия) ва Брюссель университетидаги ҳамкасабалари томонидан ўта оғир элементларни олишда Флеров номли Ядровий жараёнлар лабораторияси (Дубна, Россия) ва Оғир ионларни тадқиқот қилиш жамоасида (Дармштадт, ФРГ) бажарилаётган экспериментлар натижаларини таҳлил қилишда қўлланилмоқда.

Қўлланиш соҳаси: амалий ядро физикаси ва ўта оғир элементларни олиш тадқиқотлари.

RESUME

Thesis of Avazbek Nasirov

on the academic degree competition of the doctor of physical-mathematical sciences, speciality 01.04.16 - physics of the elementary particles and atomic nucleus subject:

"Semi-microscopic method for multi-nucleon transfer and fusion-fission reactions in heavy ion collisions "

Key words: heavy ion collisions; energy dissipation; multi-nucleon transfer reactions; capture and fusion of nuclei; quasifission of dinuclear system; friction coefficient; orbital angular momentum; synthesis of superheavy elements; occupation numbers of single-particle states;

Subjects of the inquiry: dissipation of collision energy and share of excitation energy between reaction products at heavy ion collisions; the mechanism of the fusion reactions and problems of the syntheses of superheavy elements.

Aim of the inquiry: development of the microscopic and macroscopic methods to study the characteristic of products heavy ion: analysis of fusion and quasifission reactions; description, interpretation and prediction of experimental data on the synthesis of superheavy elements.

Method of the inquiry: quantum-mechanical methods to study heavy ion collisions; the solution of the kinetic equations for the microscopic degrees of freedom and calculation of kinetic coefficients of equations for macroscopic variables.

The results achieved and their novelty: for the first time on base of the concepts of the double nucleus system microscopic method has been designed for the description of nucleon exchange and share of the excitation energy between the products of the multinucleon transfer reactions, as well as for the first time the semimicroscopic method of calculation of capture and fusion cross sections in heavy ion collisions has been created. Methods are used successfully to analyse data.

Practical value: determination of the optimum experimental conditions for synthesis of new superheavy elements or isotopes with determined characteristic on nucleus-physical installation.

Degree of embed and economical effectivity: method is used by colleague of the competitor in Department of heavy ion physics at the Institute of nucleus physics of Academy of science of Uzbekistan, in the Messina university (Italy) and in the Brussels university (Belgium) for estimation of the possibility of the use the given reactions at synthesis of superheavy elements in arduous experiments in the Flerov Laboratory of nuclear reaction of JINR (Dubna, Russia) and in the Society of heavy-ion studies (Darmstadt, FRG).

Sphere of usage: applied nuclear physics and experiments for synthesis of superheavy elements.

A. Nasirov / *Насиров А.К.*