

На правах рукописи

ЛИТНЕВСКИЙ  
Владимир Леонидович

ОПИСАНИЕ РЕАКЦИЙ СЛИЯНИЯ-ДЕЛЕНИЯ  
В РАМКАХ МНОГОМЕРНОГО  
СТОХАСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА, УЧИТЫВАЮЩЕГО  
ЯДЕРНУЮ ОБОЛОЧЕЧНУЮ СТРУКТУРУ

Специальность: 01.04.16 – физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна — 2012

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики  
им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук,

г.н.с. ЛТФ ОИЯИ

Виталий Владимирович Пашкевич

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук,

в.н.с. НИИЯФ МГУ

Дмитрий Олегович Еременко

доктор физико-математических наук,

г.н.с. ЛТФ ОИЯИ

Валерий Константинович Лукьянов

**Ведущая организация:**

ФГУП «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского»

г. Обнинск Калужской области.

Защита состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2012 г. в \_\_\_ ч. \_\_\_ мин. на заседании диссертационного совета Д 720.001.01 в Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, 141980, г. Дубна, Московская область, ул. Жолио–Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛТФ ОИЯИ.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико–математических наук

А.Б. Арбузов

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы.

Реакции с участием тяжелых ионов — единственный способ синтеза сверхтяжелых ядер, возможность существования которых обусловлена оболочечными эффектами. Эксперименты, направленные на продвижение вглубь острова стабильности сверхтяжелых элементов, дают большое количество данных: сечения касания и слияния исходных ядер, сечения образования остатков испарения, данные по множественности легких частиц и гамма-квантов, характеристики осколков деления и квазиделения образовавшихся после касания ионов систем и т. д. Чем больше массы исходных ионов, тем меньше сечения образования искомым элементов, тем больше длительность эксперимента. Снижение сечений образования остатков испарения делает актуальным создание теоретических моделей, способных объяснять существующие экспериментальные данные и предсказывать результаты планируемых экспериментов. Теоретическое предсказание сечений реакций способно облегчить выбор партнеров реакции и энергии их относительного движения, а также предсказать продолжительность эксперимента.

Многомерные стохастические модели (МСМ) позволяют рассчитать измеряемые характеристики процесса слияния-деления на всех стадиях, начиная с приближения налетающего иона к ядру “мишени” и заканчивая либо делением образовавшейся после их касания моносистемы, либо образованием остатка испарения. Для создания МСМ необходимо привлечение теоретических представлений о ядре, о внутриядерных процессах и о ядерном взаимодействии. Таким образом, сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами позволяет судить о соответствии привлекаемых теоретических представлений о ядре действительности.

Рассмотренные реакции не являются реакциями, приводящими к синтезу сверхтяжелых элементов. Однако их объяснение является важной задачей. Реакции  $^{16,18}\text{O} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{224,226}\text{Th}$  и  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{256}\text{No}$  являются реакциями холодного слияния, они широко освещены в экспериментальных и теоретических работах, что делает возможным сравнение результатов, полученных в рамках разработанной модели, не только с экспериментальными

данными, но и с результатами других теоретических исследований. Реакции с участием ядер  $^{100}\text{Mo}$  и  $^{110}\text{Pd}$  также являются объектом теоретического изучения. Интерес к ним не утихает на протяжении более чем двадцати лет.

**Целью данной работы** является усовершенствование МСМ, объединяющей все три стадии реакции слияния-деления (процессы сближения и слияния исходных ядер, а также эволюцию образовавшейся в ходе реакции системы), предназначенной для объяснения сечений касания и слияния исходных ядер, сечений образования остатков испарения и характеристик осколков деления синтезируемых ядер, которое позволит учитывать ядерную оболочечную структуру на всех стадиях расчета.

**В задачи работы входит:**

1. Усовершенствование МСМ, описывающей процесс приближения налетающего иона к ядру “мишени” (*первая стадия расчета*), учитывающей оболочечную структуру (ОС) и пространственную ориентацию сталкивающихся ядер.

2. Исследование влияния ОС и пространственной ориентации сталкивающихся ядер на характеристики системы в момент касания исходных ядер. Сравнение рассчитанных характеристик системы в точке касания с характеристиками, полученными в подходе, в котором потенциальная энергия каждого из сталкивающихся ядер рассчитывается в модели жидкой капли (МЖК), а оси симметрии ядер лежат на одной прямой (ядра ориентированы “нос в нос”).

3. Расчет эволюции моносистемы, образовавшейся после касания исходных ядер, используя в качестве входных данные, полученные в результате расчета процесса сближения ядер. Выяснение влияния характеристик системы в точке касания, полученных на первой стадии расчета, на эволюцию моносистемы. Проведение вычислительных экспериментов для оценки сечений слияния исходных ядер и сечений образования остатков испарения, а также исследования характеристик осколков деления ядер. Изучение влияния характеристик системы в точке касания на эволюцию моносистемы.

## Научная новизна:

1. Усовершенствована феноменологическая модель процесса слияния–деления, что позволило учесть ОС сталкивающихся ядер. Кроме того, усовершенствованная модель позволяет учесть отклонение осей симметрии взаимодействующих ядер от линии, соединяющей их центры масс.

2. Исследована динамика процесса приближения налетающего иона к ядру “мишени”, выявлены основные черты влияния характеристик системы в точке касания на эволюцию моносистемы.

3. Исследовано влияние ОС сталкивающихся ядер, их начальной пространственной ориентации и ее последующего изменения на процесс приближения налетающего иона к ядру “мишени” и на характеристики системы в точке касания.

4. Проведено моделирование реакций с участием вытянутых ( $^{100}\text{Mo}$  и  $^{110}\text{Pd}$ ) и сферических ( $^{16,18}\text{O}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  и  $^{208}\text{Pb}$ ) в основном состоянии ядер, полученные оценки сечений касания и слияния исходных ядер, сечений образования остатков испарения и характеристик осколков деления ядер (массовые и массово–энергетические распределения) хорошо согласуются с экспериментальными данными.

**Личный вклад.** Все основные результаты диссертации получены соискателем самостоятельно.

**Теоретическая и практическая значимость.** Рассмотренный подход к анализу процесса слияния–деления ядер может применяться для объяснения уже известных данных экспериментов по синтезу тяжелых и сверхтяжелых элементов и для планирования новых экспериментов. В рамках МСМ можно рассчитать сечения касания и слияния исходных ядер, сечения образования остатков испарения при средних, на 10-15 МэВ превышающих кулоновский барьер, и высоких энергиях реакций.

**Методы исследования.** При построении модели для задания зависимости потенциальной энергии ядер от их деформационных параметров использована модель жидкой капли с оболочечными поправками, рассчитанными по методу Струтинского. Для описания динамической эволюции параметров формы системы использованы стохастические методы, а для расчета

транспортных коэффициентов динамических уравнений (уравнений Ланжевена) использована модель линейного отклика и локальное гармоническое приближение.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, на международных конференциях “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy” (Киев, Украина, 2008 г., 2010 г.), “Ядерная и радиационная физика” (Алматы, Казахстан, 2011 г.), на “III Young Scientists Conference” (Киев, Украина, 2011 г.), на конференциях молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, 2010 г., 2011 г., 2012 г.).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 печатных изданиях, в том числе 4 изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Диссертация содержит 111 страниц текста с 35 рисунками. Список литературы включает 93 наименования.

## Содержание работы

**Во введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, дается краткий обзор по теме диссертации. В частности, приводятся общие положения исходной МСМ [1], описывающей процесс слияния-деления тяжелых ядер, улучшению которой посвящена диссертация. В этой модели предложен метод последовательного рассмотрения процессов сближения ядер, их слияния, и деления образовавшейся моносистемы. Переход между стадиями процесса слияния-деления осуществляется таким образом, чтобы основные характеристики системы (ее угловой момент и потенциальная и внутренняя энергии) сохранялись. Все три стадии процесса слияния-деления описываются динамически, причем две последние стадии (слияние ядер и деление образовавшейся моносистемы) объединяются в одну. Эта объединенная стадия трактуется как эволюция моносистемы от формы, имеющей нулевую шейку,

до основного состояния, а затем назад к формам, имеющим нулевую шейку, вплоть до деления. Конечно, возможны и другие сценарии поведения моносистемы. Например, деление может произойти еще по пути к основному состоянию. Либо, находясь в основном состоянии, система может сбросить всю избыточную энергию возбуждения и образовать остаток испарения.

**Первая глава** посвящена изложению используемых в работе модельных представлений о ядре и внутриядерных процессах. Эти сведения необходимы как для описания процесса сближения исходных ядер, так и для описания эволюции моносистемы. В п. 1.1 описана используемая параметризация формы ядра, основанная на овалоидах Кассини [2]. При моделировании процесса приближения налетающего иона к ядру “мишени” форма каждого из ядер параметризуется с помощью одного параметра деформации. При описании эволюции моносистемы ее форма задается тремя параметрами.

В исходной МСМ [1] деформационная зависимость потенциальной энергии каждого из сталкивающихся ядер задавалась в модели жидкой капли (МЖК), их инерционные и фрикционные тензоры рассчитывались макроскопически. В п. 1.2 приводятся основные положения МЖК, подробно описывается макроскопический метод расчета потенциальной энергии ядра, инерционного (метод Вернера–Уилера безвихревого течения ядерной жидкости) и фрикционного (“wall and window”–формула) тензоров.

Одно из проведенных нами усовершенствований модели слияния-деления касается учета ОС сталкивающихся ядер. П. 1.3 посвящен описанию микроскопического, учитывающего ОС, метода расчета потенциальной энергии ядра (метод оболочечных поправок Струтинского), инерционного и фрикционного тензоров (метод линейного отклика, локальное гармоническое приближение).

При описании эволюции моносистемы в настоящей МСМ, как и в исходной, потенциальная энергия ядра, его инерционный и фрикционный тензоры рассчитываются микроскопически.

В п. 1.4 приведены формулы, позволяющие рассчитать твердотельный момент инерции ядра, необходимый для задания его вращательной энергии. Пункт 1.5 посвящен изложению метода расчета ширин испарения легких ча-

стиц и гамма-квантов, который нужен для учета возможности девозбуждения моносистемы, образовавшейся после касания исходных ядер. Вероятность испарения той или иной частицы рассчитывается на каждом временном шаге описания динамической эволюции ядра, а далее методом “hit and miss” определяется вылетела частица или нет.

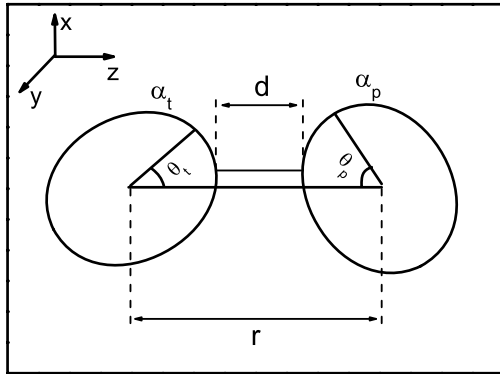


Рис. 1: Вид системы на первой стадии расчета. Форма системы описывается следующими параметрами: параметрами деформации ядра “мишени”  $\alpha_t$  и ядра “снаряда”  $\alpha_p$ ; углами  $\theta_t$  и  $\theta_p$ , описывающими отклонение осей симметрии ядер от линии, соединяющей их центры масс; величиной  $r$ , задающей расстояние между центрами масс ядер. Величина  $d$  характеризует расстояние между ближайшими точками поверхностей ядер. Оси симметрии ядер и линия, соединяющая их центры масс, лежат в плоскости  $XOZ$ .

**Вторая глава** посвящена моделированию процесса сближения ядер, расчету вероятности касания исходных ядер и характеристик системы, состоящей из двух коснувшихся ядер. Основная задача, решаемая во второй главе, заключается в усовершенствовании МСМ, позволяющем учитывать ОС и ориентацию сталкивающихся ядер. Под учетом ориентации понимается переход от предположения о том, что оси симметрии ядер лежат на одной прямой, как это было в исходной модели, к предположению, что они лежат в одной плоскости (см. п. 2.1).

Пункт 2.2 посвящен определению коллективных координат системы, состоящей из двух приближающихся друг к другу ядер (рис. 1), формулировке стохастических уравнений, необходимых для описания эволюции этих коллективных координат, и описанию коэффициентов (консервативная сила, инерционный и фрикционный тензоры), входящих в эти уравнения.



В качестве стохастических уравнений используются уравнения Ланжевена (УЛ) [3, 4]:

$$\begin{aligned} \dot{q}_\beta &= \mu_{\beta\nu} p_\nu, \\ \dot{p}_\beta &= -\frac{1}{2} p_\nu p_\eta \frac{\partial \mu_{\nu\eta}}{\partial q_\beta} + K_\beta - \gamma_{\beta\nu} \mu_{\nu\eta} p_\eta + \vartheta_{\beta\nu} \xi_\nu, \end{aligned} \quad (1)$$

$\beta, \eta, \nu = 1 \dots N.$

Здесь по повторяющимся индексам  $\nu$  и  $\eta$  подразумевается суммирование,  $q_\beta$  — параметры, описывающие форму системы,  $\gamma_{\beta\nu}$  — фрикционный тензор, описывающий диссипацию энергии в системе,  $\mu_{\beta\nu}$  — тензор, обратный тензору инерции  $m_{\beta\nu}$ ,  $N$  — число степеней свободы системы. Консервативная сила  $K_\beta = -\partial V^{\text{fus}}/\partial q_\beta$  определяется как частная производная потенциальной энергии системы по параметру формы.

Случайная сила  $\vartheta_{\beta\nu} \xi_\nu$  описывает флуктуации в системе. Случайная величина  $\xi_\nu$  обладает следующими статистическими свойствами:

$$\begin{aligned} \langle \xi_\nu \rangle &= 0, \\ \langle \xi_\beta(t_1) \xi_\nu(t_2) \rangle &= 2\delta_{\beta\nu} \delta(t_1 - t_2). \end{aligned} \quad (2)$$

Амплитуда случайной силы  $\vartheta_{\beta\nu}$  связана с диффузионным тензором:  $D_{\beta\nu} = \vartheta_{\beta\eta} \vartheta_{\eta\nu}$ , который, в свою очередь, удовлетворяет уравнению Эйнштейна  $D_{\beta\nu} = T\gamma_{\beta\nu}$ , где  $T$  — температура, определяемая из модели ферми-газа:  $T = \sqrt{aE_{\text{dis}}}$ ,  $a$  — параметр плотности уровней,  $E_{\text{dis}}$  — внутренняя энергия системы.

Потенциальная энергия системы, необходимая для определения консервативной силы, входящей в УЛ, состоит из энергий ядерного и кулоновского взаимодействий, действующих между ядрами, из энергии вращательного движения системы, а также из деформационных энергий каждого из ядер. При описании диссипации энергии в системе необходимо учитывать как диссипацию, обусловленную взаимодействием сталкивающихся ядер (она определяется в рамках модели поверхностного трения) так и диссипацию, обусловленную взаимодействием одночастичных и коллективных степеней свободы каждого из ядер в отдельности (см. первую главу). Инерционный тензор является диагональным, его  $rr$ -компонента представляет собой приведенную

массу, а остальные компоненты соответствуют инерции каждого из ядер по отношению к их деформации и вращению.

В п. 2.3 рассчитывается процесс сближения ядер и сравниваются результаты, полученные с использованием микро- и макроскопических ядерных деформационных энергий, тензоров инерции и фрикции. Выявлены два основных фактора влияния ОС сталкивающихся ядер на процесс расчета: изменение формы, соответствующей основному состоянию каждого из ядер, и изменение жесткости их деформационных энергий (рис. 2). Оба фактора влияют на высоту кулоновского барьера реакции и на значение потенциальной энергии системы в точке касания.

В п. 2.4 рассмотрен вопрос о влиянии ориентации сталкивающихся ядер на высоту кулоновского барьера реакции, на вероятность достижения ими точки касания и на характеристики системы в точке касания. Выяснено, что минимальные значения высоты кулоновского барьера и потенциальной энергии системы в точке касания соответствуют ориентации ядер, при которой их оси симметрии совпадают. Метод учета туннелирования ядер через кулоновский барьер обсуждается в п. 2.5. В п. 2.6 подводятся итоги второй главы.

**В третьей главе** анализируется эволюция моносистемы, образовавшейся после касания исходных ядер. Задачи, которые решаются в этой главе, перечислены в п. 3.1.

Пункт 3.2 посвящен изложению модели, используемой для описания эволюции моносистемы. Форма моносистемы, образовавшейся после касания двух сблизившихся на достаточное расстояние ядер, определяется тремя параметрами  $(\alpha_4, \alpha, \alpha_1)$ , соответствующими следующим коллективным степеням свободы: длине моносистемы, величине шейки и массовой асимметрии. Параметры, используемые для описания формы моносистемы, отличаются от тех, что использовались для описания системы, состоящей из двух ядер. Соответственно, необходим переход от одного набора параметров к другому. Начальная форма моносистемы, ее угловой момент, потенциальная и внутренняя энергии определяются методом “hit and miss” из распределений, полученных на первой стадии расчета (рис. 3) (см. пп. 3.2.1). Вид УЛ, описывающих эволюцию коллективных координат системы и сопряженных импульсов,

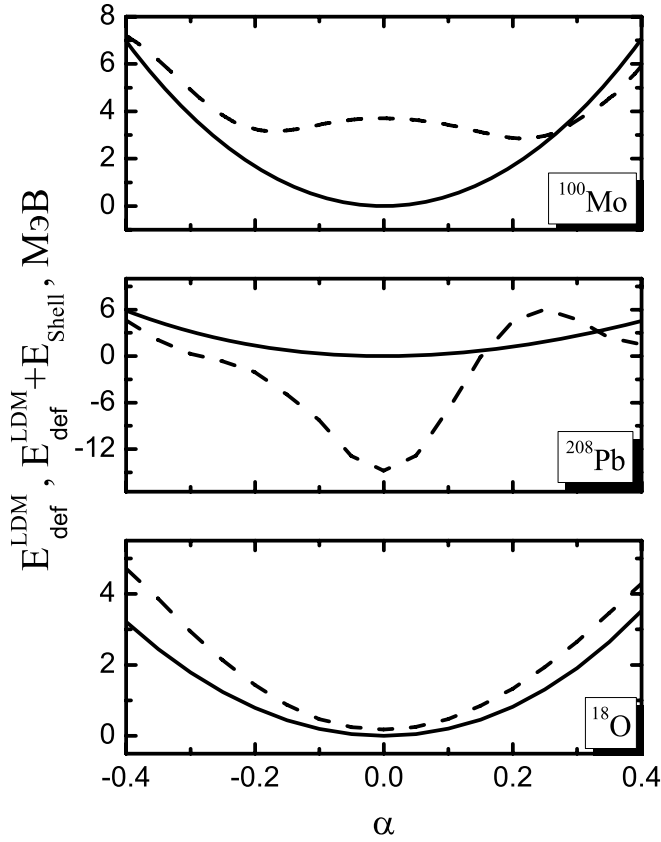


Рис. 2: Зависимость потенциальной энергии ядер  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  и  $^{18}\text{O}$  от деформации с учетом ( $E_{\text{def}}^{\text{LDM}} + E_{\text{shell}}$ ) (штриховая кривая) и без учета ( $E_{\text{def}}^{\text{LDM}}$ ) (сплошная кривая) оболочечных поправок. Учет ОС может приводить к изменению формы ядер в основном состоянии ( $^{100}\text{Mo}$ ) и к изменению жесткости потенциала ( $^{208}\text{Pb}$  и  $^{18}\text{O}$ ).

обсуждается в пп. 3.2.2. Интегрирование этих уравнений позволяет рассчитать сечения слияния исходных ядер, сечения образования остатков испарения, распределения осколков истинного деления (квазиделения) по массам и энергиям, данные о множественности испущенных легких частиц и гамма-квантов (метод получения всех этих величин и распределений обсуждается в пп. 3.2.2).

Пункт 3.3 посвящен моделированию эволюции моносистем, полученных в реакциях с участием вытянутых в основном состоянии ядер  $^{100}\text{Mo}$  и  $^{110}\text{Pd}$  ( $^{100}\text{Mo} + ^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{200}\text{Po}$ ,  $^{100}\text{Mo} + ^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{210}\text{Ra}$ ,  $^{110}\text{Pd} + ^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{220}\text{U}$ ). Представлены два варианта расчета. Первый использует в качестве входных данные, полученные в предположении о том, что оси симметрии сталкивающихся ядер лежат на одной прямой (пп. 3.3.2), второй — о том, что они лежат в одной плоскости (пп. 3.3.3). Сравнение полученных величин сечений образования остатков испарения  $\sigma_{\text{er}}$  между собой, с теоретическими оценками, полученными в модели конкуренции каналов полного слияния и квазиделе-

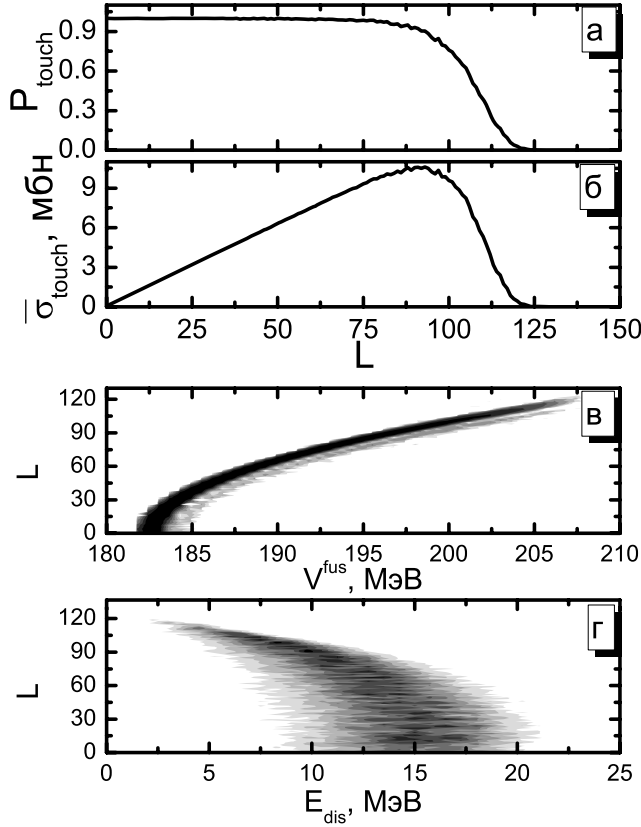


Рис. 3: Характеристики системы в точке касания в реакции  $^{100}\text{Mo} + ^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{200}\text{Po}$  ( $E_{\text{c.m.}} = 215$  МэВ): панели *a* и *б* — зависимости вероятности касания и частичного сечения касания от углового момента системы; панель *в* — распределение событий касания по потенциальной энергии системы и ее угловому моменту в точке касания; панель *г* — распределение событий касания по внутренней энергии и ее угловому моменту.

ния в симметричных ядерных реакциях [5], и с экспериментальными данными [6] (рис. 4*a*) позволяет сделать следующие выводы: 1. Используемая модель позволяет описывать реакции при средних, на 10-15 МэВ превышающих кулоновские барьеры в данных реакциях, и высоких энергиях; 2. Учет ориентации сталкивающихся ядер на порядок улучшает согласие рассчитанных значений  $\sigma_{\text{ст}}$  с экспериментальными данными при высоких энергиях реакций.

Пункт 3.4 посвящен моделированию реакций с участием магических ( $^{18}\text{O}$ ) и дважды магических ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  и  $^{208}\text{Pb}$ ) ядер ( $^{16,18}\text{O} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{224,226}\text{Th}$  и  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{256}\text{No}$ ). Экспериментальные данные по этим реакциям представлены в работах [7, 8, 9]. Нами показано, что в случае реакций с участием сферических в основном состоянии ядер, учет ОС сталкивающихся ядер, существенно улучшает согласие теоретических оценок сечений образования остатков испарения с экспериментальными данными. Введение же двух дополнительных степеней свободы, учитывающих ориентацию ядер в пространстве, никак не сказалось на результатах

расчета (рис. 4б). Сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными показывает, что разработанная модель применима для описания реакций при средних и высоких энергиях (рис. 4б и рис. 5). Такой же вывод был сделан и в случае реакций с участием деформированных в основном состоянии ядер. В п. 3.5 подводятся итоги главы.

**В Заключении** сформулированы результаты, выдвигаемые на защиту, подчеркивается важная роль ОС и ориентации ядер для адекватного моделирования процесса приближения налетающего иона к ядру “мишени”.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Предложен метод учета оболочечной структуры и ориентации сталкивающихся ядер в рамках многомерной стохастической модели. Модель описывает процесс слияния-деления в две стадии: приближение налетающего иона к ядру “мишени” и последующая эволюция моносистемы, образовавшейся после касания исходных ядер. Результаты, полученные на первой стадии, используются как входные данные для расчета эволюции моносистемы.

2. Проанализировано, как оболочечная структура сталкивающихся ядер влияет на характеристики системы в момент касания. Рассмотрены реакции с участием сферических и деформированных ядер и выявлены особенности влияния оболочечной структуры ядер разной формы на процесс их сближения.

3. Исследовано влияние начальной ориентации вытянутых ядер на процесс их сближения. Объяснено влияние начальной ориентации ядер на характеристики системы в точке касания.

4. Исследовано, как характеристики системы в точке касания влияют на эволюцию моносистемы. Результаты моделирования процесса слияния-деления, полученные с учетом ОС на протяжении всего расчета, с учетом и без учета возможности отклонения осей симметрии сталкивающихся ядер от линии, соединяющей их центры масс, сравниваются между собой и с экспериментальными данными. Показано, что более последовательное описание процесса столкновения в ряде случаев заметно улучшает согласие теоретических результатов с экспериментальными данными.

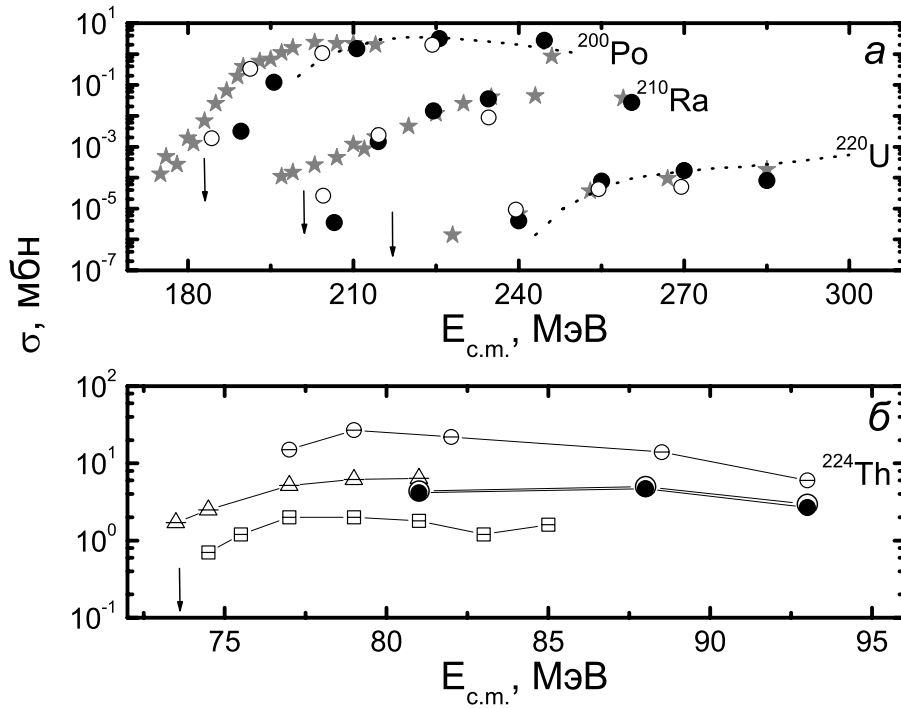


Рис. 4: Зависимость полных сечений образования остатков испарения в реакциях  $^{100}\text{Mo} + ^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{200}\text{Po}$ ,  $^{100}\text{Mo} + ^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{210}\text{Ra}$ ,  $^{110}\text{Pd} + ^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{220}\text{U}$  (а) и  $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{224}\text{Th}$  (б) от энергии реакции ( $E_{\text{с.м.}}$ ). Точки:  $\circ$  — на первой стадии расчета ядра ориентированны “нос к носу”;  $\bullet$  — случайная ориентация; стрелки — рассчитанные нами барьеры реакций; звездочки — экспериментальные данные; точечные линии — результаты расчета в модели конкуренции каналов полного слияния и квазиделения в симметричных ядерных реакциях; перечеркнутые квадраты ([7]), круги ([8]) и треугольники ([9]) — экспериментальные данные.

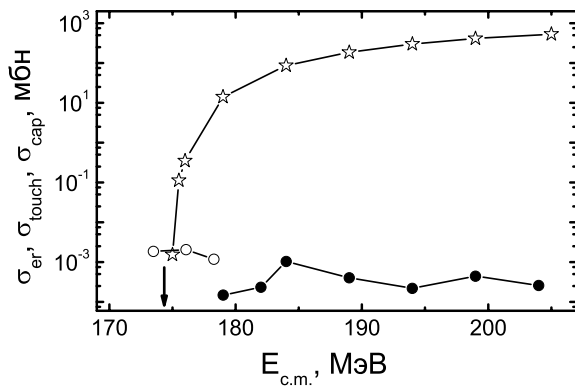


Рис. 5: Рассчитанные нами зависимости полных сечений касания  $\sigma_{\text{touch}}(E_{\text{с.м.}})$  (открытые звездочки) и образования остатков испарения  $\sigma_{\text{er}}(E_{\text{с.м.}})$  ( $\bullet$ ) от энергии налетающего иона в с.ц.м. в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{256}\text{No}$ . Экспериментальные данные  $\sigma_{\text{er}}(E_{\text{с.м.}})$  ( $\circ$ ) взяты из [10]. Стрелка показывает положение кулоновского барьера.

## Публикации автора по теме диссертации

### В рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. В. Л. Литневский, Г. И. Косенко, Ф. А. Иванюк, В. В. Пашкевич, Учет оболочечной структуры сталкивающихся ядер в процессе слияния-деления // Ядерная Физика, -Т. **74**, (2011) -С. 1029-1037.

2. В. Л. Литневский, Г. И. Косенко, Ф. А. Иванюк, В. В. Пашкевич, Учет оболочечной структуры ядер  $^{100}\text{Mo}$  и  $^{110}\text{Pd}$  в реакциях синтеза ядер  $^{200}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Ra}$  и  $^{220}\text{U}$  // Ядерная Физика, -Т. **75**, (2012) -С. 39-46.

3. V. L. Litnevsky, G. I. Kosenko, F. A. Ivanuk, V. V. Pashkevich, Influence of the shell structure of colliding nuclei in fusion-fission reactions // Physical Review C, -V. **85**, (2012) 034602, 9 pages.

4. В. Л. Литневский, Г. И. Косенко, Ф. А. Иванюк, В. В. Пашкевич, Учет ориентации сталкивающихся ионов при описании синтеза тяжелых ядер // Ядерная Физика, -Т. **75**, (2012) (принято к печати).

### В других изданиях:

5. V. L. Litnevsky, F. A. Ivanyuk, G. I. Kosenko, V. V. Pashkevich, The fusion of heavy ions within the two step reaction model // Nuclear physics and atomic energy, -V. **11**, (2010) -P. 341-345.

6. G. I. Kosenko, F. A. Ivanyuk, V. V. Pashkevich, D. V. Dinner and V. L. Litnevsky, The two step model for fusion-fission reactions // Proceeding of the 2-nd Int. Conf. "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy", Kyiv, June 9-15, 2008, Publishing Department of KINR, (2008) -P. 150-154.

7. В. Л. Литневский, Г. И. Косенко, Ф. А. Иванюк, В. В. Пашкевич, Учет индивидуальных особенностей сталкивающихся ядер в процессе слияния-деления // "Четырнадцатая научная конференция молодых ученых и специалистов" ОИЯИ, Дубна, 1-6 февраля, (2010) -С. 40-43.

8. V. L. Litnevsky, F. A. Ivanyuk, G. I. Kosenko, V. V. Pashkevich, The fusion of heavy ions within the two step reaction model // Proceeding of the 3-rd Int. Conf. "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy", Kyiv, June 7-12, 2010, Publishing Department of KINR, (2010) -P. 167-171.

9. В. Л. Литневский, Г. И. Косенко, Ф. А. Иванюк, В. В. Пашкевич, Учет оболочечной структуры сталкивающихся ядер в процессе слияния-деления //

## Список литературы

- [1] Г. И. Косенко, Ф.А. Иванюк, В.В. Пашкевич, Многомерный ланжеве-  
новский подход к описанию реакции слияния-деления  $^{18}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$  //  
ЯФ **65**, (2002) 1629-1636.
- [2] V. V. Pashkevich, On the asymmetric deformation of fissioning nuclei //  
Nucl. Phys. A **169**, (1971) 275-293.
- [3] J. Marten and P. Fröbrich, Langevin description of heavy-ion collisions  
within the surface friction model // Nucl. Phys. A **545**, (1992) 854-870.
- [4] Y. Abe, C. Gregoire, H. J. Delagrange, Langevin approach to nuclear  
dissipative dynamics // J. Phys. (Paris), Colloq. **47**, (1986) 329-338.
- [5] N. V. Antonenko *et al.*, Compound nucleus formation in reactions between  
massive nuclei: Fusion barrier // Phys. Rev. C **51**, (1995) 2635-2646.
- [6] W. Morawek *et al.*, Breakdown of the compound-nucleus model in the fusion-  
evaporation process for  $^{110}\text{Pd} + ^{110}\text{Pd}$  // Z. Phys. A **341**, (1991) 75-78.
- [7] E. Vulgaris, L. Grodzins, S. G. Steadman, and R. Ledoux, Fusion, transfer,  
and elastic scattering at sub-barrier energies for  $^{16, 18}\text{O}$  ions on  $^{208}\text{Pb}$  and  
 $^{15}\text{N}$  and  $^{16}\text{O}$  ions on  $^{209}\text{Bi}$  // Phys. Rev. C **33**, (1986) 2017-2027.
- [8] K. Hartel, Ph.D. thesis, Technical University, Munich, (1985).
- [9] K.-T. Brinkmann *et al.*, Residue excitation functions from complete fusion  
of  $^{16}\text{O}$  with  $^{197}\text{Au}$  and  $^{208}\text{Pb}$  // Phys. Rev. C **50**, (1994) 309-316.
- [10] Yu. Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov, Yu. V. Lobanov, *et al.*, Measurements  
of cross sections for the fusion-evaporation reactions  $^{204,206,207,208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$   
and  $^{207}\text{Pb} + ^{34}\text{S}$ : Decay properties of the even-even nuclides  $^{238}\text{Cf}$  and  $^{250}\text{No}$   
// Phys. Rev. C **64**, (2001) 054606.