

974779

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С341.α

4-2012-43

К-894

На правах рукописи

КУЗЯКИН  
Роман Анатольевич

- ОПИСАНИЕ КОЛЛЕКТИВНОГО ЯДЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ В РАМКАХ КВАНТОВОГО ФЛУКТУАЦИОННО-ДИССИПАТИВНОГО ПОДХОДА

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.

**Научные руководители:**

кандидат физико-математических наук  
Г.Г. Адамян (с.н.с. ЛТФ ОИЯИ)

доктор физико-математических наук, профессор  
И.И. Гончар (профессор ОмГУПС)

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор  
Ю.М. Чувильский (в.н.с. НИИЯФ им.Д.В.Скобельцына МГУ)

кандидат физико-математических наук  
Е.А.Черепанов (с.н.с. ЛЯР ОИЯИ)

**Ведущая организация:**

Государственный научный центр РФ – Физико-энергетический институт,  
г. Обнинск.

Защита диссертации состоится "4" 06 2012г. в 15<sup>00</sup> на  
заседании диссертационного совета Д 720.001.01 в Лаборатории  
теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института  
ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института  
ядерных исследований.

Автореферат разослан "25" 04 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



А.Б. Арбузов

**Общая характеристика диссертации**

**Актуальность темы.** Развитию формализма для описания коллективного ядерного движения большой амплитуды посвящено большое число работ. Данный формализм применяется для описания реакций слияния, квазиделения, многонуклонных передач с тяжелыми ионами и деления ядер. В таких процессах наиболее существенными считаются лишь некоторые коллективные (макроскопические) степени свободы, которые выбираются исходя из потребностей интерпретации экспериментальных данных. Наиболее часто используемыми коллективными координатами являются межцентровое расстояние или относительное удлинение системы, параметр шейки, деформации взаимодействующих ядер, массовая и зарядовая асимметрия. Динамическим уравнением для коллективных координат является стохастическое уравнение Ланжевена или физически эквивалентное ему диффузионное уравнение Фоккера-Планка для функции распределения коллективных координат и сопряженных им импульсов. Для решения этих уравнений необходимо знание транспортных коэффициентов: потенциальной энергии, массовых параметров, коэффициентов трения и диффузии. При рассмотрении конкретных ядерных процессов стохастические уравнения и транспортные коэффициенты определяются в основном в рамках феноменологических подходов.

Хотя многие свойства ядерных реакций имеют квантовую природу, во многих исследованиях на основе транспортных моделей квантовые статистические эффекты игнорируются и используется классическое описание, в котором коэффициенты трения и диффузии связаны через классическое флуктуационно-диссипационное соотношение. Рассмотрение затухания и флуктуаций в коллективной квантовой системе в основном ограничивается марковским пределом (мгновенная диссипация, гауссовские дельта-коррелированные флуктуации) и пределом

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

слабой связи или высоких температур. Нелокальность диссипации обычно не принимается во внимание при описании реакций с тяжелыми ионами и деления. То есть считается, что эти процессы являются марковскими: время релаксации одночастичной подсистемы заметно меньше характерного времени коллективного движения. Поэтому количественные оценки вязкости, в частности однотельной, в рамках немарковской модели могут существенно отличаться от тех, которые получены в предположении марковского характера динамики реакции.

Данные исследования посвящены развитию новых теоретических подходов к описанию механизма ядерных реакций при низких энергиях, учитывающих их квантовую диссипативную немарковскую природу, таких как захват, слияние, квазиделение, деление ядер. В основе нашего формализма лежит теория открытых квантовых систем. Исходя из данной теории, строится квантовый флуктуационно-диссипативный (диффузионный) подход, в рамках которого возможно детальное описание рассматриваемых процессов.

Последние экспериментальные данные по ядерным реакциям при низких энергиях, например, по глубоко подбарьерному слиянию, обнаруживают новые тенденции, не укладывающиеся в существующие традиционные подходы. В связи с этим создание новых теоретических моделей, наряду с совершенствованием существующих, расширением границ их применимости является важной задачей физики атомного ядра. Даже в рамках классического описания правильный учет особенностей ядерных реакций может существенно улучшить согласие теории с экспериментальными данными.

Важной составляющей рассматриваемых процессов является проблема преодоления потенциального барьера, как при энергиях выше барьера, так и при подбарьерных энергиях. Данная проблема специфична не только для ядерной, но и для атомной физики. Такие явления, как деление возбужденных атомных ядер, диссоциация молекул с теоретической точки зрения представляют собой распад

возбужденной системы, которая, первоначально находясь в квазистационарном (метастабильном) состоянии, преодолевает потенциальный барьер благодаря тепловым флуктуациям. Подбарьерные процессы играют важную роль, например, в таких процессах, как захват налетающего ядра ядром-мишенью, слияние тяжелых ионов и спонтанное деление атомных ядер. Квантовый флуктуационно-диссипативный (диффузионный) подход позволяет корректно описать такие процессы.

Целью работы является разработка формализма для теоретического описания коллективного ядерного движения большой амплитуды в рамках квантового флуктуационно-диссипативного подхода и описание на его основе экспериментальных данных по ядерным реакциям захвата, слияния и деления.

#### Научная новизна и практическая ценность.

- В рамках микроскопического квантового диффузионного подхода исследованы проницаемость потенциального барьера, а также квазистационарная скорость теплового распада метастабильного состояния в случае линейной связи по импульсу и координате между коллективной и внутренней подсистемами. Полученные аналитические формулы могут быть использованы для описания флуктуационно-диссипативной динамики ядерных реакций захвата, слияния, квазиделения, многонуклонных передач и деления.
- Рассматриваемый подход успешно использован для изучения процесса захвата налетающего ядра ядром-мишенью при энергиях бомбардировки около и ниже кулоновского барьера. Получено хорошее описание имеющихся экспериментальных сечений захвата в реакциях со сферическими и деформированными ядрами. Показано, что вне области действия ядерных сил и ядерного трения падение величины сечения подбарьерного захвата налетающего ядра ядром-мишенью с уменьшением энергии бомбардировки

замедляется. Предложены реакции для экспериментальной проверки этого предсказания. Впервые исследована изотопическая зависимость сечения захвата и среднеквадратичного углового момента системы на примере реакций с различной массовой асимметрией. Изучена роль статической деформации ядра-мишени или налетающего ядра, а также канала нейтронной передачи в процессе захвата в ядро-ядерном столкновении. Исследованы полученные парциальные сечения захвата в сравнении с экспериментальными данными.

- Получены новые приближенные аналитические формулы для квазистационарной скорости деления возбужденных атомных ядер (обобщенные формулы Крамерса) в случае использования микроканонического ансамбля. Определена точность формул Крамерса как в случае микроканонического, так и канонического ансамблей.

**Апробация работы.** Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований (Дубна), а также представлялись и докладывались на международных конференциях "Fusion 2011" (Сан-Мало, Франция, 2011), "Rutherford Centennial Conference on Nuclear Physics 2011" (Манчестер, Великобритания, 2011), "Ядро 2011" (Саров, 2011).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 7 работ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения общим объемом 123 страницы, включая 55 рисунков и список цитированной литературы из 205 наименований.

## Содержание работы

**Во введении** обсуждается актуальность работы и мотивация проводимых исследований, дается краткий обзор по теме диссертации.

**В первой главе** из микроскопического гамильтониана полной системы аналитически получена и решена система нелинейных квантовых интегро-дифференциальных уравнений Ланжевена для перевернутого осциллятора в пределе общей связи между коллективной и внутренней подсистемами. Показано, что уравнения движения для коллективной подсистемы удовлетворяют квантовым флуктуационно-диссипативным соотношениям и соотношению неопределенности. Из немарковских уравнений Ланжевена получены локальные по времени уравнения для первого и второго моментов, но с транспортными коэффициентами, зависящими явно от времени.

Подробно исследован случай линейной связи по импульсу и координате между коллективной и внутренней подсистемами. Получены асимптотики транспортных коэффициентов и рассмотрен марковский предел.

**Во второй главе**, используя развитый в первой главе микроскопический подход для описания динамики открытых квантовых систем, рассчитана проницаемость (вероятность прохождения) параболического барьера. Найденная в случае линейной связи по импульсу между коллективной и внутренней подсистемами проницаемость сравнивалась со случаем линейной связи по координате. Также рассмотрена проницаемость в случае, когда имеет место одновременно как линейная связь по импульсу, так и по координате. Изучены зависимости проницаемости барьера от времени, энергии, температуры, силы связи между коллективной и внутренней подсистемами. Для подбарьерных энергий обнаружен рост проницаемости при увеличении коэффициента трения.

Расчеты показывают, что с затуханием квантовые эффекты растут. Эти эффекты могут быть достаточно сильными при низких температурах. Полученные результаты подтверждают, что квантовая природа перехода через барьер должна быть учтена при расчете сечения захвата в ядро-ядерном столкновении.

В рамках используемого подхода рассмотрена квазистационарная скорость теплового распада метастабильного состояния. Исследована ее зависимость от коэффициента трения как в случае линейной связи по импульсу, так и в случае линейной связи по координате между коллективной и внутренней подсистемами. Показано, что данная зависимость является сравнительно слабой, когда имеется одновременно связь по импульсу и координате между подсистемами.

**В третьей главе** на основе вышеприведенного формализма изучен процесс захвата налетающего ядра ядром-мишенью при энергиях бомбардировки около и ниже кулоновского барьера. Рассмотрена эволюция двойной ядерной системы по коллективной координате относительного расстояния. Найдена формула для парциальной вероятности захвата, определяющей полное сечение захвата (сечение образования двойной ядерной системы).

С учетом вероятности захвата рассчитаны сечения захвата, среднеквадратичные угловые моменты составной системы, астрофизические  $S$ -факторы, логарифмические производные  $L$ , а также распределения барьеров  $D$  для различных реакций. Получено хорошее описание имеющихся экспериментальных данных как для надбарьерных, так и подбарьерных энергий для реакций со сферическими и деформированными ядрами. Предсказано уменьшение скорости падения сечения захвата при подбарьерных энергиях из-за изменения режима взаимодействия сталкивающихся ядер, так как при этих энергиях система оказывается вне зоны действия ядерных сил и ядерного трения. Данное изменение режима взаимодействия отражается также на среднеквадратичном угловом моменте  $\langle J^2 \rangle$ , логарифмической производной  $L$  и

астрофизическом  $S$ -факторе. В зависимости среднеквадратичного углового момента и  $S$ -фактора от  $E_{c.m.}$  возникает минимум. Такое поведение  $\langle J^2 \rangle$  должно приводить к увеличению анизотропии углового распределения продуктов деления и квазиделения.

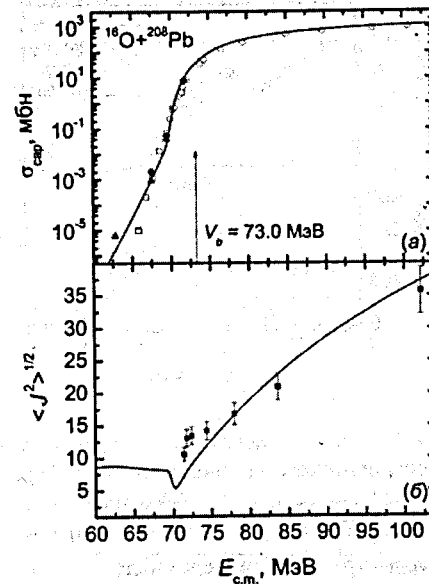


Рис. 1. Зависимости расчетных (сплошные кривые) сечения захвата (а) и среднеквадратичного углового момента системы после захвата (б) от  $E_{c.m.}$  для реакции  $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$  в сравнении с экспериментальными данными, показанными значками. Стрелкой обозначена величина кулоновского барьера.

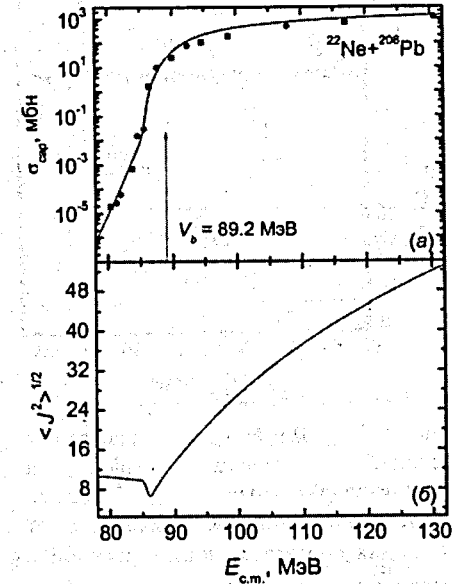


Рис.2. То же, что и на рис.1, только для реакции  $^{22}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$ .

Чтобы исключить из рассмотрения эффекты, связанные с деформацией и ориентацией взаимодействующих ядер, в первую очередь были изучены следующие реакции со сферическими ядрами:  $^4\text{He}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{36}\text{S}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb}$ ,  $^{209}\text{Bi}$  и  $^{22}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$  (рис. 1 и 2).

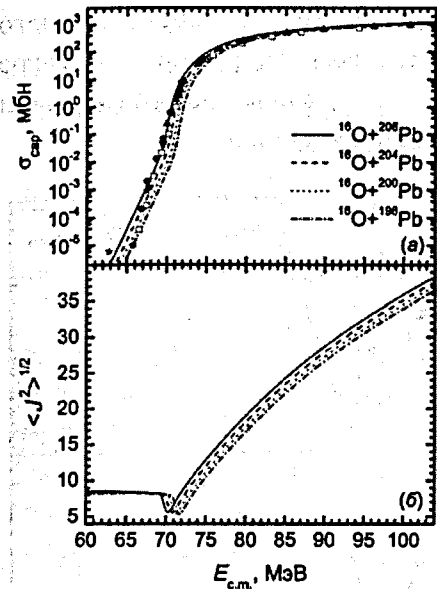


Рис. 3. Зависимости расчетных сечений захвата (а) и среднеквадратичных угловых моментов системы после захвата (б) от  $E_{c.m.}$  для соответствующих реакций в сравнении с экспериментальными данными. Темными символами показаны экспериментальные данные для реакции  $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ , светлыми — для  $^{16}\text{O} + ^{204}\text{Pb}$ .

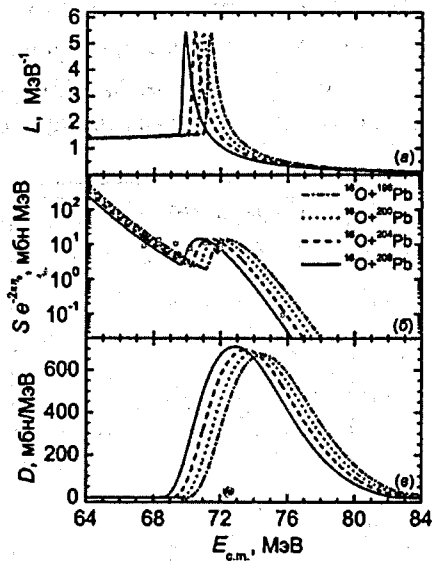


Рис. 4. Расчетные значения логарифмической производной  $L$  (а), астрофизического  $S$ -фактора с  $\eta_0 = \eta(E_{c.m.} = V_b)$  (б), где  $\eta$  — параметр Зоммерфельда, и распределения барьеров  $D = d^2(E_{c.m.} \sigma_{cap}) / dE_{c.m.}^2$  (в) для соответствующих реакций. Темными символами показаны экспериментальные данные для реакции  $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ , светлыми — для  $^{16}\text{O} + ^{204}\text{Pb}$ .

Исследована изотопическая зависимость сечения захвата и среднеквадратичного углового момента составной системы на примере следующих реакций:  $^4\text{He}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{36}\text{S}$ ,  $^{48}\text{Ca} + ^{196, 200, 204, 208}\text{Pb}$  (рис. 3 и 4). Обнаружено, что увеличение числа нейтронов в Pb способствует процессу захвата. Изотопическая зависимость сравнительно слабая в реакциях с  $^4\text{He}$  и  $^{16}\text{O}$ , так как ядро-ядерный потенциал слабо зависит от массового числа ядра мишени для

сильно асимметричных реакций. В реакциях с  $^{36}\text{S}$  и  $^{48}\text{Ca}$  изотопическая зависимость оказывается более сильной. Наклон зависимости сечения захвата от  $E_{c.m.}$  при глубоко подбарьерных энергиях не чувствителен к числу нейтронов системы.

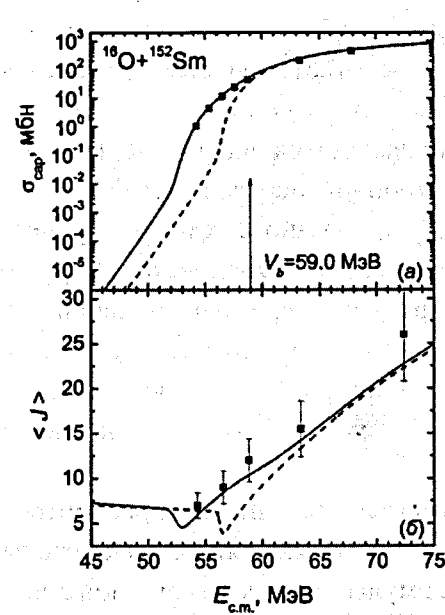


Рис. 5. Зависимости расчетных сечения захвата (а) и среднего углового момента системы после захвата (б) от  $E_{c.m.}$  для реакции  $^{16}\text{O} + ^{152}\text{Sm}$ . Расчеты с учетом статической деформации ядер изображены сплошными кривыми, без учета — штриховыми. Символами показаны экспериментальные данные. Стрелкой обозначена величина кулоновского барьера в случае сферических ядер.

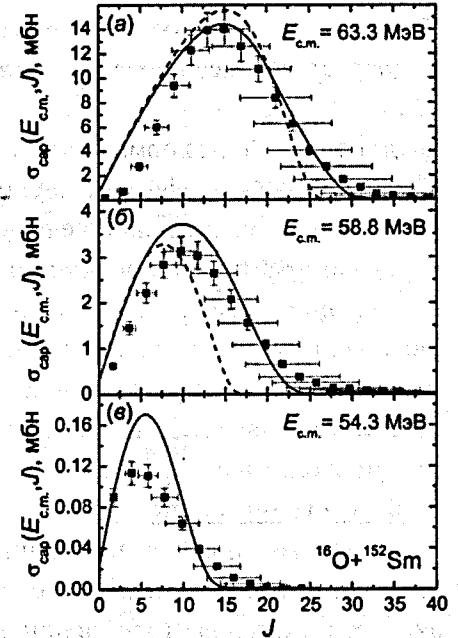


Рис. 6. Зависимости расчетных парциальных сечений захвата от  $J$  при фиксированных  $E_{c.m.}$  для реакции  $^{16}\text{O} + ^{152}\text{Sm}$ . Расчеты с учетом статической деформации ядер изображены сплошными кривыми, без учета — штриховыми. Символами показаны экспериментальные данные.

На примере реакций  $^{16}\text{O} + ^{112}\text{Cd}$ ,  $^{16}\text{O} + ^{152}\text{Sm}$ ,  $^{16}\text{O} + ^{184}\text{W}$ ,  $^{19}\text{F} + ^{175}\text{Lu}$ ,  $^{28}\text{Si} + ^{94}\text{Mo}$ ,  $^{28}\text{Si} + ^{100}\text{Mo}$ ,  $^{58}\text{Ni} + ^{64}\text{Ni}$ ,  $^{64}\text{Ni} + ^{64}\text{Ni}$ ,

$^{64}\text{Ni} + ^{100}\text{Mo}$  изучена роль деформации ядра-мишени и/или налетающего ядра, а также канала нейтронной передачи в процессе захвата в ядро-ядерном столкновении. Рассчитаны полные (рис. 5) и парциальные (рис. 6) сечения захвата и средние угловые моменты системы после захвата в сравнении с экспериментальными данными. Показано, что экспериментально наблюдаемое увеличение подбарьерного сечения захвата и соответствующее изменение углового момента в этих реакциях связаны с эффектом квадрупольной деформацией сталкивающихся ядер. Для реакции  $^{64}\text{Ni} + ^{100}\text{Mo}$  учет эффекта двухнейтронной передачи слабо влияет на полное и парциальное сечения. Это связано с тем, что процесс передачи практически не вызывает изменение кулоновского барьера. В реакции  $^{58}\text{Ni} + ^{64}\text{Ni}$  двухнейтронная передача приводит к увеличению деформации легкого ядра и, соответственно, к уменьшению высоты кулоновского барьера, что в свою очередь усиливает захват. В реакциях  $^{28}\text{Si} + ^{94,100}\text{Mo}$  наблюдается противоположная картина.

**В четвертой главе** в рамках диффузионного подхода рассмотрен процесс деления возбужденных атомных ядер. Получены приближенные аналитические формулы для квазистационарной скорости деления (обобщенные формулы Крамерса) в случае использования микроканонического ансамбля. Путем сравнения результатов аналитических выражений и численного расчета с использованием диффузионного уравнения Смолуховского определена точность формул Крамерса в широком диапазоне отношения высоты барьера деления  $B_f$  к температуре  $T_c$  квазистационарного состояния как в случае микроканонического, так и канонического ансамблей (рис. 7). Найдено, что точность интегральной формулы Крамерса составляет 2%, что существенно выше, чем у обычной формулы, получаемой из интегральной при использовании квадратичного приближения и бесконечных пределов интегрирования. Расчеты проводились для трех ядер с различной высотой барьера деления и длиной спуска от седловой

точки до точки разрыва. Показано, что использование канонического ансамбля для процесса деления оправдано только в случае, когда атомное ядро находится в сильно возбужденном состоянии.

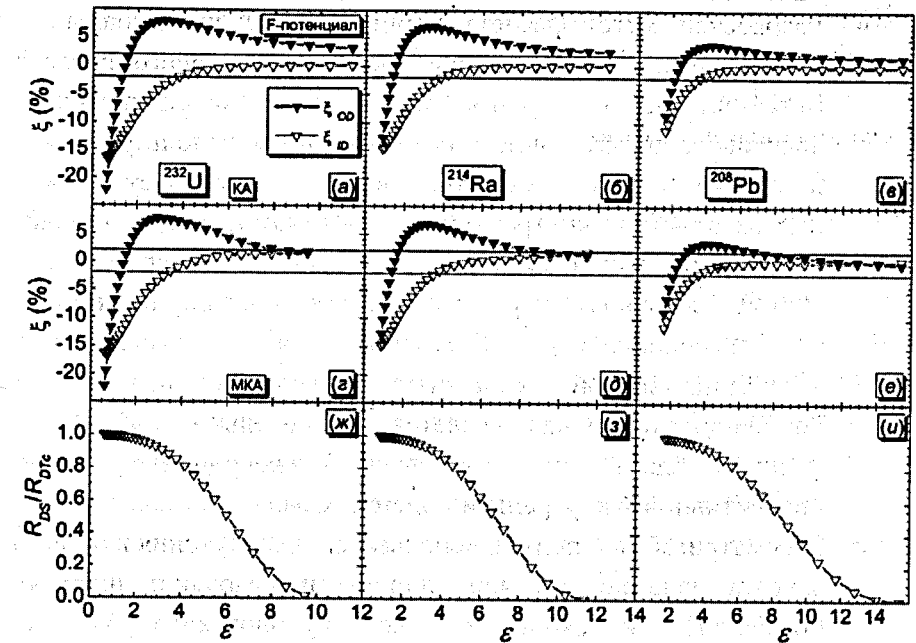


Рис. 7. В зависимости от параметра  $\epsilon = B_f / T_c$  показаны относительные отклонения  $\xi_{ID} = (R_I - R_D) / R_I$  ( $\nabla$ ) и  $\xi_{OD} = (R_O - R_D) / R_O$  ( $\blacktriangledown$ ), рассчитанные для случаев канонического (КА) (а-в) и микроканонического (МКА) (г-е) ансамблей, и отношении квазистационарных скоростей деления (ж-и). Расчеты сделаны с использованием F-потенциала (аналитическая аппроксимация потенциала с конечным радиусом взаимодействия) для  $^{232}\text{U}$  (слева),  $^{214}\text{Ra}$  (в середине) и  $^{208}\text{Pb}$  (справа).  $R_{DS}$  и  $R_{DTC}$  – квазистационарные динамические скорости, рассчитанные в случаях МКА и КА соответственно.  $R_I, R_O$  – квазистационарные скорости, рассчитанные по интегральной формуле и формуле в случае сверхзатухания соответственно,  $R_D$  – квазистационарная динамическая скорость.

**В заключении** суммируются результаты, выдвигаемые на защиту.

**В приложении** даются явные выражения для эффективной температуры и асимптотических дисперсий коллективных координат.

**На защиту выдвигаются следующие результаты:**

- Разработан метод расчета проницаемости потенциального барьера и квазистационарной скорости теплового распада метастабильного состояния на основе микроскопического квантового диффузионного подхода. Метод используется как в случае только линейной связи по импульсу между коллективной и внутренней подсистемами, так и в более общем случае линейной связи по импульсу и координате. При подбарьерных энергиях предсказан рост проницаемости с диссипацией. Показано, что зависимость квазистационарной скорости теплового распада от коэффициента трения является сравнительно слабой при наличии связи по импульсу и координате между коллективной и внутренней подсистемами.
- Рассматриваемый подход использован для изучения процесса захвата налетающего ядра ядром-мишенью при энергиях бомбардировки около и ниже кулоновского барьера. Получена аналитическая формула для парциальной вероятности захвата, определяющей сечение образования двойной ядерной системы. Рассчитаны полные и парциальные сечения захвата, средние  $\langle J \rangle$  и среднеквадратичные  $\langle J^2 \rangle$  угловые моменты образованной двойной ядерной системы, астрофизические  $S$ -факторы, логарифмические производные  $L$ , а также распределения барьеров для различных реакций. Исследованы эффекты статической деформации взаимодействующих ядер, передачи нейтронов между ядрами на сечение захвата и изотопическая зависимость сечения захвата. Полученные результаты для реакций со сферическими и деформированными ядрами

находятся в хорошем согласии с имеющимися экспериментальными данными.

- Предсказано уменьшение скорости падения сечения захвата при подбарьерных энергиях из-за изменения режима взаимодействия сталкивающихся ядер вследствие того, что внешняя точка поворота находится вне области действия ядерного взаимодействия. Данное изменение режима взаимодействия приводит к возникновению экстремальных точек в зависимостях  $S$ -,  $L$ -факторов и  $\langle J^2 \rangle$  от энергии столкновения.
- Получены новые приближенные аналитические формулы для квазистационарной скорости деления (обобщенные формулы Крамерса) в случае использования микроканонического ансамбля. Путем сравнения результатов аналитических выражений и численных расчетов с использованием диффузионного уравнения определена точность формул Крамерса в широком диапазоне отношения высоты барьера деления к температуре в квазистационарном состоянии как в случае микроканонического, так и канонического описаний процесса деления.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. R.A. Kuzyakin, V.V. Sargsyan, G.G. Adamian, and N.V. Antonenko *Peculiarities of the parabolic-barrier penetrability and thermal decay rate with the quantum diffusion approach* // Phys. Rev. A. –2011. –v.83. –p.062117 (8 pages).
2. R.A. Kuzyakin, V.V. Sargsyan, G.G. Adamian, and N.V. Antonenko *Probability of passing through a parabolic barrier and thermal decay rate: Case of linear coupling both in momentum and in coordinate* // Phys. Rev. –2011. –v.84. –p.032117 (9 pages).
3. I.I. Gontchar and R.A. Kuzyakin *Integral Kramers formula for the fission rate versus the dynamical modeling: The case of*



- deformation-dependent temperature* // Phys. Rev. C. –2011. –v.84. –p.014617 (9 pages).
4. Р.А. Кузякин, В.В. Саргсян, Г.Г. Адамян, Н.В. Антоненко *Квантовое диффузионное описание процесса подбарьерного захвата в реакциях с тяжелыми ионами* // Ядерная Физика –2012. –т.75. –с.475-484.
  5. R.A. Kuzyakin, V.V. Sargsyan, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, E.E. Saperstein, and S.V. Tolokonnikov *Isotopic trends of capture cross section and mean-square angular momentum of captured system* // Phys. Rev. C. –2012. –v.85. –p.034612 (12 pages).
  6. V.V. Sargsyan, R.A. Kuzyakin, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, W. Scheid, and H.Q. Zhang *Sub-barrier capture with quantum diffusion approach* // EPJ Web Conf. –2011. –v.17. –p.04003 (6 pages).
  7. I.I. Gontchar, R.A. Kuzyakin, E.G. Pavlova, and N.E. Aktaev, *The nuclear fission process as Brownian motion: modifying the Kramers fission rates* // J. Phys. Conf. Ser. –2012. in print (6 pages).

Получено 19 апреля 2012 г.