

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

На правах рукописи  
УДК 539.17

**КАЛАНДАРОВ**  
Шухрат Атажанович

**СТАТИСТИЧЕСКОЕ И ДИНАМИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОТКРЫТЫХ  
КВАНТОВЫХ СИСТЕМ И ЭМИССИИ ТЯЖЕЛЫХ КЛАСТЕРОВ В  
ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра  
и элементарных частиц

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

Дубна 2011

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

**Научные руководители:**

кандидат физико-математических наук,

с.н.с.

Г.Г. Адамян (ЛТФ ОИЯИ)

кандидат физико-математических наук,

с.н.с.

Н.В. Антоненко (ЛТФ ОИЯИ)

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук,

Л.А. Малов (ЛТФ ОИЯИ)

доктор физико-математических наук,

профессор И.И. Гончар (Омский государственный университет путей  
сообщения)

**Ведущая организация:**

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобель-  
цына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,  
г. Москва.

Защита состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2011 г. в \_\_\_ ч. \_\_\_ мин. на засе-  
дании диссертационного совета Д 720.001.01 в Лаборатории теоретической  
физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследо-  
ваний, 141980, г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛТФ ОИЯИ.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физико-математических наук

А.Б. Арбузов

## Общая характеристика диссертации

### Актуальность темы.

Данное исследование посвящено развитию теоретических подходов к описанию механизма ядерных реакций при низких энергиях, таких как слияние-деление, квазиделение, распад сильновозбужденного составного ядра с вылетом тяжелых кластеров и динамическому описанию транспортных свойств открытых квантовых ядерных систем.

Для описания распада возбужденного составного ядра в основном применяются статистические модели, такие как модель Хаузера-Фешбаха и модель переходного состояния. Барьеры эмиссии сложных фрагментов вычисляются в рамках жидкокапельной модели с учетом вращения, конечного радиуса ядерного взаимодействия и микроскопических поправок (парной энергии и оболочечных поправок). В этих моделях механизм образования сложных фрагментов не уточняется. Параметры расчетов выбираются из условия наилучшего согласия с экспериментальными данными. Существуют несколько доступных компьютерных кодов, таких как GEMINI, RASE, NIVAR и EMPIRE, которые вычисляют сечения образования конечных продуктов распада на основе статистических моделей. Однако не существует универсального набора параметров этих моделей для описания большого числа экспериментальных данных в широком диапазоне массовых и зарядовых чисел составного ядра и энергий бомбардировки. Барьеры эмиссии сложных фрагментов, извлеченные из экспериментальных сечений образования этих фрагментов в рамках статистической модели, сильно отличаются от предсказаний вышеуказанных жидкокапельных моделей. Поэтому существует необходимость в разработке нового метода расчета барьеров эмиссии кластеров. Так как статистические модели рассматривают только распад возбужденного составного ядра и не учитывают вклад процесса квазиделения (распад ядерной системы без образования составного ядра) в сечения образования сложных фрагментов, возникает потребность создания модели, которая одновременно учитывает вклады от процессов как слияния-деления, так и квазиделения. С ростом углового момента соотношения между различными каналами распада сильно меняются и поэто-

му необходим корректный учет угловой зависимости вероятности распада в каждом из каналов.

Последнее время возрастает интерес к возможности получения новых нейтронодефицитных изотопов ядер путем эмиссии тяжелых кластеров из горячих составных ядер. Эти изотопы трудно получить в каналах испарения легких частиц. Поэтому создание и развитие модели, описывающей существующие экспериментальные сечения вылета сложных фрагментов и предсказывающей оптимальные условия для получения нейтронодефицитных ядер, является актуальной задачей.

Для динамического описания начальной стадии столкновения двух ядер применяются классические и квантовые уравнения Ланжевена, где коллективными координатами являются относительное расстояние между центрами двух сталкивающихся ядер, массовая и зарядовая асимметрии и разница  $N/Z$  отношений во взаимодействующих ядрах. На этой стадии реакции относительно мало изучена роль флуктуаций коллективных переменных и неравновесных процессов, связанных с нестационарным поведением транспортных коэффициентов, которые определяют процессы диффузии и диссипации. Во многих исследованиях на основе транспортных моделей квантовые статистические эффекты и эффекты нелокальности диссипации игнорируются и используются классическое описание, в котором коэффициент трения и диффузии связаны через классическое флуктуационно-диссипативное соотношение. В связи с этим возникает необходимость создания микроскопической модели, учитывающей квантовые эффекты и эффекты немарковости, для расчета транспортных коэффициентов и описания флуктуаций коллективных координат во внешних полях.

**Целью работы** является разработка модели для описания эмиссии сложных фрагментов в ядерных реакциях с тяжелыми ионами при низких энергиях ( $E_{lab} \leq 20$  МэВ/нуклон), изучение влияния углового момента, асимметрии входного канала,  $N/Z$  отношения и энергии возбуждения ядерной системы на процесс образования и эмиссии сложных фрагментов. Разработка микроскопического формализма для описания немарковской диссипативной динамики открытой квантовой системы и расчета нестаци-

онарных транспортных коэффициентов, который может применяться для описания начальной стадии реакций слияния и квазиделения.

### Научная новизна и практическая ценность.

- В рамках модели двойной ядерной системы разработан теоретический подход для описания эмиссии сложных фрагментов в реакциях полного слияния и квазиделения. Впервые предложен механизм образования и вылета кластеров тяжелее альфа-частицы из возбужденных ядерных систем: кластеры образуются за счет коллективного движения ядерной системы по координатам зарядовой и массовой асимметрий, и образовавшаяся двойная ядерная система далее распадается на два фрагмента благодаря тепловой диффузии через кулоновский барьер. Конкуренция между каналами испарения легких частиц и эмиссии сложных фрагментов рассматривается в рамках единой модели. В рамках этого подхода изучена роль углового момента, асимметрии входного канала,  $N/Z$  отношения и энергии возбуждения в образовании конечных продуктов реакции. Данный подход использован для расчета массовых, зарядовых и изотопических распределений продуктов в реакциях с тяжелыми ионами. Сделанные нами предсказания массовых и зарядовых распределений конечных продуктов реакций подтвердились в экспериментах, проведенных в GANIL (Франция). Развитый нами подход позволяет найти оптимальные условия эксперимента (комбинация снаряд-мишень, энергия бомбардировки) для изучения процессов, связанных с вылетом конкретных сложных фрагментов.
- Предложен новый метод расчета сечений испарительных остатков в ядерных реакциях полного слияния. Преимуществом этого нового метода является возможность расчета сечения образования конкретных испарительных остатков, например нейтронодефицитных ядер, с учетом как каналов испарения легких частиц, так и каналов эмиссии тяжелых кластеров. В рамках этой модели предсказаны сечения образования испарительных остатков с учетом кластерных каналов

распада, зарядовые, массовые и изотопические распределения в реакциях  $^{25}\text{Mg}+^{206}\text{Pb}$ ,  $^{36}\text{S}+^{nat}\text{Pt}$  и  $^{48}\text{Ca}+^{nat}\text{W}$ , которые ведут к образованию возбужденного составного ядра  $\text{Pu}$ . Впервые показана возможность образования изотопов  $\text{Rn}$ ,  $\text{Fr}$  и  $\text{Ra}$  в каналах испарения тяжелых кластеров. Вычисленные сечения и изотопические распределения ядер остатков, которые получают путем эмиссии тяжелых кластеров из возбужденного составного ядра  $\text{Pu}$ , находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными, полученными на установке SHIP в GSI (Германия).

- В рамках микроскопического подхода получена система немарковских квантовых уравнений Ланжевена в пределах постоянной и переменной связи между коллективной и внутренней подсистемами. Получены аналитические выражения для коэффициентов диффузии и трения, зависящих явно от времени. Установлены влияния начального коррелированного или некоррелированного состояния внутренней подсистемы и частоты модуляции связи между коллективной и внутренней подсистемами на флуктуационно-диссипативные, спектральные и статистические свойства открытой квантовой системы. Впервые доказана правильность использования при низких температурах микроскопического флуктуационно-диссипативного соотношения вместо феноменологического соотношения. Показано, что коэффициент трения уменьшается во внешнем поле и при росте частоты модуляции связи, приводя к замедлению затухания энергии коллективной подсистемы. Развитый подход может быть использован для описания флуктуационно-диссипативной динамики ядерных реакций слияния и деления, захвата налетающего ядра ядром-мишенью, времен жизни метастабильных систем, например, двойных ядерных систем.

**Апробация работы.** Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, в институте теоретической физики Университета г. Гиссе-

на (Германия), на научных семинарах международных научных центров в Германии (GSI), Франции (GANIL) и Китае (IMP), и на конференциях молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, 2006, 2007, 2008, 2010), а также представлялись и докладывались на международных конференциях "Ядерная структура" (Дубна, 2009), "Экзотические ядра и ядерная астрофизика" (Синая, Румыния, 2010), "Extremes of the Nuclear Landscape" (Закопане, Польша, 2010), "Модели и методы в малонуклонных и много-нуклонных системах" (Дубна, 2010), "Слияние 2011" (Сен-Мало, Франция, 2011).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 8 работ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из четырех глав и одного приложения общим объемом 134 страниц, включая 6 таблиц, 57 рисунков и список цитированной литературы из 185 наименований.

## Содержание работы

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

**В первой главе** разработана теоретическая модель для описания массовых и зарядовых распределений конечных продуктов ядерных реакций полного слияния и квазиделения. Исследуются процессы образования возбужденной двойной ядерной системы (ДЯС) во входном канале реакции и ее временной эволюции по коллективным координатам массовой и зарядовой асимметрий и относительного расстояния между центрами масс ядер ДЯС, которая приводит к образованию составного ядра и различных возбужденных конфигураций ДЯС с последующим их распадом. Эмиссия сложных фрагментов описывается следующим образом: 1) формирование ДЯС с данной массовой (зарядовой) асимметрией; 2) распад этой ДЯС через кулоновский барьер ядро-ядерного потенциала. Для описания процесса формирования кластера используется стационарное решение мастер-уравнения по координатам массовой и зарядовой асимметрий. Барьеры эмиссии сложных фрагментов вычисляются в рамках модели ДЯС с использованием потенциала двойной свертки с эффективным нуклон-

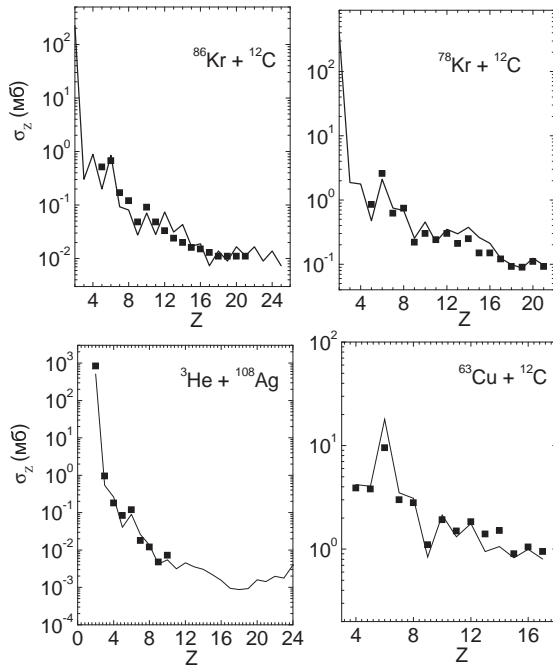


Рис. 1: Расчетные зарядовые распределения (линии) продуктов реакций  $^{86}\text{Kr} + ^{12}\text{C}$  ( $E_{\text{lab}} = 9.31$  МэВ/нуклон),  $^{78}\text{Kr} + ^{12}\text{C}$  ( $E_{\text{lab}} = 8.52$  МэВ/нуклон),  $^3\text{He} + ^{108}\text{Ag}$  ( $E_{\text{lab}} = 30$  МэВ/нуклон) и  $^{63}\text{Cu} + ^{12}\text{C}$  ( $E_{\text{lab}} = 12.6$  МэВ/нуклон). Темными квадратами показаны экспериментальные данные.

нуклонным взаимодействием, зависящим от плотности ядер. Конкуренция между испарительными каналами легких частиц и каналами бинарного кластерного распада учитывается единым образом и сильно зависит от углового момента системы. Обсуждаются вклады процессов полного слияния и квазиделения в сечения образования сложных фрагментов и основные факторы, определяющие доминирующий механизм (слияние-деление или квазиделение) кластерного распада. Даются примеры управляющих ("driving") потенциалов. Рассмотрены асимметричные ядерные реакции  $^3\text{He} + ^{108}\text{Ag}$ ,  $^{63}\text{Cu} + ^{12}\text{C}$  и  $^{78,86}\text{Kr} + ^{12}\text{C}$ , в которых доминирует процесс слияния-деления (рис. 1).

**Во второй главе** на основе модели, развитой в первой главе, рассчитаны различные наблюдаемые характеристики конечных продуктов реакций  $^{93}\text{Nb} + ^9\text{Be}$ ,  $^{93}\text{Nb} + ^{12}\text{C}$ ,  $^{93}\text{Nb} + ^{27}\text{Al}$ ,  $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ ,  $^{86}\text{Kr} + ^{63}\text{Cu}$ ,  $^{139}\text{La} + ^{12}\text{C}$ ,  $^{139}\text{La} + ^{27}\text{Al}$ ,  $^{45}\text{Sc} + ^{65}\text{Cu}$ ,  $^{28}\text{Si} + ^{96}\text{Zr}$ ,  $^4\text{He} + ^{130}\text{Te}$ ,  $^{40}\text{Ca} + ^{78,82,92}\text{Kr}$ ,  $^{86}\text{Kr} + ^{48}\text{Ca}$ ,  $^{122}\text{Sn} + ^{12}\text{C}$ ,  $^{32}\text{S} + ^{100}\text{Mo}$ ,  $^{20,28}\text{Ne} + ^{181}\text{Ta}$ ,  $^{48}\text{Ca} + ^{144,154}\text{Sm}$  и  $^{16,22}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  при



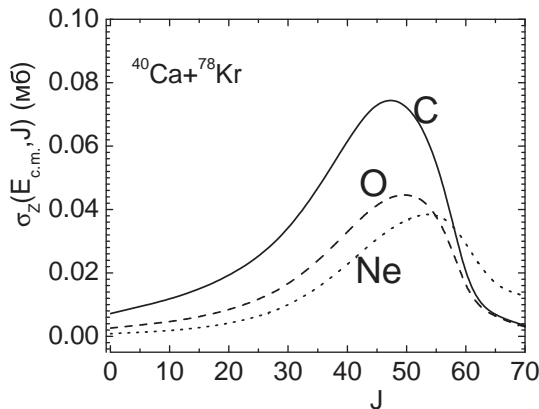


Рис. 2: Зависимости парциальных сечений эмиссии тяжелых кластеров от углового момента для реакции  $^{78}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$  при энергии бомбардировки  $E_{\text{lab}} = 5.5$  МэВ/нуклон.

различных энергиях бомбардировки и сравниваются с соответствующими экспериментальными данными, цитируемые в диссертации. Показаны влияния углового момента, зарядовой асимметрии,  $N/Z$  отношения и энергии возбуждения во входном канале на механизм образования и вылета сложных фрагментов из возбужденной ядерной системы. С ростом углового момента, вклад процесса квазиделения в сечения образования сложных фрагментов растет. Показано, что тяжелые кластеры (например,  $^{12,14}\text{C}$ ,  $^{16,18}\text{O}$ ,  $^{20,22}\text{Ne}$ ) имеют максимум выхода при угловых моментах  $J \approx 45 - 55$  в ядерных реакциях, ведущих к образованию составных ядер промежуточных масс (рис. 2). Массовые и зарядовые распределения сильно отличаются в асимметричных и симметричных реакциях (рис. 3), так как доминирующий механизм образования сложных фрагментов отличается в этих реакциях. В асимметричных реакциях доминирует вклад от процесса полного слияния, а в симметричных реакциях - вклад от процесса квазиделения. Расчетные массовые распределения симметричных фрагментов в реакции  $^{20}\text{Ne} + ^{181}\text{Ta}$  находится в хорошем согласии с экспериментальными данными (рис. 4). Предсказания модели для зарядовых распределений конечных продуктов реакций  $^{78,82}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$  при энергии бомбардировки 5.5 МэВ/нуклон подтвердились в экспериментах, проведенных в GANIL (Франция) (рис. 5).

В третьей главе на основе модели ДЯС разработан новый метод рас-

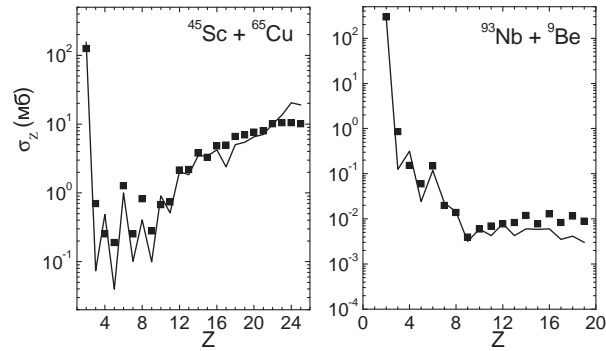


Рис. 3: Расчетные зарядовые распределения (линии) продуктов реакций  $^{93}\text{Nb}(E_{lab}=8.4 \text{ МэВ/нуклон})+^9\text{Be}$  и  $^{45}\text{Sc}(E_{lab}=4.44 \text{ МэВ/нуклон})+^{65}\text{Cu}$ . Экспериментальные данные показаны темными квадратами.

чета сечений испарительных остатков в реакциях полного слияния с учетом кластерных каналов распада. Рассматривается вылет тяжелых кластеров, таких как  $^{12,14}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{16,18}\text{O}$ ,  $^{20,22}\text{Ne}$  и т.д., из возбужденных актинидов. В отличие от процесса распада возбужденных ядер промежуточных масс в процессе распада возбужденного тяжелого ядра не устанавливается полное статистическое равновесие по координатам зарядовой и массовой асимметрий. Если время вылета нейтрона намного больше, чем время передачи нуклонов между ядрами в асимметричных конфигурациях ДЯС, то можно предположить, что статистическое квазиравновесие устанавливается в асимметричных конфигурациях ДЯС до точки Бусинаро-Галлоне, поскольку в этих конфигурациях барьер квазиделения по координате относительного расстояния является достаточно большим. В таком подходе вероятность достижения точки Бусинаро-Галлоне определяет вероятность перехода системы в симметричные конфигурации ДЯС, что ведет к процессу деления. После образования асимметричных конфигураций ДЯС они могут распадаться путем тепловой диффузии через кулоновский барьер. Каналы эмиссии легких частиц, эмиссии кластеров (распад асимметричной ДЯС) и деления (перевал системы через точку Бусинаро-Галлоне) конкурируют друг с другом. Таким образом, вероятности вылета легких частиц, тяжелых кластеров и деления описываются единым образом.

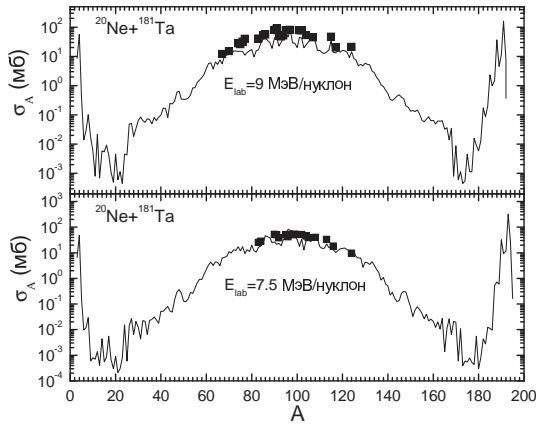


Рис. 4: Расчетные массовые распределения (линии) продуктов реакции  $^{20}\text{Ne} + ^{181}\text{Ta}$  при указанных энергиях бомбардировки. Темными квадратами показаны экспериментальные данные.

Используя формализм, развитый в данной главе, были предсказаны изотопические распределения ядер остатков Rn, Fr и Ra, которые образуются путем эмиссии кластеров в реакциях  $^{36}\text{S} + ^{nat}\text{Pt}$  при  $E_{\text{lab}} = 5.96$  МэВ/нуклон и  $^{48}\text{Ca} + ^{nat}\text{W}$  при  $E_{\text{lab}} = 5.41$  МэВ/нуклон. Сравнение предсказаний модели с экспериментальными данными группы SHIP в GSI (Германия) демонстрирует хорошее согласие (рис. 6), что подтверждает правильность предлагаемого кластерного механизма образования испарительных остатков. Модель позволяет предсказывать сечения образования специфических испарительных остатков в таких процессах.

**В четвертой главе** из микроскопического гамильтониана полной системы получены и решены системы квантовых немарковских уравнений Ланжевена для затухающего гармонического осциллятора в пределе линейной связи между коллективной и внутренней подсистемами. Из немарковских уравнений Ланжевена получены локальные по времени уравнения для первого и второго моментов, но с транспортными коэффициентами, зависящими явно от времени.

В первой части этой главы рассматривается случай постоянной связи с начальным коррелированным состоянием внутренней подсистемы. Показано, что переходное время увеличивается, когда фаза коррелированного внутреннего состояния отлична от нуля. В случае коррелированного состояния внутренней подсистемы диффузионные коэффициенты флуктуи-

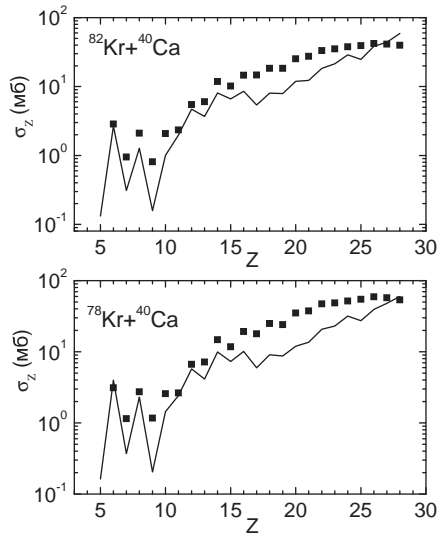


Рис. 5: Расчетные зарядовые распределения (линии) продуктов реакций  $^{78}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$  (нижняя часть) и  $^{82}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$  (верхняя часть) при энергии бомбардировки  $E_{\text{lab}} = 5.5$  МэВ/нуклон. Темными квадратами показаны экспериментальные данные.

руют во время переходного процесса, но не меняют свои асимптотические значения. Скорость распада квантовой когерентности может быть усилена или подавлена в зависимости от знака фазы коррелированного состояния. Из-за близости времен декогеренции и релаксации, эффекты квантовой интерференции играют важную роль в ядерных системах.

Во второй части этой главы были получены аналитические выражения для нестационарных коэффициентов трения, диффузии и дисперсий коллективных координат для случая переменной связи между коллективной и внутренней подсистемами. Показано, что коэффициент трения и разница энергий между начальным и конечным коллективными состояниями уменьшаются с ростом частоты модуляции связи, т.е. сильная модуляция связи ведет к замедлению распада начального состояния. В отличие от марковского случая, в немарковском процессе диффузия замедляется с ростом частоты модуляции. Из сравнений результатов, полученных с помощью микроскопического и феноменологического флуктуационно-диссипативных соотношений, показано, что феноменологическое соотношение приводит к некорректному описанию динамики открытых квантовых систем при низких температурах.

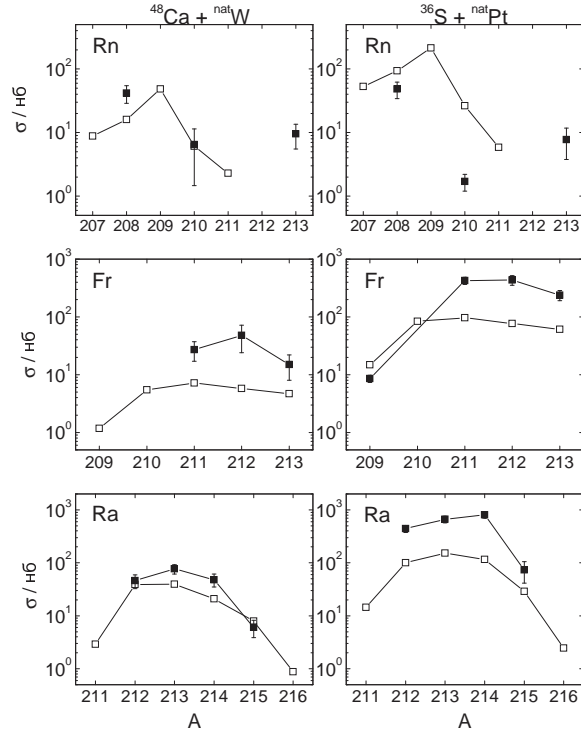


Рис. 6: Расчетные (светлые квадраты) и экспериментальные (темные квадраты) изотопические распределения ядер Rn, Fr и Ra образующихся путем эмиссии тяжелых кластеров в указанных реакциях  $^{36}\text{S} + \text{natPt}$  при  $E_{\text{lab}}=5.96$  МэВ/нуклон (справа) и  $^{48}\text{Ca} + \text{natW}$  при  $E_{\text{lab}}=5.41$  МэВ/нуклон (слева).

В третьей части этой главы для двумерной заряженной коллективной подсистемы во внешнем аксиально-симметричном магнитном поле, были найдены явные выражения для нестационарных транспортных коэффициентов и дисперсий коллективных переменных. Показано, что в случае постоянной связи коэффициент трения уменьшается с увеличением частоты магнитного поля, что ведет к замедлению процесса диссипации коллективной энергии. При низких температурах внешнее поле ведет к сжатию волнового пакета. Локализация заряженной частицы зависит от диссипации, силы внешнего поля и от температуры термостата.

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

В Приложении даются явные выражения для транспортных коэффициентов и асимптотических дисперсий коллективных координат открытой квантовой системы во внешнем поле.

На защиту выдвигаются следующие результаты.

- В рамках модели двойной ядерной системы предложен новый механизм образования сложных фрагментов и разработан метод расчета сечений эмиссии сложных фрагментов в ядерных реакциях полного слияния и квазиделения. Показано, что предлагаемая модель хорошо описывает существующие экспериментальные данные и обладает предсказательной силой.
- Показаны влияния углового момента, зарядовой асимметрии,  $N/Z$  отношения и энергии возбуждения во входном канале на процесс образования и эмиссии сложных фрагментов из возбужденных ядерных систем. Установлено, что с ростом углового момента вклад процесса квазиделения в сечения эмиссии тяжелых кластеров растет. Вылету определенного кластера соответствует некоторый интервал угловых моментов возбужденной ядерной системы. Показано, что с уменьшением  $N/Z$  отношения эмиссия сложных фрагментов становится более вероятной.
- Разработан метод расчета сечений испарительных остатков, образующихся в испарительных и кластерных каналах распада тяжелого составного ядра в реакциях полного слияния. Впервые показано, что при определенных энергиях возбуждения составного ядра кластерные каналы распада доминируют при образовании ядер остатков с  $Z \leq Z_{CN} - 6$ , где  $Z_{CN}$  - зарядовое число составного ядра. Хорошее согласие предсказаний модели с экспериментальными изотопическими распределениями ядер остатков подтверждает кластерный механизм образования определенных испарительных остатков.

- В рамках микроскопического подхода и в случаях постоянной и переменной линейной связи между коллективной и внутренней подсистемами получены системы квантовых немарковских уравнений Ланжевена, удовлетворяющие квантовым флуктуационно-диссипативным соотношениям. Разработан метод вывода аналитических формул для вычисления коэффициентов диффузии и трения. Показано, что переходное время увеличивается при ненулевых фазах коррелированной внутренней подсистемы. Обнаружено, что коэффициент трения уменьшается и процесс диффузии замедляется при наличии постоянного внешнего поля и при росте частоты модуляции связи между коллективной и внутренней подсистемами. Сильная модуляция связи ведет к замедлению распада начального метастабильного состояния.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. Sh.A. Kalandarov, Z. Kanokov, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, *Transport coefficients of a quantum system interacting with a squeezed heat bath*, Phys. Rev. E **74**, 011118 (2006), 11 pages.
2. Sh.A. Kalandarov, Z. Kanokov, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, *Influence of the external magnetic field on dynamics of open quantum systems*, Phys. Rev. E **75**, 031115 (2007), 16 pages.
3. Sh.A. Kalandarov, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, W. Scheid, *Emission of charged particles from excited compound nucleus*, Phys. Rev. C **82**, 044603 (2010), 12 pages.
4. Sh.A. Kalandarov, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, W. Scheid, J.P. Wieleczko, *Angular momentum dependence of cluster emission*, Acta Physica Polonica B **42**, 487-491 (2011).

5. Sh.A. Kalandarov, Z. Kanokov, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, W. Scheid, *Non-Markovian dynamics of open quantum systems with non-stationary coupling*, Phys. Rev. E **83**, 041104 (2011), 11 pages.
6. Sh.A. Kalandarov, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, W. Scheid, *Role of angular momentum in production of complex fragments in fusion and quasifission reactions*, Phys. Rev. C **83**, 054611 (2011), 8 pages.
7. G. Ademard, J.-P. Wieleczko, J. Gomez del Campo, M. La Commara, E. Bonnet, M. Vigilante, A. Chbihi, J.D. Frankland, E. Rosato, G. Spadaccini, Sh.A. Kalandarov *et al.*, *Decay of excited nucleus produced in the  $^{78,82}\text{Kr}+^{40}\text{Ca}$  reactions at 5.5 MeV/nucleon*, Phys.Rev. C **83**, 054619 (2011), 14 pages.
8. Sh.A. Kalandarov *et al.*, *Emission of clusters with  $Z > 2$  from excited actinide nuclei*, Phys. Rev. C **84**, 054607 (2011), 11 pages.