

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 539.17

САРГСЯН

Вазген Валерикович

КВАНТОВЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ЯДЕРНЫХ  
РЕАКЦИЯХ, ДЕЛЕНИИ И ОТКРЫТЫХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМАХ

Специальность: 01.04.16 — физика ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 2008

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)

доктор физико-математических наук,

профессор

Р.В. Джолос (ЛТФ ОИЯИ)

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук,

Ю.М. Чувильский (НИИ ЯФ им. Д.В.Скобелевца МГУ)

доктор физико-математических наук,

профессор

В.Д. Тонеев (ЛТФ ОИЯИ)

**Ведущая организация:**

РНИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва.

Защита диссертации состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2008 г. в “\_\_\_\_\_” на заседании диссертационного совета Д720.001.01 при Объединенном институте ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

А.Б. Арбузов

**Актуальность темы.** Развитию формализма для описания статистического и динамического поведения открытых систем посвящено большое число работ. Данный формализм применяется для описания деления ядер и реакций слияния, квазиделения, многонуклонных передач с тяжелыми ионами при низких энергиях ( $\leq 10$  МэВ/нуклон). 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, массовая (зарядовая) асимметрия и деформации ядер. 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. В конкретных расчетах стохастические уравнения и транспортные коэффициенты определяются в основном в рамках феноменологических подходов. Сами стохастические уравнения обычно вводятся при описании динамики деления феноменологически.

Имеющиеся на данный момент теоретические модели предсказывают величину коэффициента затухания от  $10^2 - 10^4$  до 2-6 в единицах  $10^{21} \text{ с}^{-1}$ . Зависимость ядерной вязкости от температуры  $T$  также варьируется весьма широко: от приблизительно прямо пропорциональной (с возрастанием от  $0.4 \times 10^{21} \text{ с}^{-1}$  при  $T = 0.5$  МэВ до  $7.6 \times 10^{21} \text{ с}^{-1}$  при  $T = 4$  МэВ) до обратно пропорциональной квадрату температуры (прямо пропорциональной времени релаксации нуклонного движения), как это должно быть для ферми-жидкости. Ситуация осложняется тем, что ядерное трение не является экспериментально наблюдаемой величиной и должно извлекаться из большого числа экспериментально

наблюдаемых величин. В связи с этим возникает необходимость создания микроскопических моделей для расчета коэффициентов трения и диффузии.

Хотя многие свойства деления и 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 ограничено марковским пределом (мгновенная диссипация, гауссовские дельта-коррелированные флуктуации) и пределом слабой связи или высоких температур. Нелокальность диссипации обычно не принимается во внимание при описании достаточно быстрых процессов, например, 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 деления. До сих пор нет модели, которая учитывала бы все квантовые эффекты и эффекты немарковости при прохождении через потенциальный барьер.

Подбарьерные процессы играют важную роль в различных процессах в ядерной физике, например, в захвате налетающего ядра ядром-мишени при энергии около кулоновского барьера, или в спонтанном делении ядер. Теория открытых квантовых систем хорошо подходит для описания подбарьерных процессов и, соответственно, необходимо развитие этой теории.

### Целью работы

является разработка формализма для описания коллективной ядерной диссипативной динамики реакций слияния, квазиделения, деления и многонуклонных передач при низких энергиях, и изучение на его основе влияния квантовых статистических эффектов на процессы захвата бомбардирующего ядра ядром-мишени и вынужденного деления.

### Научная новизна и практическая ценность.

- В рамках микроскопического подхода получена система нелинейных уравнений Ланжевена в пределе общей связи между коллективной и внутренней (бозонной или фермионной) подсистемами. Исходя из немарковских уравнений Ланжевена разработана новая методика получения транспортных коэффициентов, зависящих явно от времени. Для немарковской динамики получены наборы диффузионных коэффициентов, которые сохраняют состояние системы чистым. Полученные аналитические формулы могут быть использованы для описания флуктуационно-диссипационной динамики ядерных реакций слияния, квазиделения, многонуклонных передач и деления. Развитый подход полезен при описании времен жизни метастабильных систем, переходных процессов и декогерентности в квантовых системах.
- Разработан новый численный метод решения мастер-уравнения для редуцированной матрицы плотности и эквивалентного ему квантового диффузионного уравнения для функции Вигнера. Данный метод полезен для изучения под- и надбарьерных процессов. Впервые показано, что координатная зависимость диффузионных коэффициентов завышает или занижает скорость распада метастабильного состояния на несколько порядков в зависимости от соотношения значений диффузионных коэффициентов на барьере и в минимуме потенциальной ямы.
- Развитый микроскопический подход и численный метод решения мастер-уравнения для матрицы плотности использован для изучения влияния квантовых статистических эффектов на процессы захвата налетающего ядра ядром-мишени и деления ядер. Впервые рассчитаны переходные времена деления в рамках квантовой диффузионной модели. Показано, что в сильно возбужденных ядрах деление затруднено из-за переходных эффектов. Это можно эффективно описать в рамках статистической модели с модификацией Крамерса, используя большие значения коэффициента трения.

- Изучена роль статической деформации ядра-мишени или налетающего ядра в процессе захвата в ядро-ядерном столкновении. С учетом вероятности захвата, рассчитаны сечения образования трансурановых элементов в реакциях слияния при подбарьерных энергиях.

**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 в институте теоретической физики Университета г.Гиссен (Германия) и на международной семинаре “Ядерная теория и астрофизические применения” (Дубна, 2007).

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

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения общим объемом 114 страниц, включая 52 рисунков и список цитированной литературы из 175 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 уравнений Ланжевена для затухающего гармонического и перевернутого осцилляторов в пределе общей связи между коллективной и внутренней (бозонной или фермионной) подсистемами. Показано, что уравнения движения для коллективной подсистемы удовлетворяют квантовым флуктуационно-диссипационным 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. Дано микроскопическое обоснование аксиоматического подхода Линдблада.

Для немарковской динамики получены наборы диффузионных коэффици-

ентов, которые сохраняют состояние системы чистым.

В случае затухающего осциллятора и линейной связи по импульсу изучены асимптотики корреляционных функций. Показано, что при низких температурах осциллятор имеет степенной закон распада корреляционных функций в пределе больших времен. Такое поведение не наблюдается в классическом пределе высоких температур, где имеет место экспоненциальный распад.

**Во второй главе** используя развитый в первой главе микроскопический подход для описания динамики открытых квантовых систем, рассчитана проницаемость потенциального барьера. Рассмотрена эволюция двойной ядерной системы по коллективным координатам массовой асимметрии и относительного расстояния. Показано, что для рассматриваемых коллективных координат значения микроскопических диффузионных коэффициентов для гармонического и перевернутого осцилляторов близки. Различие значений коэффициентов диффузии для гармонического и перевернутого осцилляторов уменьшается с ростом температуры. Значения асимптотических коэффициентов диффузии меняются непрерывно при переходе от гармонического осциллятора к перевернутому осциллятору. Установлены ограничения для использования при низких температурах микроскопических диффузионных коэффициентов перевернутого осциллятора.

Показано, что в пределе сильного затухания проницаемость параболического барьера по координате массовой асимметрии (относительного расстояния), рассчитанная с помощью зависящих от времени микроскопических коэффициентов диффузии для перевернутого осциллятора, оказываются больше в 7 – 8 (3 – 4) раз, чем проницаемость, рассчитанная с помощью постоянного феноменологического коэффициента диффузии по импульсу.

Расчеты показывают, что с затуханием растут квантовые эффекты. Эти эффекты могут быть достаточно сильными при низких температурах. Для иллюстрации показано, что квантовые статистические эффекты увеличивают вероятность прохождения через кулоновский барьер, т.е. вероятность формирования двойной ядерной системы. Полученные результаты подтверждают, что

квантовая природа перехода через барьер должна быть учтена при расчете сечения захвата в ядро-ядерном столкновении.

Показано, что рост проницаемости с кинетической энергией является достаточно слабой, особенно при больших трениях. Для энергий достаточно ниже кулоновского барьера наблюдается рост проницаемости с диссипацией. Это объясняется уменьшением скорости диссипации энергии коллективной подсистемы из-за малости кинетической энергии и большого значения коэффициента диффузии по импульсу.

**В третьей главе** решая мастер-уравнение для приведенной матрицы плотности для квантовой нелинейной коллективной подсистемы, обнаружено сильное влияние диффузионных коэффициентов, зависящих от координаты, на скорость распада метастабильного состояния при низких температурах (выше температуры перехода от термического режима к туннельному режиму). Полученные результаты расчетов скорости распада при низких температурах показывают, что координатную зависимость диффузионных коэффициентов необходимо учитывать в случае сложных потенциалов. Пренебрегая координатной зависимостью диффузионных коэффициентов при низких температурах, можно повысить или понизить скорость распада на несколько порядков в зависимости от соотношения значений диффузионных коэффициентов на барьере и в минимуме потенциальной ямы. Влияние координатной зависимости диффузионных коэффициентов на скорость распада намного сильнее, чем влияние квантовых эффектов из-за негармоничности потенциала. Данный эффект может быть важным в процессе спонтанного или вынужденного деления.

Асимптотические значения скорости распада, полученные с феноменологическими и микроскопическими диффузионными коэффициентами, близки. Поэтому существует возможность феноменологического описания процесса распада. Однако использование феноменологических диффузионных коэффициентов для потенциала с отрицательной жесткостью ограничено условием  $\text{ctg}[\hbar\tilde{\omega}(q)/(2T)] \geq 0$ .

Показано, что при низких температурах квазистационарная вероятность рас-



пада может даже расти с увеличением трения, особенно с диффузионными коэффициентами, зависящими от координаты. Это можно объяснить тем, что при низких температурах роль диффузии усиливается по сравнению с ролью трения в процессе распада.

В четвертой главе деление возбужденных ядер рассматривается как результат квантовых статистических флуктуаций через седловую точку. С помощью точного численного решения квантового мастер-уравнения для приведенной матрицы плотности показано влияние квантовых статистических эффектов на зависимость от времени процесса деления. Показано, что асимптотические скорости деления в квантовом и классическом случаях практически совпадают. В квантовом случае переходные времена больше в 2 раза, чем в классическом случае, основанном на уравнении Ланжевена. При коэффициенте трения  $\hbar\lambda_p \approx 1$  МэВ переходное время меняется от  $10^{-21}$  с до  $4 \times 10^{-21}$  с с уменьшением температуры от  $T=5$  МэВ до  $T=0.7$  МэВ. Тогда как время деления меняется от  $10^{-21}$  до  $5.4 \times 10^{-19}$  с. Показано, что скорость деления и переходное время не чувствительны к разумному изменению начального гауссовского пакета при фиксированном значении коллективной энергии.

Установлено, что аналитическая формула Крамерса с термодинамической температурой или с эффективной квантовой температурой достаточно хорошо работает как в режиме слабой, так и сильной связи. Скорость деления, полученная с помощью формулы Крамерса, достаточно точно воспроизводит скорость деления в области значений  $0.66 \text{ МэВ} \leq \hbar\lambda_p \leq 6.6 \text{ МэВ}$  и  $0.7 \text{ МэВ} \leq T \leq 5 \text{ МэВ}$ . Показано существование квазистационарного режима скорости потока вероятности через барьер при температурах  $T > B_f$ , где  $B_f$  – барьер деления. Поэтому аналитическая формула Крамерса может быть использована при  $T > B_f$ .

Значение переходного времени определяет вес нейтронного канала распада на ранней стадии эволюции. Когда при больших энергиях возбуждения ( $E_{CN}^* \geq 100$  МэВ) среднее время эмиссии нейтрона  $\tau_n$  становится сопоставимым или меньше, чем переходное время, отклонение вероятности деления от стандартного значения статистической модели становится существенно боль-

шим на первых шагах каскада девозбуждения. Оказывается, что в сильно возбужденных ядрах деление затруднено из-за переходных эффектов. Это можно эффективно описать в рамках статистической модели с модификацией Крамерса (но без переходных эффектов), используя большие коэффициенты трения. Однако с такими эффективно большими коэффициентами трения нельзя описать другие экспериментальные наблюдаемые, например, полную кинетическую энергию фрагментов деления.

Формализм редуцированной матрицы плотности применен для описания процесса захвата налетающего ядра ядром-мишени. Рассмотрен диапазон энергий налетающего ядра  $\Delta E(0)$  от 0 до 50 МэВ над кулоновским барьером при значениях коэффициента трения  $\hbar\lambda_p$  от 0.5 до 3 МэВ и углового момента  $L$  от 0 до 80. Для рассмотренных параметров установлено характерное время захвата:  $\tau \approx 2.2 \hbar/\text{МэВ}$ . Показано, что координатная зависимость диффузионных коэффициентов достаточно слабая в околосбарьерной области. Найдены оптимальные значения энергии налетающего ядра, приводящие к максимальным значениям вероятности захвата при разных значениях коэффициента трения. Исследована зависимость вероятности захвата от углового момента  $L$ . Показано существование оптимального углового момента для процесса захвата. Ограничение снизу для  $L$  в данных расчетах не наблюдается, поскольку из-за учета квантовых статистических флуктуаций зависимости вероятности захвата от  $L$ ,  $E_{\text{с.м.}}$  и трения становятся более плавными.

Показано, что рассмотрение статической деформации ядра-мишени или налетающего ядра позволяет достаточно надежно описывать вероятность захвата при энергии бомбардировки  $E_{\text{с.м.}}$  ниже эффективного кулоновского барьера для сферических ядер. Используя найденные вероятности захвата, рассчитаны сечения образования испарительных остатков в реакциях  $^{16}\text{O}+^{233}\text{U}$ ,  $^{40}\text{Ar}+^{204,206,208}\text{Pb}$ ,  $^{48}\text{Ca}+^{172}\text{Yb}$ ,  $^{50}\text{Ti}+^{198}\text{Pt}$  при подбарьерных энергиях бомбардировки. Результаты, полученные в этой главе, оказываются в хорошем согласии с имеющимися экспериментальными данными (рис. 1 и 2).

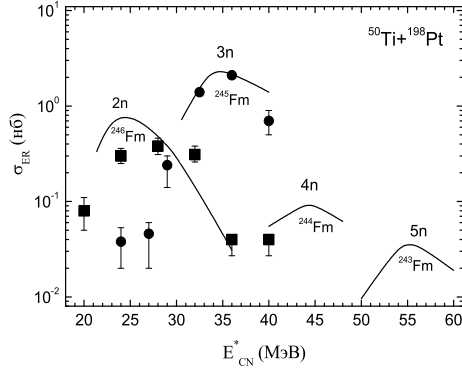


Рис.1. Рассчитанные (сплошные линии) сечения функций возбуждения и испарительных остатков для указанных  $nl$  испарительных каналов в реакции  $^{50}\text{Ti}+^{198}\text{Pt}$ . Экспериментальные данные показаны значками.

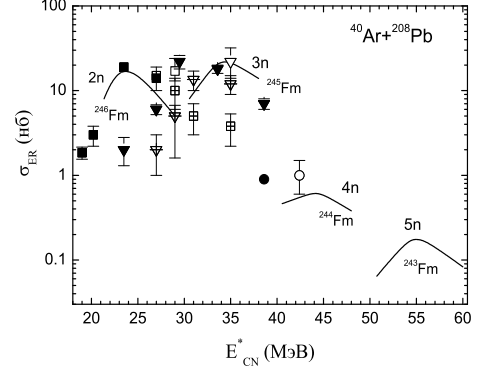


Рис.2. То же, что и на рис.1, но для реакции  $^{40}\text{Ar}+^{208}\text{Pb}$ .

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

**На защиту выдвигаются следующие результаты.**

- В рамках микроскопического подхода и в случае общей связи между коллективной и внутренней (бозонной или фермионной) подсистемами получена система нелинейных немарковских уравнений Ланжевена, удовлетворяющая квантовым флуктуационно-диссипационным соотношениям и соотношению неопределенности. Разработана новая методика получения транспортных коэффициентов, зависящих явно от времени.
- Развитый микроскопический подход использован для рассмотрения влияния квантовых и тепловых флуктуаций на эволюцию двойной ядерной системы. Показано, что квантовые статистические эффекты увеличивают вероятность прохождения через кулоновский барьер, т.е. вероятность формирования двойной ядерной конфигурации. Для энергий достаточно ниже кулоновского барьера наблюдается рост проницаемости с диссипацией. Установлено, что в пределе сильного затухания, проницаемость потенциального барьера по координате массовой асимметрии (относительного

расстояния), рассчитанная с помощью зависящих от времени микроскопических коэффициентов диффузии, оказываются больше в 7-8 (3-4) раз, чем проницаемость, рассчитанная с помощью постоянного феноменологического коэффициента диффузии по импульсу.

- Обнаружено сильное влияние диффузионных коэффициентов, зависящих от координаты, на скорость распада при низких температурах (выше температуры перехода от термического режима к туннельному режиму). Влияние координатной зависимости диффузионных коэффициентов на скорость распада намного сильнее, чем влияние квантовых эффектов из-за негармоничности потенциала. Данный эффект может быть важным в процессах спонтанного и вынужденного деления. Разработан новый численный метод решения мастер-уравнения для редуцированной матрицы плотности и эквивалентного ему диффузионного уравнения для функции Вигнера.
- Формализм приведенной матрицы плотности применен для описания процессов деления и захвата налетающего ядра ядром-мишени. Установлено, что в квантовом подходе переходные времена деления больше примерно в 2 раза, чем в классическом подходе, основанном на уравнении Ланжевена. Показано, что при анализе экспериментальных данных по делению сильно возбужденных ядер ( $E_{CN}^* \geq 100$  МэВ) следует учитывать увеличение переходного времени и множественности предразрывных нейтронов за счет квантовых эффектов, а не за счет увеличения ядерной вязкости. Показано, что аналитическая формула Крамерса с термодинамической температурой или с эффективной квантовой температурой достаточно хорошо описывает скорость деления, как в режиме слабой, так и сильной связи.
- Найдены оптимальные значения энергии бомбардировки, приводящие к максимальным значениям вероятности захвата налетающего ядра ядром-мишенью при разных значениях коэффициента трения и углового момента. Не обнаружен эффект  $L$  – окна, предсказанный в классических моделях без учета статистических флуктуаций. Изучена роль статической деформации

ции ядра-мишени или налетающего ядра в процессе захвата при энергиях столкновения ниже эффективного кулоновского барьера для сферических ядер. Получено хорошее описание сечений испарительных остатков в реакциях слияния при подбарьерных энергиях.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. В.В. Саргсян, З. Канокон, Г.Г. Адамян, Н.В. Антоненко, *Квантовые немарковские уравнения Ланжевена и транспортные коэффициенты*, ЯФ **68**, 2071 (2005).
2. Г.Г. Адамян, Н.В. Антоненко, З. Канокон, В.В. Саргсян, *Квантовые немарковские уравнения Ланжевена*, ТМФ **145**, 87 (2005).
3. V.V. Sargsyan, Yu.V. Palchikov, Z. Kanokov, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, *Decay rate with coordinate-dependent diffusion coefficients*, Physica **A 386**, 36 (2007).
4. V.V. Sargsyan, Yu.V. Palchikov, Z. Kanokov, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, *Coordinate-dependent diffusion coefficients: Decay rate in open quantum systems*, Phys. Rev. **A 75**, 062115 (2007).
5. V.V. Sargsyan, Yu.V. Palchikov, Z. Kanokov, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, *Fission rate and transient time with a quantum master equation*, Phys. Rev. **C 76**, 064604 (2007).
6. V.V. Sargsyan, Z. Kanokov, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, *Quantum non-Markovian Langevin formalism for heavy ion reactions near Coulomb barrier*, Phys. Rev. **C 77**, 024607 (2008).
7. В.В. Саргсян, З. Канокон, Г.Г. Адамян, Н.В. Антоненко, *Квантовые немарковские уравнения Ланжевена для перевернутого осциллятора*, ТМФ **156**, 307 (2008).

8. В.В. Саргсян, А.С. Зубов, Э. Каноков, Г.Г. Адамян, Н.В. Антоненко, *Квантовомеханическое описание начальной стадии реакции слияния*, Препринт **JINR-P4-2008-32** (ЯФ в печати).