

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
имени Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА**

На правах рукописи  
УДК 539.173

**ЕРЕМЕНКО ДМИТРИЙ ОЛЕГОВИЧ**

**ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ВЫНУЖДЕННОГО ДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР**

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва – 2008



Работа выполнена в Научно-исследовательском институте ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук,  
профессор

М.Г.Иткис  
(ОИЯИ, г. Дубна)

доктор физико-математических наук,  
профессор

И.М.Капитонов  
(физический факультет МГУ  
кафедра общей ядерной физики)

доктор физико-математических наук

В.В.Самарин  
(Чебоксарский политехнический  
институт, филиал  
Московского  
Государственного Открытого  
Университета)

**Ведущая организация:**

Физический факультет Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург.

Защита состоится "31" октября 2008 г. в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.77 в МГУ имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, корпус 19, аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ

Автореферат разослан "22" сентября 2008 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций  
доктор физико-математических наук,  
профессор

  
С.И.Страхова

## **Общая характеристика работ**

Диссертация посвящена исследованию динамики процесса вынужденного деления тяжелых атомных ядер в широкой области энергий возбуждения. Особое место уделяется развитию представлений о механизме формирования угловых распределений осколков деления, а также соответствующих теоретических подходов, учитывающих стохастическую природу коллективного ядерного движения, явление ядерной диссипации и влияние оболочечных эффектов на структуру барьера деления.

## **Актуальность темы**

В современной ядерной физике исследования реакции деления занимают уникальное положение. Это, прежде всего, связано с тем что, при изучении деления атомных ядер мы имеем дело с системой, которая, с одной стороны, уже достаточно сложна, для того чтобы проявлялись статистические закономерности в наблюдаемых характеристиках ядерного деления. С другой же стороны, делящееся ядро имеет конечные размеры и число частиц, вследствие чего индивидуальные особенности отдельных ядер не только наблюдаемы, но и играют существенную роль. Так, например, механизм ядерного деления при низких энергиях возбуждения существенным образом зависит от оболочечной структуры делящихся ядер не только при равновесной деформации, но и во всех промежуточных сильнодеформированных состояниях. Важную роль в развитии наших представлений о влиянии оболочечных эффектов на процесс деления сыграл метод оболочечной поправки, предложенный В.М.Струтинским [1]. В рамках этого метода было показано, что большинство тяжелых ядер имеет характерную двугорбую форму барьера деления. Представления о двугорбом барьере деления позволили с единых позиций объяснить природу спонтанно делящихся изомеров, подбарьерных делительных резонансов и многое др. [1]. Существование двух классов возбужденных состояний у

тяжелых ядер в первой и второй потенциальных ямах двугорбого барьера оказывает существенное влияние и на длительность распада таких систем. Так, для целого ряда изотопов  $Nr$ ,  $Pu$ ,  $Pa$  и  $U$  в НИИЯФ МГУ была экспериментально обнаружена временная задержка вынужденного деления по сравнению с длительностью их распада по каналам, связанным с испарением легких частиц [2]. Природа этой задержки обусловлена конечным временем жизни возбужденных состояний второй потенциальной ямы. Отметим, что анализ экспериментальных данных по длительностям протекания реакций вынужденного деления, выходам изомеров формы, делимостиам и др. до сих пор проводился лишь в рамках статистической теории ядерных реакций [1,2]. При этом предполагалось полное затухание коллективного ядерного движения во второй потенциальной яме, которое является результатом необратимого перехода кинетической энергии коллективного ядерного движения в энергию возбуждения делящейся системы при ее движении по потенциальной поверхности. Необходимость обоснования такого предположения делает актуальной задачу детального количественного анализа нестационарной картины изменения деформации ядра при прохождении им второй потенциальной ямы.

Эта задача тесно связана с проблемой описания коллективного ядерного движения большой амплитуды. Существующие в настоящий момент микроскопические модели коллективного ядерного движения, связанного с делением, к сожалению, не в состоянии обеспечить приемлемого уровня описания экспериментальных данных. В сложившейся ситуации перспективными являются подходы, использующие идеи и методы неравновесной статистической механики [3]. В рамках таких подходов выделяется небольшое число коллективных степеней свободы, наиболее важных для рассматриваемой задачи, которые взаимодействуют с остальными – одночастичными степенями свободы, “ядерным термостатом”. Динамика коллективных степеней свободы описывается с

помощью либо уравнения Фоккера-Планка, либо стохастических уравнений Ланжевена. При использовании таких подходов базовыми являются представления об иерархии характерных времен релаксации и механизме ядерной диссипации.

Понимание важной роли явления ядерной диссипации в процессах, включающих коллективное движение ядерной материи большой амплитуды, является одним из самых интересных и ярких достижений последних лет [3-5]. К наиболее характерной реакции, связанной с крупномасштабным коллективным ядерным движением следует отнести вынужденное деление. Активное использование концепции диссипации в физике деления началось с работ, посвященных исследованию её влияния на характеристики массово-энергетических распределений осколков. К другой группе работ, посвященных изучению влияния диссипации на процесс деления, следует отнести исследования, так или иначе, связанные с анализом длительности распада возбужденных ядер [3-5]. Такие исследования обусловлены необходимостью развития новых подходов к описанию экспериментальных данных по множественностям легких частиц и  $\gamma$ -квантов в реакциях с тяжелыми ионами. Развитие подходов, учитывающих влияние ядерной вязкости при анализе экспериментальных данных не только по множественностям легких частиц, но и по делимостям привело к пересмотру представлений о временном масштабе процесса деления. Так было показано, что длительность деления может существенно превышать величину, определяемую в рамках стандартной статистической теории ядерных реакций. Кроме того, оказалось, что при энергиях возбуждения свыше 100 МэВ длительность эволюции делящейся системы от седловой конфигурации до разрывной играет существенную роль в полной длительности распада [4,5]. Процесс эмиссии легких частиц на этом этапе оказывает заметное влияние на значения соответствующих предразрывных множественностей. В целом же, длительность реакции



вынужденного деления является уникальной характеристикой, детальное изучение которой, позволяет получить новую информацию о плотности уровней, параметрах барьеров деления, диссипативных процессах и др. Тем не менее, до сих пор, полная картина развития процесса вынужденного деления во времени остается во многом неясной и противоречивой, что и стимулирует нарастающий интерес к изучению временных аспектов реакции вынужденного деления как у теоретиков, так и у экспериментаторов. Все сказанное свидетельствует об актуальности проблемы поиска новых наблюдаемых (и разработки соответствующих теоретических подходов для их анализа), связанных как непосредственно с самой длительностью реакции вынужденного деления, так и с процессами, определяющими ее (например, с ядерной диссипацией). Анализ экспериментальных данных по множественностям легких частиц,  $\gamma$ -квантов, сечениям образования остатков испарения, делимостям и характеристикам массово-энергетических распределений осколков деления не позволил сделать однозначный вывод о механизмах ядерной диссипации [3-5]. По-видимому, это обусловлено тем фактом, что коэффициент затухания делительной моды не является непосредственно измеряемой величиной. Следовательно, представляется актуальным расширение круга наблюдаемых величин, анализ которых позволит получать информацию о механизме ядерной диссипации. В настоящей диссертации показано, что для этих целей, могут служить угловые распределения выхода осколков вынужденного деления тяжелых ядер. Отметим, что для анализа угловых распределений осколков деления, традиционно используется модель переходных состояний в седловой точке барьера деления. В рамках этой модели угловые распределения зависят от взаимной ориентации полного углового момента  $J$  и оси деления в седловой точке. Предполагается, что распределение по проекции  $J$  на ось деления (характеризуемой величиной  $K$ ) в седловой точке становится равновесным и не изменяется при

дальнейшей эволюции делящейся системы вплоть до точки разрыва. Последнее означает, что время перехода от седловой точки до точки разрыва ( $\tau_{ss} \sim 10^{-20} c$  [4,5]) много меньше времени релаксации степени свободы, связанной с  $K$  ( $\tau_K$ ). Однако, для реакций с тяжелыми ионами статистическая модель переходных состояний не обеспечивает приемлемого уровня описания экспериментальных данных по угловым распределениям осколков деления [6,7]. Так результаты анализа большой совокупности экспериментальных данных, проведенного в [7], свидетельствуют, что эффективная переходная точка, в которой реализуются переходные состояния, может находиться между седловой точкой и точкой разрыва. Следовательно, угловые распределения осколков деления содержат, хотя и неявно, информацию о времени перехода делящейся системы между некоторыми выделенными состояниями на ее потенциальной поверхности (например, между седловой точкой и точкой разрыва). Таким образом, разработка динамических подходов, позволяющих взаимосогласованным образом рассчитывать угловые распределения осколков деления, множественности легких частиц, длительности протекания реакций деления (и др.) является актуальной задачей. Анализ экспериментальных данных, в рамках таких подходов, откроет новые перспективы в изучении времен протекания различных стадий реакции вынужденного деления, механизма ядерной диссипации.

### **Основные результаты диссертации**

В диссертации получены следующие новые результаты:

1. Развита новый теоретический подход к анализу угловых распределений осколков деления возбужденных тяжелых ядер при температурах сравнимых с величиной барьера деления или превышающих её. Основой подхода является объединение представлений статистической теории о существовании эффективных переходных состояний в некоторой точке потенциальной поверхности делящихся

ядер и методов, базирующихся на использовании уравнений Ланжевена для моделирования коллективного ядерного движения. Выполненный анализ экспериментальных данных для реакций, приводящих к образованию составных ядер от  $Th$  до  $Rf$  с энергиями возбуждения выше  $50 \text{ МэВ}$ , позволил:

- связать процесс формирования угловых распределений осколков с длительностями протекания различных стадий вынужденного деления;
- объяснить поведение анизотропии угловых распределений осколков деления для рассматриваемых систем значительной шириной распределения по положениям эффективных переходных точек в пространстве коллективных переменных;
- сформулировать основные физические требования к динамической модели угловых распределений осколков деления.

2. Создана принципиально новая динамико–стохастическая модель процесса вынужденного деления, в рамках которой, величина проекции углового момента системы на ось деления рассматривается как самостоятельная динамическая переменная, определяющая, наравне с другими коллективными переменными, величину потенциальной энергии, и испытывающая термодинамические флуктуации на протяжении всей эволюции делящейся системы.
3. В рамках динамико-стохастической модели показано, что в случае деления возбужденных трансурановых ядер существенное влияние на процесс формирования угловых распределений осколков деления оказывают эффекты “памяти” о входном канале реакции слияния деления. Предложен способ расчета начальных распределений по проекции углового момента на ось симметрии делящейся системы, образующейся при слиянии деформированных ядер.
4. В рамках развитых теоретических подходов проведен анализ экспериментальных данных по



- угловым распределением осколков деления для реакций  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (84 \div 160)$  МэВ,  $^{12}\text{C} + ^{236}\text{U}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (59 \div 124)$  МэВ,  $^{12}\text{C} + ^{235}\text{U}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (59 \div 72)$  МэВ,  $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (71 \div 125)$  МэВ,  $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (84 \div 235)$  МэВ,  $^{11}\text{B} + ^{237}\text{Np}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (57 \div 113)$  МэВ,  $^{16}\text{O} + ^{248}\text{Cm}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (103 \div 140)$  МэВ,  $^{19}\text{F} + ^{208}\text{Pb}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (79 \div 175)$  МэВ и  $^{16}\text{O} + ^{209}\text{Bi}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (87 \div 155)$  МэВ;

- множественностям предразрывных нейтронов для реакций  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (71 \div 110)$  МэВ,  $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (72 \div 120)$  МэВ;

- длительностям вынужденного деления ураноподобных ядер в диапазоне энергий возбуждения от 15 до 250 МэВ.

Показано, что разработанные подходы позволяют описать всю совокупность указанных экспериментальных данных, и объясняют основные наблюдаемые тенденции в поведении угловых распределений осколков деления для реакций с тяжелыми ионами.

5. Показано, что предложенные теоретические подходы открывают новые перспективы в изучении механизма ядерной диссипации, временных аспектов процесса вынужденного деления и механизма реакции полного слияния–деления. Анализ экспериментальных данных в рамках развитых подходов позволил:

- определить значение коэффициента редукции для отдельного механизма ядерной вязкости  $k_s = 0.2$ ;

- показать, что степень свободы связанная с проекцией углового момента на ось симметрии делящегося ядра, характеризуется временем релаксации  $\tau_K \sim 10^{-20}$  с.

6. Предложен метод расчета вероятности заселения второй потенциальной ямы двугорбого барьера деления, основанный на использовании уравнения Фоккера-Планка для моделирования эволюции делящейся системы. На основе этого метода развит новый подход к проблеме описания угловых распределений осколков вынужденного деления, учитывающий двугорбую структуру барьера и явление

ядерной диссипации. Анализ экспериментальных данных для реакций  $\alpha + {}^{238}\text{U}$  при  $E_\alpha = 37$  и  $43$  МэВ и  $\alpha + {}^{232}\text{Th}$  при  $E_\alpha = 30$  и  $42$  МэВ, выполненный в рамках этого подхода, позволил оценить величину коэффициента затухания коллективного ядерного движения во второй потенциальной яме  $\beta = (0.2 \div 0.5) \times 10^{21} \text{ c}^{-1}$ .

7. Предложен новый подход к изучению температурной зависимости оболочечных эффектов. Ключевым моментом этого подхода является связь между наблюдаемыми угловыми распределениями осколков деления и временем жизни возбужденных состояний второй ямы двугорбого барьера. Совместный анализ экспериментальных данных для реакции  $\alpha + {}^{238}\text{U}$  по анизотропии угловых распределений осколков деления при  $E_\alpha = (20 \div 100)$  МэВ и длительностям деления при  $E_\alpha = (19 \div 32)$  МэВ позволил сделать вывод о сохранении влияния оболочечных эффектов на структуру барьера деления вплоть до энергий возбуждения (50-60) МэВ.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обеспечена использованием современных подходов к описанию процесса вынужденного деления, вычислительных методов и расчетных моделей. Она также подтверждена согласием с имеющимися экспериментальными данными по угловым распределениям осколков деления, множественностям легких частиц, длительностям вынужденного деления и с выводами работ других авторов

### **Личный вклад автора**

В работах по теме диссертации, выполненных с соавторами, автору диссертации принадлежат постановка тех задач, которые вошли в основные положения диссертации, разработка теоретических подходов, отраженных в диссертации, их программная реализация, проведение численных расчетов и

теоретического анализа экспериментальных данных. В частности, автором лично разработана динамико-стохастическая модель вынужденного деления, методы расчета вероятности заселения второй потенциальной ямы двугорбого потенциала деления, теоретические подходы к описанию угловых распределений осколков деления, учитывающие оболочечные эффекты и особенности входного канала реакций слияния-деления.

### **Практическая ценность работы**

В диссертации разработан ряд принципиально новых теоретических подходов к проблеме описания угловых распределений осколков вынужденного деления тяжелых ядер, учитывающих стохастическую природу коллективного ядерного движения, явление ядерной диссипации и влияние оболочечных эффектов на структуру барьера деления. Предложен новый метод получения информации о температурной зависимости оболочечной структуры барьера деления. Анализ экспериментальных данных в рамках разработанных подходов позволил получить ряд важных результатов, касающихся характерных времен релаксации для степени свободы, связанной с проекцией углового момента на ось деления, величины коэффициента затухания делительной моды и характерной температуры исчезновения оболочечных эффектов. Кроме того, в настоящее время в мире активно развивается ряд прикладных исследований (создание ядерных энергетических установок нового типа, трансмутация отходов ядерной энергетики и т.д.). Такие исследования вывели на передний план проблему разработки теоретических моделей вынужденного деления тяжелых ядер, включающих детальное рассмотрение всех стадий этого процесса, и позволяющих проводить количественное описание разнообразных экспериментальных данных, связанных с ядерным делением, в широкой области энергий возбуждения, что также определяет практическую ценность диссертации. Полученные в диссертации результаты

могут найти свое применение в экспериментальных исследованиях процесса вынужденного деления тяжелых ядер, которые проводятся в ряде российских и зарубежных научных центрах (НИИЯФ МГУ, РНЦ «Курчатовский институт», ЛЯР ОИЯИ, ФЭИ (г.Обнинск), ПИАФ (г.Гатчина), GSI (Дармштадт, Германия) и INFN (Италия)).

### **Апробация работы**

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах НИИЯФ МГУ, ЛЯР ОИЯИ, университетов г. Болонья и г. Мессина (Италия), Ускорительной Лаборатории Леньяро (Италия), а также на международных конференциях:

- 1) Международный симпозиум по временным характеристикам ядерных реакций, Москва (1993);
- 2) Международный симпозиум по крупномасштабному коллективному движению атомных ядер, Италия (1996);
- 3) Международная конференция “Ядерные данные для науки и технологий” Италия (1997);
- 4) Международная конференция по ядерной физике, Франция (1998);
- 5) Международный семинар по физике ядерного деления, Обнинск (1998);
- 6) Международная конференция “Болонья-2000, Структура ядра в конце столетия “ Италия (2000);
- 7) II Международная конференция “Фундаментальные проблемы физики”, Россия (2000);
- 8) Международная конференция “Ядерная физика на границах стабильности“, Италия (2001);
- 9) Международный симпозиум “Новые перспективы и направления исследований в ядерной физике”, Италия (2002);
- 10) Международные школы-семинары по физике тяжелых ионов ОИЯИ, г. Дубна, (1993,1997,2002);



- 11)Международный симпозиум по ядерной физике “Тур-2003”, Франция (2003);
- 12)Международные конференции по ядро-ядерным столкновениям, Италия (1993), Москва (2003);
- 13)Международные конференции по атомным столкновениям в твердых телах, Индия (2003), Италия (2004);
- 14)IV Всероссийская конференция “Университеты России – фундаментальные исследования”, Москва (2003);
- 15)Международные совещания по спектроскопии и структуре атомного ядра (1990, 1991, 1992, 1996, 1997, 1998, 2000, 2001, 2002, 2003, 2005, 2006)

Исследования, результаты которых вошли в настоящую диссертацию, были поддержаны Российским Фондом Фундаментальных исследований в 1995-1997 гг. (грант № 95-02-05451 “Создания нового метода анализа эволюции делящейся ядерной системы”), в 1999-2000 гг. (грант № 98-02-16911 “Исследование энергетической зависимости оболочечных эффектов в реакциях слияния-деления под действием тяжелых ионов”) и в 2002-2004 гг. (грант № 02-02-17077 “Исследование динамики процесса вынужденного деления тяжелых ядер”).

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из Введения, 5-ти глав и Заключения. Общий объем диссертации – 230 страниц. Она содержит 3 таблицы, 65 рисунков и список цитируемой литературы, включающий 223 наименования.

### **Содержание диссертации**

Во **Введении** содержится краткое изложение истории проблемы, очерчен круг рассматриваемых физических вопросов, сформулированы тема и цели диссертации, обосновывается их актуальность, схематично изложено содержание диссертации и распределение материала по главам, а также перечислены основные положения, которые автор выносит на защиту.

В **главе I** рассмотрены основные методы и подходы, используемые в настоящее время при моделировании динамики процесса вынужденного деления и основанные на применении стохастических уравнений: уравнения Фокерра-Планка или системы уравнений Ланжевена. Обсуждаются основные теоретические представления о механизмах ядерной диссипации. Также описаны основные статистические модели процесса формирования угловых распределений осколков деления, основанные на концепции переходных состояний в характерных точках потенциальной поверхности (седловой точке и точке разрыва). Рассматриваются некоторые проблемы, связанные с использованием статистических подходов при описании экспериментальных данных по угловым распределениям осколков деления в реакциях под действием тяжелых ионов.

В **главе II** рассматриваются вопросы, связанные с влиянием ядерной диссипации на механизм вынужденного деления ядер, обладающих двугорбой структурой барьера деления, обусловленной оболочечными эффектами.

В § II.1 вводятся представления о “прямом” делении, как о процессе прохождения второй потенциальной ямы двугорбого потенциала за времена порядка  $\propto 10^{-21}$  с. Развиваются методы расчетов вероятностей заселения второй потенциальной ямы двугорбого барьера деления (и соответствующей дополнительной величины – вероятности “прямого” деления), основанные на использовании уравнения Фокерра-Планка для описания динамики коллективного ядерного движения. Проанализированы зависимости вероятности заселения второй потенциальной ямы от энергии возбуждения, параметров двугорбого барьера деления и величины коэффициента затухания коллективного ядерного движения. Показано, что значения вероятности заселения второй потенциальной ямы близки к единице уже при малой величине параметра ядерной вязкости в области энергий возбуждения, характерной для экспериментов проводимых на циклотроне НИИЯФ МГУ, а

предположение о полном затухании коллективного движения во второй потенциальной яме тяжелых ядер вполне оправдано.

В § II.2 показано, что информацию о вероятности заселения второй потенциальной ямы можно получить при анализе угловых распределений осколков вынужденного деления. Предложен новый метод расчета угловых распределений осколков вынужденного деления, учитывающий двугорбую структуру барьера деления и явление ядерной диссипации. В рамках предложенного подхода угловые распределения осколков деления рассматриваются как суперпозиция вкладов, обусловленных обеими седловыми точками. Относительные веса этих вкладов определяются вероятностью заселения второй потенциальной ямы, в свою очередь, зависящей от величины коэффициента ядерной вязкости. Анализ экспериментальных данных в рамках предложенной модели открывает новые перспективы в изучении явления ядерной диссипации при низких энергиях возбуждения и деформациях близких к деформации второй потенциальной ямы. В рамках указанного метода проанализированы экспериментальные данные по анизотропии угловых распределений осколков деления для реакций  $\alpha + {}^{238}\text{U}$  при  $E_\alpha = 37$  и  $43$  МэВ и  $\alpha + {}^{232}\text{Th}$  при  $E_\alpha = 30$  и  $42$  МэВ (см. рис.1).

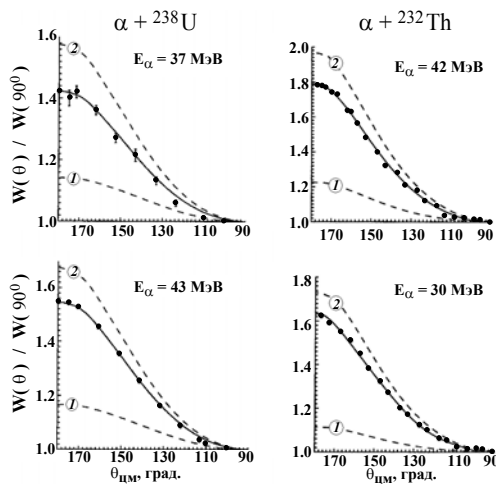


Рис. 1. Угловые распределения осколков деления для реакций  $\alpha + {}^{238}\text{U}$ ,  ${}^{232}\text{Th}$ . Точки – экспериментальные данные [8]. Штриховые кривые, помеченные как (1) и (2), – результаты расчетов, в случаях, когда угловые распределения осколков деления определяются первой или второй седловыми точкам двугорбого барьера деления, соответственно. Сплошная кривая – суперпозиция вкладов от обеих седловых точек.

Установлено значение коэффициента затухания коллективного ядерного движения ( $\beta = (0.2 \div 0.5) \times 10^{21} \text{ c}^{-1}$ ) при деформациях характерных для второй потенциальной ямы и энергиях возбуждения  $E^* = (15 \div 40) \text{ МэВ}$ .

В завершении главы обосновывается необходимость развития динамических подходов к описанию процесса формирования угловых распределений осколков вынужденного деления.

В главе III анализируется возможность создания динамической модели угловых распределений осколков вынужденного деления. Показано, что стохастическая природа коллективного ядерного движения приводит к тому, что наблюдаемые угловые распределения осколков вынужденного деления определяются ансамблем точек в пространстве деформаций, в которых реализуются эффективные переходные состояния. Вес каждой такой точки зависит от соотношения между длительностями протекания различных стадий процесса вынужденного деления.

В § III.1 предложен новый подход к расчету угловых распределений осколков деления ядер, обладающих барьерами деления низкими по сравнению с температурой. Подход объединяет представления статистической теории о существовании эффективных переходных состояний в некоторой точке потенциальной поверхности делящихся ядер и методов, базирующихся на использовании уравнений Ланжевена для моделирования коллективного ядерного движения.

В § III.2 в рамках предложенного подхода и предполагая независимость коэффициента ядерной вязкости и массового коэффициента от деформации, анализируются экспериментальные данные по множественности предразрывных нейтронов и анизотропии угловых распределений осколков деления для реакций  $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$  при  $E_{\text{лаб}} = (110 \div 148) \text{ МэВ}$  и  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$  при  $E_{\text{лаб}} = (120 \div 160) \text{ МэВ}$ ,  $^{16}\text{O} + ^{248}\text{Cm}$  при  $E_{\text{лаб}} = (110 \div 148) \text{ МэВ}$  и  $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$  при  $E_{\text{лаб}} =$



(96 ÷ 148) МэВ. Показано, что разработанный подход позволяет описать указанные экспериментальные данные (см. рис.2), и объяснить поведение анизотропии угловых распределений осколков деления для рассматриваемых систем значительной шириной распределения по положениям эффективных переходных точек в пространстве коллективных переменных.

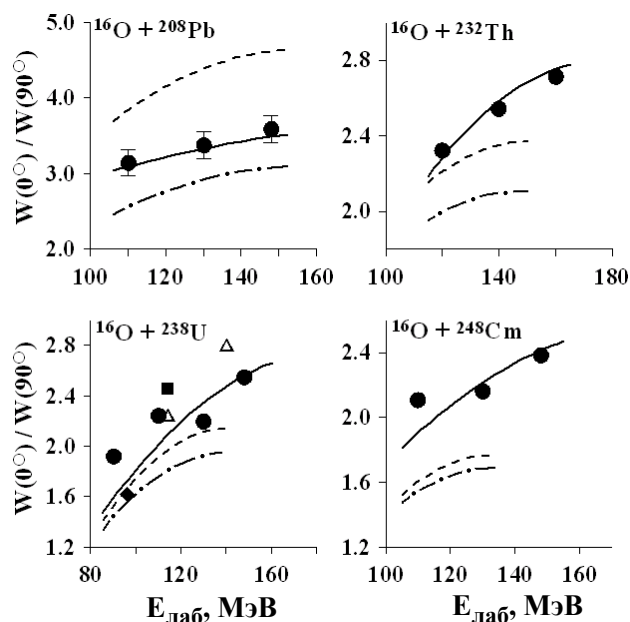


Рис. 2. Анизотропия угловых распределений осколков деления для реакций  $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{238}\text{U}$ . Точки – экспериментальные данные: ● - [9], ■ – [10], ◆ - [11] и Δ - [12]. Сплошные кривые – результаты расчетов, выполненных в рамках предлагаемого подхода. Штрихпунктирные и штриховые кривые - расчеты в рамках стандартной статистической модели переходных состояний в седловой точке барьера деления без учета и с учетом эмиссии нейтронов, соответственно.

На основе анализа экспериментальных данных установлены значения величины коэффициента затухания ( $\beta = 4 \times 10^{21} \text{c}^{-1}$ ) и времени релаксации для степени свободы связанной с  $K$ ,  $\tau_K = (5 \div 6) \times 10^{-21} \text{c}$ .

§ III.3 посвящен анализу влияния начального распределения по угловому моменту делящейся системы, образующейся в реакциях с тяжелыми ионами, на результаты расчетов множественности предразрывных нейтронов и анизотропии угловых распределений осколков деления. Анализ выполнен для реакций  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ ,  $^{16}\text{O} + ^{248}\text{Cm}$  и  $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ . Такой выбор обусловлен тем, что именно в указанных случаях экспериментальные данные по анизотропии угловых распределений осколков деления не могут быть объяснены в рамках стандартных статистических моделей. При этом, использовались распределения трех видов: распределение, полученное на основе модели поверхностного трения; распределение с резким краем; распределение, предсказываемое моделью Вонга. Показано, что изменение вида начального распределения по угловому моменту приводит лишь к изменению полученного значения времени релаксации  $\tau_K$  (в пределах 20-30%). Причем, более широкому начальному распределению соответствуют меньшие значения  $\tau_K$ . Однако, вывод о необходимости учета вкладов всех промежуточных конфигураций между равновесной и разрывной деформациями при анализе угловых распределений осколков деления остается справедливым.

В § III.4 показано, что развитый динамический подход к анализу угловых распределений осколков деления открывает новые возможности в изучении механизма ядерной диссипации. А именно, продемонстрирована чувствительность расчетных угловых распределений к деформационной зависимости коэффициента затухания делительной моды ( $\beta$ ). Для этой цели использовались наиболее популярные на сегодняшний день модели двухтельной и однотельной ядерной диссипации (формула “стена+окно”). При проведении вычислений параметры используемых моделей подбирались исходя из условий наилучшего описания предсказаний систематики значений множественности предразрывных нейтронов в реакциях с тяжелыми ионами. Для расчетов массового

коэффициента использовалось приближение Вернера-Уиллера. Обнаруженная чувствительность результатов вычислений угловых распределений осколков вынужденного деления объясняется различиями в распределении эффективных переходных точек в пространстве деформаций для двух рассматриваемых механизмов ядерной диссипации, см. рис. 3.

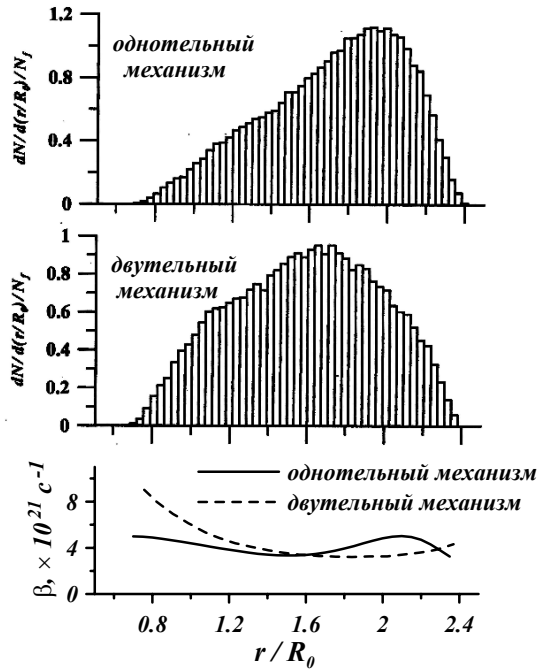


Рис. 3. Распределения по положению эффективной переходной точки при различных механизмах ядерной диссипации для  $^{248}\text{Cf}$  при  $J=40\hbar$ ,  $E^*=110$  МэВ — две верхние гистограммы. Нижний — зависимость коэффициента затухания  $\beta$  от  $r/R_0$  (расстояние между центрами масс формирующихся осколков в радиусах соответствующего сферического ядра).

В заключение впервые сформулирован ряд взаимосвязанных физических требований к полностью динамической модели угловых распределений осколков деления, являющихся обобщением результатов анализа, проведенного в настоящей главе.

В **главе IV** предложена динамико-стохастическая модель процесса формирования угловых распределений осколков деления, не использующая представления о переходных состояниях в какой-либо точке потенциальной поверхности

делящегося ядра. В рамках этой модели величина  $K$  рассматривается как самостоятельная динамическая переменная, испытывающая термодинамические флуктуации на протяжении всей эволюции делящейся системы. Частота таких флуктуаций определяется временем релаксации  $K$ -моды. Угловые распределения осколков деления определяются набором квантовых чисел, с которыми система появляется в точке разрыва (полный угловой момент  $J$ , его проекция на ось деления  $K$  и проекция на ось пучка  $M$ ). Характеристики этого набора в свою очередь зависят от всей предыстории делящейся системы: от начального распределения по  $J$ ,  $K$  и  $M$ ; эмиссии легких частиц и  $\gamma$ -квантов; соотношений между временем релаксации и длительностями протекания различных этапов в эволюции системы (временем жизни ядра вблизи равновесной деформации и седловой точки, временем перехода от седловой конфигурации до разрывной).

В § IV.1 детально рассматривается формализм динамико-стохастической модели. Показано, что эволюцию переменной  $K$  можно описать как случайный скачкообразный процесс, характеризующийся условной вероятностью реализации значения  $K$  в момент времени  $t$ , если в момент времени  $t_1$  система обладала значением  $K=K_1$ :

$$P(K, t | K_1, t_1) = e^{-(t-t_1)/\tau_k} \delta_{K, K_1} + (1 - e^{-(t-t_1)/\tau_k}) P(K).$$

В этом соотношении  $P(K)$  - функция плотности вероятности для значения  $K$  сразу же после “скачка”. Такой стохастический процесс известен как процесс Кубо-Андерсена. Обсуждаются некоторые особенности, связанные с моделированием динамики коллективного ядерного движения (с помощью уравнений Ланжевена) и процесса эмиссии легких частиц и  $\gamma$ -квантов в рамках предложенной динамико-стохастической модели. Показано, что зависимость потенциальной энергии от  $K$  и экспоненциальная зависимость ширины распада по каналу деления от величины барьера ( $B_f(J, K)$ ) приводят к результатам расчетов, близких к предсказаниям статистической модели



переходных состояний в седловой точке барьера деления при невысоких значениях энергии возбуждения и угловых моментов. В качестве иллюстрации предложенной модели обсуждаются результаты расчетов характерных ланжевеновских траекторий на плоскости  $(K, r)$  при различных значениях  $\tau_K$  (рис. 4). Эти расчеты выполнены для ядра  $^{248}\text{Cf}$  без учета эмиссии частиц при  $J=30\hbar$  ( $B_f(K=0)=1.8\text{МэВ}$ ), температуре  $T = 1.5\text{МэВ}$  и постоянном коэффициенте  $\beta=5 \times 10^{21}\text{с}^{-1}$ . Из представленных данных видно, что для самого маленького значения времени релаксации  $\tau_K$  величина  $K$  испытывает большое количество “скачков” на протяжении всей эволюции делящейся системы (вплоть до точки разрыва), что соответствует представлениям о переходных состояниях в точке разрыва. По мере увеличения  $\tau_K$ , “скачки” величины  $K$  все больше и больше группируются вблизи равновесной деформации. Наконец, при максимальном значении величины  $\tau_K$  все скачки происходят до седловой точки.

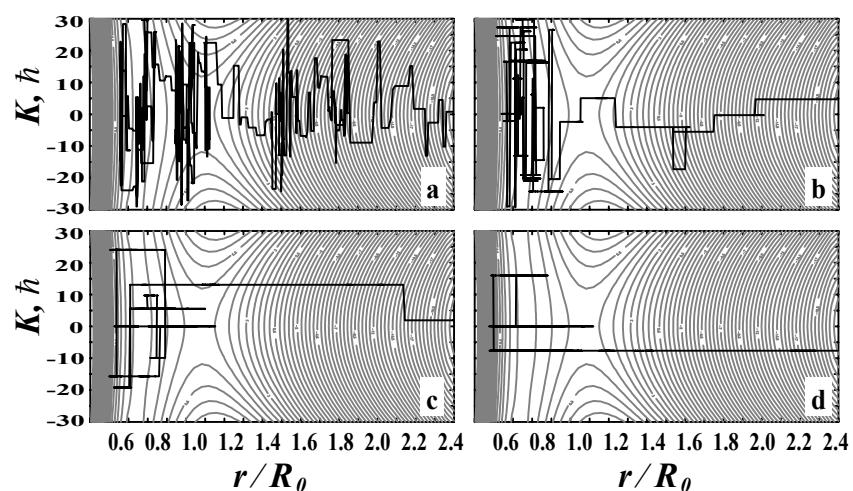


Рис. 4. Потенциальная поверхность как функция  $r$  и  $K$ . Сплошные линии – характерные ланжевеновские траектории при  $\tau_K=0.1 \times 10^{-21}\text{с}$  – (a);  $\tau_K=1. \times 10^{-21}\text{с}$  – (b);  $\tau_K=10. \times 10^{-21}\text{с}$  – (c) и  $\tau_K=100. \times 10^{-21}\text{с}$  – (d).

В этом случае расчеты угловых распределений осколков деления должны приводить к результатам близким к предсказаниям статистической модели переходных состояний в седловой точке барьера деления.

§ IV.2 посвящен анализу экспериментальных данных по анизотропии угловых распределений осколков деления и множественности предразрывных нейтронов в рамках динамической модели для следующих реакций:  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (84 \div 160) \text{ МэВ}$ ,  $^{12}\text{C} + ^{236}\text{U}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (76 \div 124) \text{ МэВ}$ ,  $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (71 \div 125) \text{ МэВ}$ ,  $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (84 \div 235) \text{ МэВ}$ ,  $^{11}\text{B} + ^{237}\text{Np}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (57 \div 113) \text{ МэВ}$ ,  $^{16}\text{O} + ^{248}\text{Cm}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (103 \div 140) \text{ МэВ}$ ,  $^{19}\text{F} + ^{208}\text{Pb}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (79 \div 175) \text{ МэВ}$  и  $^{16}\text{O} + ^{209}\text{Bi}$  при  $E_{\text{ц.м.}} = (87 \div 155) \text{ МэВ}$ . Для проведения анализа начальные распределения делящихся ядер по угловому моменту рассчитывались с помощью модели Вонга, а коэффициент затухания делительной моды  $\beta$  – в рамках модели однопольной диссипации (формула “стена+окно”). При этом, значение параметра модели ядерной диссипации (коэффициент редукции  $k_s$ ) подбиралось исходя из требования наилучшего описания экспериментальных данных по множественности предразрывных нейтронов для реакций  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$  и  $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ . Значение величины  $\tau_K$  определялось при анализе экспериментальных данных по угловым распределениям осколков деления. Наилучшего описания экспериментальных данных для всех восьми реакций удалось достичь при  $\tau_K = 3 \times 10^{-20} \text{ с}$  и  $k_s = 0.2$  (см. рис. 5). В заключение параграфа разъясняются причины различий в значениях  $\tau_K$ , определенных в главе III и в настоящем разделе диссертации.

В § IV.3 в рамках предложенной модели рассматривается механизм формирования угловых распределений осколков деления в случае реакций полного слияния деформированных ядер в широкой области энергий налетающих частиц, включая подбарьерное слияние. Показано, что динамико-стохастическая модель позволяет простым и естественным образом учесть

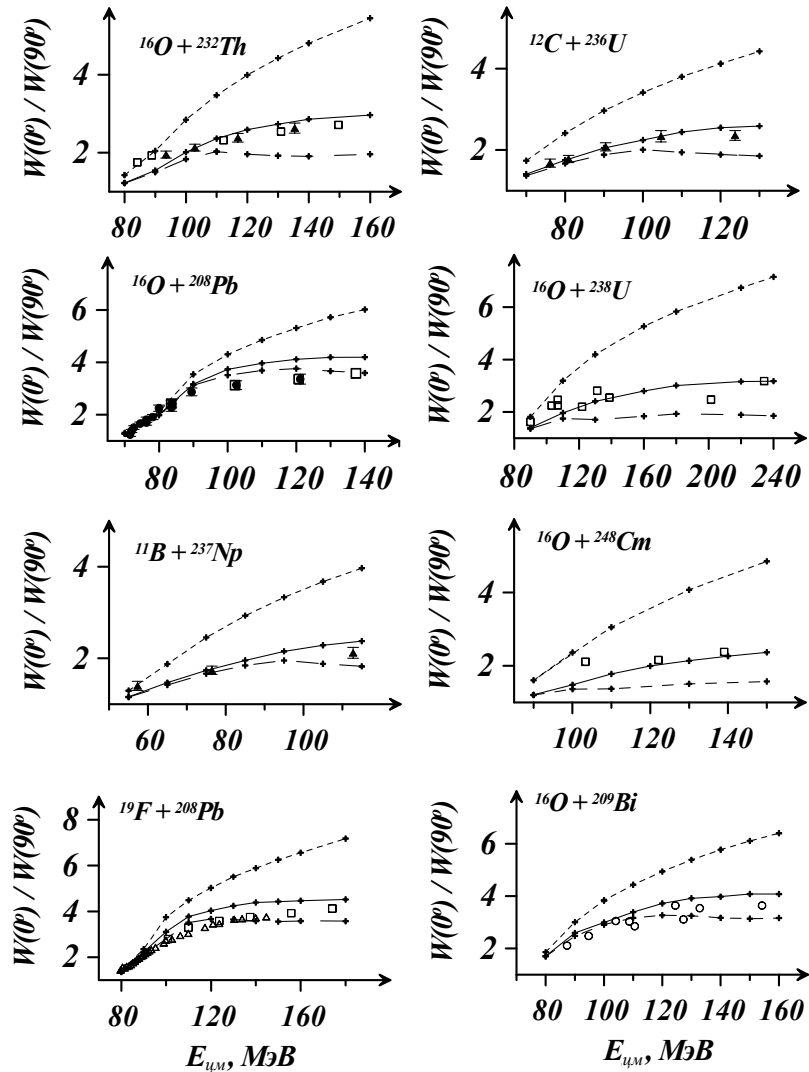


Рис. 5. Угловая анизотропия выхода осколков деления. Символами обозначены экспериментальные данные:  $\circ$  и  $\square$  - [9],  $\bullet$  - [13],  $\blacktriangle$  - [14],  $\triangle$  - [15]. Соединенные сплошными кривыми  $+$  - результаты расчетов, выполненных в рамках предлагаемой модели при  $\tau_K = 3 \times 10^{-20} \text{ с}$  и  $k_s = 0.2$ . Соединенные штриховыми кривыми  $+$  - расчеты с распределениями по  $K$  в седловой точке барьера деления (длинный штрих) и в точке разрыва (короткий штрих).

влияние вида начального распределения по  $K$  и  $M$ , формирующегося в процессе слияния, на угловые распределения осколков деления тяжелых ядер. Это же, в свою очередь, открывает возможность изучения эффектов “памяти” условий формирования тяжелой делящейся системы, другими словами, механизма реакции слияния-деления. Для расчета начальных распределений по  $K$  предложено использовать следующие соотношения:

$$w(J,K) = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{S=|I_t-I_p|}^{I_t+I_p} \sum_{K_\ell=-\ell}^{\ell} \frac{\sigma(\ell, K_\ell, K_p) \left| C_{K-K_\ell, K_\ell, K}^{S, \ell, J} \right|^2 \left| C_{I_t, I_p, S}^{I_t, K-I_t-K_\ell, K-K_\ell} \right|^2}{\sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{K_\ell=-\ell}^{\ell} \sum_{K_p=-I_p}^{I_p} \sigma(\ell, K_\ell, K_p)}$$

$$\sigma(\ell, K_\ell, K_p) = \iint |d_{K_\ell, 0}^{\ell}(\theta_t)|^2 |d_{I_p, K_p}^{\ell}(\theta_p)|^2 \sigma(\ell, \theta_t, \theta_p) \sin(\theta_t) \sin(\theta_p) d\theta_t d\theta_p,$$

здесь  $K_p$  – проекция спина налетающей частицы  $I_p$  на ось симметрии деформированного ядра мишени,  $K_\ell$  – проекция орбитального момента столкновений  $\ell$  на ось симметрии деформированного ядра мишени,  $I_t$  – спин ядра мишени,  $C$  – коэффициент Клебша-Гордана, а  $\sigma(\ell, \theta_t, \theta_p)$  – парциальные сечения слияния деформированных ядер, ориентированных под углами  $\theta_t$  и  $\theta_p$  к оси пучка. Анализ, экспериментальных данных по угловым распределениям осколков деления для реакций  $^{12}\text{C} + ^{235,236}\text{U}$ ,  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$  (см. рис.6), проведенный

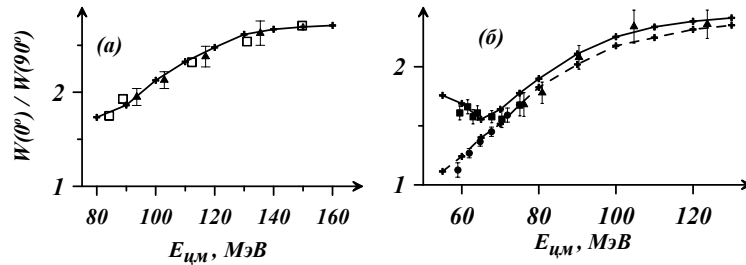


Рис.6. Анизотропия угловых распределений осколков деления для реакций  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$  (а) и  $^{12}\text{C} + ^{236,235}\text{U}$  (б). Точки – экспериментальные данные: ■ и ● – [16], ▲ – [14], □ – [9]. Символы + соединенные кривой – результаты вычислений с учетом реальных начальных распределений по  $K$  и  $M$  (сплошная кривая –  $^{12}\text{C} + ^{236}\text{U}$ , штриховая кривая –  $^{12}\text{C} + ^{235}\text{U}$ ).

в рамках динамико-стохастической модели с учетом реального вида начальных распределений по  $K$  и  $M$ , позволил: связать наблюдаемые расхождения в значениях анизотропии угловых распределений осколков деления для реакций  $^{12}\text{C} + ^{235,236}\text{U}$ , с проявлением “памяти” об условиях формирования делящихся систем; установить, что в случае распада тяжелых возбужденных ядер, обладающих барьерами деления сравнимыми с величиной ядерной температуры, существенная часть событий деления происходит за время сопоставимое с  $\tau_K$ .

**Глава V** посвящена изучению наиболее общих тенденций в поведении средних времен деления и апробации новой информации о величине коэффициентов ядерной вязкости, полученной в предыдущих главах диссертации в рамках подходов, основанных на использовании уравнений Ланжевена. Кроме того, в настоящей главе предложен метод изучения температурной зависимости оболочечных эффектов, во многом определяющих наблюдаемые значения времен протекания реакции вынужденного деления.

В § V.1 продемонстрирована возможность описания в рамках динамико-стохастического подхода экспериментальных данных по временам протекания реакций вынужденного деления в широком диапазоне энергий возбуждения,  $(15 \div 250) \text{ МэВ}$ . С этой целью проанализированы экспериментальные данные по длительностям вынужденного деления для реакций, приводящих к образованию ядер изотопов урана:  $^{232}\text{Th} + ^{3,4}\text{He}$  (при энергиях пучка налетающих частиц от 4.0 до 7.8 МэВ/нуклон);  $^{28}\text{Si} + ^{\text{nat}}\text{Pt}$  (при энергии пучка ионов кремния в интервале от 140 до 170 МэВ);  $^{238}\text{U} + ^{28}\text{Si}$  (при энергии пучка ядер урана 24 МэВ/нуклон). Анализ проводился с учетом влияния оболочечных эффектов на структуру барьера деления. Для расчетов плотности уровней использовалась обобщенная полуфеноменологическая модель, позволяющая производить взаимосогласованный учет когерентных возбуждений коллективной природы (ротационных и вибрационных), корреляционных эффектов сверхпроводящего

типа, а также влияния оболочечных неоднородностей в спектре одночастичных энергий на параметр плотности уровней. Обсуждаются механизмы распада возбужденных ядер при различных энергиях возбуждения. Апробируется информация о величине коэффициента ядерной вязкости, полученная в предыдущих главах диссертации. Анализируется влияние различных представлений о функции затухания оболочечных эффектов на результаты расчетов средних длительностей вынужденного деления. Проведенный анализ экспериментальных данных по длительностям реакции вынужденного деления, в целом, подтвердил корректность описания временной шкалы процесса вынужденного деления и значения коэффициентов ядерной вязкости, полученные в предыдущих главах.

В § V.2 показано, что анализ экспериментальных данных по анизотропии угловых распределений осколков деления в рамках подхода, объединяющего методы и идеи, обсуждаемые в главах II и III, (основанных на представлениях об эффективных переходных состояниях) позволяет получить информацию о функции затухания оболочечных эффектов с ростом температуры ядра. Разработан новый метод расчета угловых распределений осколков деления в области энергий возбуждения, при которых происходит исчезновение влияния оболочечных эффектов на структуру барьера деления. Анализ экспериментальных данных для реакций  $\alpha + {}^{238}\text{U}$  при  $E_\alpha = (20 \div 100) \text{ МэВ}$  по анизотропии угловых распределений осколков деления (см. рис. 7) и длительностям деления позволил сделать вывод о сохранении влияния оболочечных эффектов на структуру барьера деления вплоть до энергий возбуждения (50-60) МэВ.

В **Заключении** формулируются основные выводы диссертации.

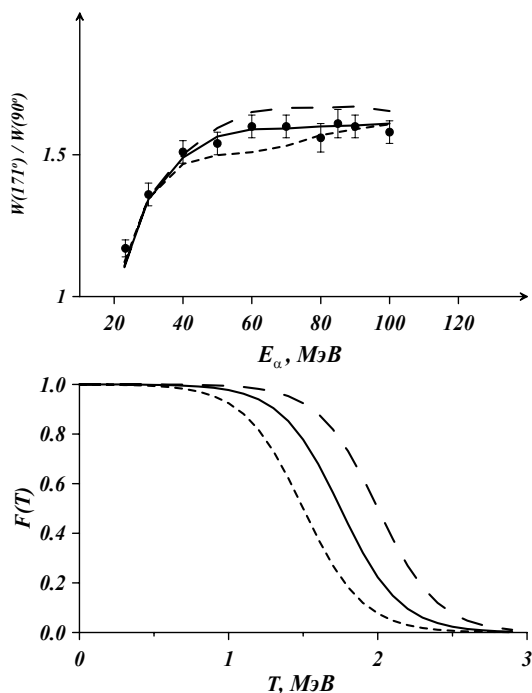


Рис. 7. Верхний – анизотропия угловых распределений осколков деления для реакции  $\alpha + {}^{238}\text{U}$ . Символами  $\bullet$  – обозначены экспериментальные данные [17]. Кривые – результаты вычислений выполненных с различными параметрами функции затухания оболочечных эффектов. Нижний – функции затухания оболочечных эффектов, используемые в расчетах.

### Список основных публикаций

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] Еременко Д.О., Платонов С.А., Юминов О.А. Анализ вероятности заселения квазистационарных состояний во второй потенциальной яме актинидных ядер. // Известия АН СССР (сер. физ.) Т.56 (1992) С.43-46.
- [2] Еременко Д.О., Платонов С.Ю., Тулинов А.Ф., Фотина О.В., Юминов О.А. Длительность распада возбужденных ядер  ${}^{233}\text{Pa}$  и  ${}^{232}\text{Pa}$ . // Ядерная Физика. Т.55 (1993) С.1-12.
- [3] Eremenko D.O., Platonov S.Yu., Fotina O.V., Yuminov O.A., Korduykevich V.A., Malaguti F., Giardina G., Vannini G. Lifetime measurement of fissionable nuclei produced in the development of neutron emission (III) Lifetime of protactinium isotopes. // Nuclear Physics A. V.589 (1995) P.395-415.



- [4] Eremenko D.O., Platonov S.Yu., Fotina O.V., Yuminov O.A., D'Arrigo A., Giardina G., Lamberto A., Malagut F. The probability of populating the second well states in fission dynamics. // *International Journal of Modern Physics E*. V.4 (1995) P.443-445.
- [5] Eremenko D.O., Mellado B., Platonov S.Yu., Fotina O.V., Yuminov O.A., Giardina G., Rappazzo G., Malagut F. Fragment angular distribution as probe of fission dynamics in nuclei with two classes of excited states. // *Journal of Physics. G.: Nucl. Part. Phys.* V.22 (1996) P.1077-1087.
- [6] Еременко Д.О., Фотина О.В., Платонов С.Ю., Юминов О.А. Множественность легких частиц в реакциях под действием тяжелых ионов. // *Известия АН (сер.физ.)*. Т.61 (1997) С.18-23.
- [7] Еременко Д.О., Мельядо Б., Фотина О.В., Платонов С.Ю., Юминов О.А., Джиардина Дж., Малагути Ф. Угловые распределения осколков деления ядер имеющих два класса возбужденных состояний. // *Известия АН (сер.физ.)*. Т.61 (1997) С.24-31.
- [8] Еременко Д.О., Платонов С.Ю., Фотина О.В., Юминов О.А. Длительность распада возбужденных тяжелых ядер. // *Ядерная Физика*. Т.61 (1998) С.773-796.
- [9] Егорова И.М., Еременко Д.О., Фотина О.В., Парфенова Ю.Л., Платонов С.Ю., Юминов О.А. Множественность предразрывных нейтронов в ядро-ядерных столкновениях. // *Известия АН (сер.физ.)*. Т.62 (1998) С.901-906.
- [10] Дроздов В.А., Еременко Д.О., Фотина О.В., Платонов С.А., Юминов О.А. Динамические особенности процесса формирования угловых распределений осколков деления. // *Известия АН (сер.физ.)* Т.63 (1999) С.100-104.
- [11] Дроздов В.А., Еременко Д.О., Фотина О.В., Платонов С.Ю., Юминов О.А. Динамический подход к анализу угловых распределений осколков деления. // *Известия АН (сер.физ.)* Т.64 (2000) С.500-510.
- [12] Дроздов В.А., Еременко Д.О., Фотина О.В., Платонов С.Ю., Юминов О.А. Динамические аспекты процесса

- вынужденного деления в реакции  $^{196}\text{Pt} + ^{28}\text{Si}$ . // Известия АН (сер.физ.). Т.64 (2000) С.1026-1033.
- [13] Дроздов В.А., Еременко Д.О., Фотина О.В., Платонов С.Ю., Юминов О.А. Получение информации о деформационной зависимости ядерной вязкости на базе анализа угловых распределений осколков деления. // Известия АН (сер.физ.). Т.65 (2001) С.83-85.
- [14] Дроздов В.А., Еременко Д.О., Платонов С.Ю., Фотина О.В., Юминов О.А. Динамическая модель процесса формирования угловых распределений осколков деления. // Ядерная Физика. Т.61 (2000) С.221-228.
- [15] Дроздов В.А., Еременко Д.О., Фотина О.В., Платонов С.А., Юминов О.А. Определение времени релаксации спиновой К-моды в рамках динамического подхода к формированию угловых распределений осколков. // Известия РАН (сер.физ.) Т.65 (2001) С.656-660.
- [16] Eremenko D.O., Fotina O.V., Giardina G., Lamberto A., Malaguti F., Platonov S.Yu., Taccone A., Yuminov O.A. Fission time in the  $^{28}\text{Si} + ^{\text{nat}}\text{Pt}$  reaction. // Ядерная Физика. Т.65 (2002) С.18-37.
- [17] Еременко Д.О., Дроздов В.А., Платонов С.Ю., Фотина О.В., Юминов О.А. Оболочечные эффекты и угловая анизотропия осколков деления. // Известия РАН (сер. физич.) Т.66 (2002) С. 1474-1476.
- [18] Еременко Д.О., Дроздов В.А., Платонов С.Ю., Фотина О.В., Юминов О.А. Стохастические аспекты эволюции вращательных степеней свободы в процессе ядерного деления. // Известия РАН (сер. физич.) Т.67 (2003) С. 36-39.
- [19] Drozdov V.A., Eremenko D.O., Fotina O.V., Platonov S.Yu., Yuminov O.A., Giardina G. Angular distribution of fission fragments as a probe for the shell effects. // Journal of the Physical Society of Japan. V.72 (2003) P.2118.
- [20] Eremenko D.O., Drozdov V.A., Fotina O.V., Platonov S.Yu., Yuminov O.A., Giardina G. Dynamical model of fission fragment angular distribution. // Ядерная Физика. Т. 66 (2003) С.1669-1672.

- [21] Еременко Д.О., Дроздов В.А., Платонов С.Ю., Фотина О.В., Юминов О.А. Анализ энергетической зависимости длительности процесса вынужденного деления ураноподобных ядер, полученной с помощью метода теней. // Известия РАН (сер. физич.) Т.67 (2003) С. 8-11.
- [22] Drozdov V.A., Eremenko D.O., Fotina O.V., Platonov S.Yu., Yuminov O.A., Giardina G. Decay time characteristics of the U-like excited nuclei. // Ядерная Физика. Т.66 (2003) С.1676-1678.
- [23] Drozdov V.A., Eremenko D.O., Fotina O.V., Platonov S.Yu., Yuminov O.A. Decay time characteristics of the U-like nuclei. // Nuclear Instruments and Methods in Physical Research. V. B122 (2003) P.501-504.
- [24] Drozdov V.A., Eremenko D.O., Fotina O.V., Platonov S.Yu., Yuminov O.A., Giardina G. Influence of the shell effects in fission fragment angular distribution. // Ядерная Физика. Т.66 (2003) С.1673-1675.
- [25] Drozdov V.A., Eremenko D.O., Fotina O.V., Platonov S.Yu., Yuminov O.A., Giardina G., Malagutti F. Angular distribution of fission fragments as a probe of the shell effects. // Proceed. Intern. Symp. "New project and lines of research in nuclear physics", Messina, Italy, 2003, Word Sci. Publ. Co. P. 392-395.
- [26] Eremenko D.O., Drozdov V.A., Fotina O.V., Platonov S.Yu., Yuminov O.A. Stochastic model of the tilting mode in nuclear fission. // Proceed. Tours Symp. On Nuclear Physics, Tours, France, 26-29 August, 2004, AIP Conference Proceedings. V.704 (2004) P. 130- 138.
- [27] Drozdov V.A., Eremenko D.O., Fotina O.V., Platonov S.Yu., Yuminov O.A., Giardina G., Malaguti F. Decay time of heavy excited nuclei. // Nuclear Physics A. V.374 (2004) P.225-228.
- [28] Drozdov V.A., Eremenko D.O., Yuminov O.A., Platonov S.Yu., Fotina O.V., Malaguti F., Giardina G., Tulinov A.F., Uguzzoni A. Comparative analysis of the energy dependences of the induced fission times for the Pb-like and U-like nuclei obtained by the crystall blocking technique. // Nuclear Instruments and Methods in Physical Research. V. B230 (2005) p. 589-595.

- [29] Егорова И.М., Еременко Д.О., Дроздов В.А., Платонов С.Ю., Фотина О.В., Юминов О.А., Эсламизадех М.Х. Длительность протекания реакций вынужденного деления тяжелых ядер как источник информации о ядерной вязкости. // Известия РАН (сер. физич.) Т.70 (2006) С. 216-223.
- [30] Eremenko D.O., Drozdov V.A., Fotina O.V., Platonov S.Yu., Yuminov O.A., Eslamixadex M.H. Stochastic model of tilting mode in nuclear fission. // Ядерная Физика. Т.69 (2006) С.1423-1427.
- [31] Еременко Д.О., Дроздов В.А., Дерменев А.В., Фотина О.В., Платонов С.Ю., Эсламизадех М.Х., Юминов О.А. Угловые распределения осколков деления в реакциях полного слияния деформированных ядер. // Известия РАН (сер. физич.) Т.71 (2007) С.408-415.

### **Цитированная литература**

- [1] Bjørnholm S., Lynn J.E. The double-humped fission barrier. // Review of Modern Physics. 1980. V.52. P.725-931.
- [2] Юминов О.А. Временные характеристики процесса деления возбужденных тяжелых ядер. // Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук, НИИЯФ МГУ, Москва, 1989.
- [3] Abe Y., Ayik S., Reinhard P.-G., Suraud E. On stochastic approaches of nuclear dynamics. // Physics Reports. 1996. V.275. P.49-196.
- [4] Frobrich P., Gontchar I.I. Langevin description of fusion, deep-inelastic collisions and heavy ion induced fission. // Physics Reports. 1998. V.292. P.131-237.
- [5] Ньютон Д.О. Деление ядер под действием тяжелых ионов. // Физика Элементарных Частиц и Атомного Ядра. 1990. Т.21, вып.5. С.821-913.
- [6] Kailas S. Heavy-ion induced fission at near-barrier energies. // Physics Reports. 1997. V.284. P. 381-416.
- [7] Freifelder R., Prakash M., Alexander J.M. Interplay between theory and experiment for fission-fragment angular distributions from nuclei near the limits of stability. // Physics Reports. 1986. V.133. P.315–335.
- [8] Vandenbosch R., Warhanek H., Huizenga J. R. Fission fragment anisotropy and pairing effects on nuclear structure. // Physical Review. 1961. V.124. P.846 – 853.

- [9] Back B.B., Betts R.R., Gindler J.E., Wilkins B.D., Saini S., Tsang M.B., Gelbke C.K., Lynch W.G., McMahan M.A., Baisden P.A. Angular distribution in heavy-ion induced fission. // *Physical Review C*. 1985. V.32. P.195–213.
- [10] Карамян С.А., Кузнецов И.В., Музыка Ю.А., Оганесян Ю.Ц., Пенионжкевич Ю.Э., Пустыльник Б.И. Эффективные моменты инерции тяжелых ядер в седловой точке. // *Ядерная Физика*. 1967. Т.6. С.494-501.
- [11] Toke J., Bock R., Dai G.X., Gobbi A., Gralla S., Hildenbrand K.D., Kuzminski J., Müller W.F.J., Olmi A., Reisdorf W., Björnholm S., Back B.B. Compound nucleus fission and quasi-fission in reactions of  $^{238}\text{U}$  with  $^{16}\text{O}$  and  $^{27}\text{Al}$ . // *Physics Letters B*. 1984. V.142. P.258-262.
- [12] Gavron A., Eskola P., Sierk A. J., Boissevain J., Britt H.C., Eskola K., Fowler M.M., Ohm H., Wilhelmy J.B., Wald S., Ferguson R. L. New evaluation of fission-fragment angular distributions in heavy-ion reactions. // *Physical Review Letters*. 1984. V.52. P.589 -592.
- [13] Rossner H., Hinde D.J., Leigh J.R., Lestone J.P., Newton J.O., Wei J.X., Elfström S. Influence of pre-fission particle emission on fragment angular distribution studied for  $^{208}\text{Pb}(^{16}\text{O},f)$ . // *Physical Review C*. 1992. V.45. P.719–725.
- [14] Kailas S., Nadkarni D.M., Chatterjee A., Saxena A., Kapoor S.S., Vandenbosch R., Lestone J.P., Liang J.F., Prindle D.J., Sonzogni A.A., Bierman J.D. Fission fragment folding angle distributions for the systems  $^{11}\text{B}+^{237}\text{Np}$ ,  $^{12}\text{C}+^{236}\text{U}$ , and  $^{16}\text{O}+^{232}\text{Th}$  in the energy range  $1.1 < E/V_B < 2.1$ . // *Physical Review C*. 1999. V.59. P.2580-2587.
- [15] Hinde D.J., Berriman A.C., Dasgupta M., Leigh J.R., Mein J.C., Morton C.R, Newton J.O. Limiting angular momentum for statistical model description of fission. // *Physical Review C*. 1999. V.60. P.054602(1 - 13).
- [16] Lestone J.P., Sonzogni A.A., Kelly M.P., Vandenbosch R. Influence of the ground state spin of target nuclei on the anomalous behavior of fission fragment anisotropies. // *Physical Review C*. 1997. V.56. P. R2907-R2911.
- [17] Kapoor S.S., Baba H., Thompson S.G. Studies of fragment angular distributions in the fission of  $\text{Bi}^{209}$  and  $\text{U}^{238}$  induced by alpha particles of energies up to 115 MeV. // *Physical Review*. 1966. V.149. P.965-979.



Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии «КДУ»  
Тел./факс: (495) 939-57-32. E-mail: [press@kdu.ru](mailto:press@kdu.ru)