

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

На правах рукописи

**ЭСЛАМИЗАДЕХ МОХАММАДХАДИ  
ДИНАМИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РЕАКЦИИ  
ВЫНУЖДЕННОГО ДЕЛЕНИЯ**

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2007

Работа выполнена на кафедре физики атомного ядра и квантовой теории столкновений Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова и в Научно-исследовательском институте ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

**Научные руководители:**

доктор физико-математических наук,  
профессор

О.А.Юминов  
(НИИЯФ МГУ)

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

Д.О.Еременко  
(физический факультет МГУ,  
кафедра физики атомного ядра  
и квантовой теории столкновений)

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук

С.А.Гончаров  
(физический факультет МГУ,  
кафедра нейтронографии)

кандидат физико-математических наук

А.В.Еремин  
(ЛЯР ОИЯИ, г.Дубна)

**Ведущая организация**

Институт ядерных исследований РАН,  
г. Москва

Защита состоится “13” ноября 2007 г. в 15 часов на заседании Диссертационного совета К 501.001.06 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 “12” октября 2007 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета К 501.001.06,  
кандидат физико-математических наук



О.В.Чуманова

## **Общая характеристика работы**

Диссертация посвящена разработке нового теоретического подхода к описанию реакции вынужденного деления тяжелых атомных ядер, учитывающего оболочечные эффекты, явление ядерной диссипации и позволяющего с единых позиций описывать разнообразные экспериментальные данные, связанные с процессом вынужденного деления в широкой области энергий возбуждения.

## **Актуальность темы**

Деление атомных ядер это сложный и многообразный процесс, изучение которого позволяет получить новую информацию об оболочечной структуре сильно-деформированных ядер, плотности уровней, диссипативных процессах и многих других свойствах атомных ядер. Тем не менее, до сих пор, полная картина процесса вынужденного деления остается во многом неясной и противоречивой, что и стимулирует нарастающий интерес к изучению реакции вынужденного деления и у теоретиков, и у экспериментаторов. Так, открытие несимметричного разделения по массам осколков деления тяжелых ядер, спонтанно-делящихся изомеров и создание макро-микроскопического метода расчета потенциальной энергии ядра выявили тесную связь между оболочечной структурой ядер и их барьерами деления, по крайней мере, при низких энергиях возбуждения. В рамках макро-микроскопического метода было показано, что барьер деления тяжелых ядер обладает характерной двугорбой формой. Представления о двугорбом барьере деления позволили с единых позиций объяснить природу спонтанно делящихся изомеров (изомеров формы), подбарьерных делительных резонансов и др. Экспериментально обнаружена временная задержка вынужденного деления по сравнению с длительностью распада возбужденных тяжелых ядер по каналам, связанным с испарением легких частиц. Природа этой задержки обусловлена конечным временем жизни возбужденных состояний второй потенциальной ямы. Однако, анализ экспериментальных

данных по длительностям протекания реакций вынужденного деления, выходам изомеров формы и делимостям до сих пор проводился лишь в рамках статистической теории ядерных реакций. При этом игнорировалось явление ядерной диссипации, результатом которого является необратимый переход кинетической энергии коллективного ядерного движения в энергию возбуждения делящейся системы. Вместе с тем, детальное изучение динамики прохождения ядром двугорбого барьера деления показало, что явление ядерной диссипации заметно влияет на вероятность заселения второй потенциальной ямы и оказывает существенное влияние на процесс формирования угловых распределений осколков деления ядер, обладающих двугорбым барьером деления.

Понимание важной роли ядерной диссипации в процессах, включающих коллективное ядерное движение большой амплитуды, является одним из наиболее интересных достижений последних десятилетий. Работы, связанные с изучением влияния ядерной диссипации на наблюдаемые характеристики процесса вынужденного деления, можно условно разбить на две группы. К первой следует отнести работы, посвященные анализу экспериментальных данных по массово-энергетическим и зарядовым распределениям осколков вынужденного деления. Характерной особенностью таких исследований является тщательный анализ динамических аспектов последней стадии деления возбужденного атомного ядра. А именно, его эволюции от седловой точки барьера деления до точки разрыва, которая играет доминирующую роль в формировании указанных распределений.

К другой группе работ, посвященных изучению влияния диссипации на процесс деления, следует отнести исследования, так или иначе, связанные с изучением длительности распада возбужденных ядер. В этих работах рассматривалось влияние ядерной диссипации на величину ширины распада возбужденного ядра по каналу деления ( $\Gamma_f$ ). Оказалось, что ядерная диссипация снижает ток вероятности через барьер деления,

что приводит к уменьшению значения  $\Gamma_f$  относительно соответствующего значения, предсказываемого стандартной статистической теорией. Как следствие, были пересмотрены представления о временном масштабе процесса деления. Так было показано, что длительность деления может существенно превышать величину, определяемую в рамках стандартной статистической теории ядерных реакций. В таких исследованиях, как правило, анализировались экспериментальные данные по множественностям легких частиц и  $\gamma$ -квантов в реакциях под действием тяжелых ионов.

Анализ экспериментальных данных по множественностям легких частиц и  $\gamma$ -квантов, сечениям образования остатков испарения, делимостям и характеристикам массово-энергетических и зарядовых распределений осколков деления в рамках подходов, учитывающих явление ядерной диссипации, не позволил сделать однозначный вывод о механизме этого процесса. По-видимому, это обусловлено тем фактом, что коэффициент затухания делительной моды (характеризующий ядерную диссипацию) не является непосредственно измеряемой величиной. Вместе с тем, подавляющее большинство работ, связанных с изучением влияния ядерной диссипации на наблюдаемые характеристики реакции вынужденного деления, касаются анализа экспериментальных данных при высоких энергиях возбуждения. При этом, не рассматривалась зависимость потенциальной поверхности от оболочечных эффектов. Существующие не многочисленные работы, в которых учитывается оболочечная структура потенциальной поверхности делящейся системы, касаются анализа лишь какой-либо одной наблюдаемой.

Все сказанное означает, что разработка нового теоретического подхода, учитывающего оболочечные эффекты, явление ядерной диссипации и позволяющего с единых позиций описывать разнообразные экспериментальные данные, связанные с процессом вынужденного деления, является актуальной задачей современной ядерной физики.

Причем, область применимости подхода должна покрывать как низкие энергии возбуждения (когда, существенную роль в механизме распада возбужденного ядра играют оболочечная структура барьера деления), так и более высокие энергии (при которых, потенциальная энергия делящегося ядра достаточно точно описывается в рамках модели жидкой капли). Подчеркнем, что использование такого теоретического подхода при анализе соответствующих экспериментальных данных позволило бы получить не только новую информацию о механизме ядерной диссипации, но и о самом процессе вынужденного деления. В частности, о механизме формирования угловых распределений осколков деления и о температурной зависимости оболочечных эффектов.

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

1. Новый теоретический подход к описанию реакции вынужденного деления атомных ядер, основанный на комбинированных динамических и статистических расчетах, и учитывающий явление ядерной диссипации, влияние оболочечных эффектов на структуру барьера деления и плотность уровней;
2. Определенный набор параметров характеризующих двугорбый барьер деления и плотность уровней в характерных точках барьера деления, обеспечивающий возможность согласованного описания экспериментальных данных по выходам изомеров формы, длительностям реакции вынужденного деления, делимостям и угловым распределениям осколков деления ядер изотопов  $Pu$  и  $Am$ ;
3. Вывод о нарушении зеркальной и аксиальной симметрии формы ядер для возбужденных состояний второй потенциальной ямы;
4. Вывод о сохранении проявления оболочечной структуры барьера деления в наблюдаемых характеристиках распада трансурановых ядер, по крайней мере, до энергии возбуждения  $60$  МэВ;

5. Определенные при анализе экспериментальных данных значения коэффициента ядерной вязкости и времени релаксации для степени свободы, связанной с проекцией углового момента на ось деления.

### **Научная новизна работы**

В диссертации предложен новый теоретический подход к описанию реакции вынужденного деления, обеспечивающий возможность одновременного анализа разнообразных экспериментальных данных, связанных с процессом вынужденного деления тяжелых ядер в области энергий возбуждения от  $15 \text{ МэВ}$  до  $250 \text{ МэВ}$ . Настоящий подход впервые обеспечил согласованное описание основных динамических и статистических аспектов процесса заселения и распада возбужденных состояний второй потенциальной ямы двугорбого барьера деления, а также исчезновения двугорбой структуры барьера деления с ростом ядерной температуры. Анализ экспериментальных данных по длительностям протекания реакций вынужденного деления, выходам изомеров формы, вероятностям деления и угловым распределениям осколков деления в рамках предложенного подхода позволил получить новую информацию о величинах коэффициента ядерной вязкости и времени релаксации, для степени свободы, связанной с проекцией полного углового момента на ось симметрии делящегося ядра.

### **Научная и практическая ценность работы**

В диссертации разработан новый теоретический подход к описанию реакции вынужденного деления тяжелых ядер, учитывающий динамические аспекты процесса прохождения второй потенциальной ямы двугорбого барьера деления и позволяющий проводить количественное описание разнообразных экспериментальных данных в широкой области энергий возбуждения. Разработанный подход является ценным инструментом при проведении фундаментальных исследований, связанных с синтезом сверхтяжелых элементов и изучением механизмов реакции ядерного деления. Совместный анализ экспериментальных данных по

выходам изомеров формы, вероятностям деления, длительностям деления и угловым распределениям осколков деления позволил получить ряд важных результатов, касающихся: особенностей температурной зависимости оболочечных эффектов, величины коэффициента ядерной вязкости при низких энергиях возбуждения, времени релаксации для степени свободы, связанной с проекцией углового момента на ось деления. С точки зрения современных прикладных исследований (ядерная энергетика, трансмутация отходов ядерной энергетики) практическую ценность диссертации определяет полученная новая информация о параметрах двугорбых барьеров деления и плотности уровней для ряда ядер – изотопов  $Pu$  и  $Am$ , обеспечивающих возможность согласованного описания экспериментальных данных по выходам изомеров формы, длительностям реакции вынужденного деления, вероятностям деления и угловым распределениям осколков деления. Полученные в диссертации результаты могут найти свое применение в экспериментальных и теоретических 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).

### **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, выходам изомеров формы, длительностям вынужденного деления, вероятностям деления и с выводами работ других авторов.

## **Личный вклад автора**

В работах по теме диссертации, выполненных с соавторами, автору диссертации принадлежит детальное исследование вопросов, связанных с влиянием явления ядерной диссипации на процесс формирования анализируемых наблюдаемых реакции вынужденного деления. Опираясь на результаты этих исследований, автор диссертации осуществил численную реализацию нового теоретического подхода к описанию реакции вынужденного деления и провел анализ имеющихся в литературе экспериментальных данных.

## **Апробация работы**

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах НИИЯФ МГУ, ЛЯР ОИЯИ, а также на следующих конференциях:

- [1] Международных совещаниях по спектроскопии и структуре атомного ядра (2005, 2006, 2007);
- [2] Международной конференции по атомным столкновениям в твердых телах (2006, Германия);
- [3] Конференции МГУ “Ломоносовские чтения” (2007, Москва).

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из Введения, 3-х глав и Заключения. Общий объем диссертации – 109 страниц. Она содержит 2 таблицы, 30 рисунков и список цитируемой литературы, включающий 107 наименований.

## **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 1** дан краткий обзор основных модельных представлений о процессе ядерного деления. В частности, обсуждается модель жидкой капли и метод оболочечной поправки В.М.Струтинского. Рассматриваются некоторые современные модельные представления о плотности уровней возбужденных атомных ядер, используемые при проведении анализа экспериментальных данных, связанных с реакцией вынужденного деления. Особое внимание уделяется обобщенной полуфеноменологической модели, самосо-гласованным образом учитывающей оболочечные эффекты, эффекты коллективной природы (вибрационное и ротационное наращивание плотности уровней) и парные корреляции сверхпроводящего типа. Кроме того, обсуждаются теоретические подходы, применяемые в настоящее время для моделирования динамики вынужденного деления и основанные на использовании стохастических уравнений Ланжевена. Обсуждаются также основные теоретические представления о механизме ядерной диссипации.

**Глава 2** посвящена развитию нового теоретического подхода к описанию реакции вынужденного деления ядер, учитывающего явление ядерной диссипации, оболочечные эффекты и его использованию в анализе экспериментальных данных при энергиях возбуждения делящихся систем  $E^* < 30 \text{ МэВ}$ .

В § 1.2 детально рассматривается формализм теоретического подхода. Особое внимание уделяется вопросам, связанным с моделированием процесса прохождения делящимся ядром второй потенциальной ямы двугорбого барьера деления. Обсуждаются вопросы, связанные с выбором значений некоторых параметров, используемых при расчетах в рамках подхода.

В § 2.2 проведен анализ экспериментальных данных по: вероятностям деления ядер – изотопов  $Pu$  и  $Am$ ; выходам изомеров формы для реакций  $d + {}^{242,240}Pu$  при  $E_d = (20 \div 30) \text{ МэВ}$  и  $\alpha + {}^{238}U$  при  $E_\alpha = (21 \div 28) \text{ МэВ}$ ; длительностям протекания вынужденного деления для реакции  $\alpha +$

$^{238}\text{U} \rightarrow f$  при  $E_\alpha = (20 \div 32)$  МэВ. Согласованный анализ этих экспериментальных данных позволил определить набор параметров характеризующих двугорбые барьеры деления и плотность уровней в седловых точках двугорбых барьеров деления ядер - изотопов *Pu* и *Am*, а также величину коэффициента затухания делительной моды. Рассматривается чувствительность результатов вычислений в рамках динамико-статистического подхода указанных наблюдаемых к выбору значения величины коэффициента затухания делительной моды и параметрам функции затухания оболочечных эффектов. Анализируется влияние представлений о типе симметрии формы ядер в возбужденных состояниях второй потенциальной ямы на результаты вычислений.

В заключение главы кратко сформулированы основные результаты исследований, представленных в настоящем разделе диссертации:

- разработан динамико-статистический подход к описанию процесса вынужденного деления атомных ядер, учитывающий явление ядерной диссипации и оболочечные эффекты;
- определен набор параметров (параметры двугорбых барьеров деления, плотности уровней ядер, функции затухания оболочечных эффектов и приведенный коэффициент ядерной вязкости) для ядер  $^{242-239}\text{Pu}$  и  $^{244-239}\text{Am}$ , обеспечивающий возможность согласованного описания экспериментальных данных по выходам изомеров формы, длительностям реакции вынужденного деления и вероятностям деления;
- получено подтверждение обнаруженных ранее фактов полного нарушения симметрии формы ядер для возбужденных состояний второй потенциальной ямы и “выживания” оболочечных эффектов, по крайней мере, до энергии возбуждения 30 МэВ.

**Глава 3** посвящена апробации предложенного теоретического подхода при описании экспериментальных данных, связанных с вынужденным делением в более широкой области энергий возбуждения: (15 ÷ 250) МэВ.

В § 3.1 продемонстрирована работоспособность подхода на примере описания экспериментальных данных по средним длительностям вынужденного деления при энергиях возбуждения от 15 до 250 МэВ. Для анализа выбраны экспериментальные данные по длительности реакций вынужденного деления ураноподобных ядер, полученные методом, основанным на использовании эффекта “теней”:

- 1)  $^{232}\text{Th} + ^3\text{He}, \alpha$  (измерения выполнены на циклотроне К-120 НИИЯФ МГУ при энергиях пучка налетающих частиц от 4.0 до 7.8 МэВ/нуклон;
- 2)  $^{28}\text{Si} + ^{\text{nat}}\text{Pt}$  (измерения выполнены на тандемном XTU ускорителе в национальной лаборатории Леньяро (Италия) при энергии пучка ионов кремния в интервале от 140 до 170 МэВ);
- 3)  $^{238}\text{U} + ^{28}\text{Si}$  (получены на ускорительном комплексе GANIL (Франция) при энергии пучка ядер урана 24 МэВ/нуклон; эксперименты выполнены в обратной кинематике; регистрировались осколки, соответствующие делению ураноподобных ядер).

Особое внимание уделено апробации величины коэффициента ядерной вязкости, используемого в расчетах предыдущей главы. Проанализировано влияние различных представлений о температурной зависимости оболочечных эффектов и механизме ядерной диссипации на результаты вычислений.

§ 3.2 посвящен развитию представлений о механизме формирования угловых распределений осколков деления ядер, обладающих двугорбым барьером. Показано, что динамико-статистический подход обеспечивает возможность описания экспериментальных данных по анизотропии угловых распределений выхода осколков деления для реакций  $\alpha + ^{238}\text{U}$  при  $E_\alpha = (20 \div 100)$  МэВ и  $\alpha + ^{237}\text{Np}$  при  $E_\alpha = (24 \div 45)$  МэВ с таким же набором параметров плотности уровней и двугорбых барьеров деления ядер-изотопов *Pu* и *Am*, что и § 2.2. Анализируется чувствительность результатов вычислений анизотропии угловых распределений осколков деления к выбору значений времени релаксации для степени своды,

связанной с проекцией полного углового момента на ось деления, и к величине коэффициента ядерной вязкости. Особое внимание уделяется вопросам, связанным с возможностью изучения температурной зависимости оболочечных эффектов на основе анализа экспериментальных данных по угловым распределениям осколков деления в рамках динамико-статистического подхода. Сформулированы основные результаты и выводы параграфа:

- разработанный динамико-статистический подход позволяет изучать явления, определяющие время жизни ядра во второй потенциальной яме двугорбого барьера деления (затухание оболочечных эффектов с ростом температуры ядра, явление ядерной диссипации) и процессы, происходящие при прохождении делящейся системой второй потенциальной ямы (установление равновесного распределения по проекции полного углового момента на ось деления ( $K$ ));

- в рамках динамико-статистического подхода предложен способ расчета угловых распределений осколков вынужденного деления, обеспечивающий согласованное описание экспериментальных данных, в случаях, как жидкокапельного, так и двугорбого барьеров деления;

- показано, что влияние оболочечных эффектов на структуру барьера сохраняется вплоть до энергий возбуждения  $60 \text{ МэВ}$ ;

- определено значение времени релаксации для  $K$ -моды ( $\tau_K = 8 \times 10^{-21} \text{ с}$ ).

## **Заключение**

**Основные выводы и результаты диссертации:**

1. Разработан динамико-статистический подход к описанию процесса вынужденного деления атомных ядер, учитывающий явление ядерной диссипации и оболочечные эффекты и обеспечивающий возможность согласованного описания экспериментальных данных по выходам изомеров формы, длительностям реакции вынужденного деления, делимостям и угловым распределениям осколков деления в широкой области энергий возбуждения.

2. В рамках динамико-статистического подхода предложен способ расчета угловых распределений осколков вынужденного деления ядер, обеспечивающий согласованное описание экспериментальных данных, в случаях, как жидкокапельного, так и двугорбого барьеров деления;
3. Определен набор параметров (параметры двугорбых барьеров деления, плотности уровней ядер, функции затухания оболочечных эффектов) для ряда ядер – изотопов  $Pu$  и  $Am$ , обеспечивающий возможность согласованного описания экспериментальных данных по выходам изомеров формы, длительностям реакции вынужденного деления, вероятностям деления и угловым распределениям осколков деления;
4. Получено подтверждение обнаруженных ранее фактов полного нарушения симметрии формы ядер для возбужденных состояний второй потенциальной ямы и “выживания” оболочечных эффектов вплоть до энергии возбуждения  $60 \text{ МэВ}$ .
5. Определено значение коэффициента ядерной вязкости, а также времени релаксации для степени свободы, связанной с проекцией углового момента на ось деления.

### **Список основных публикаций**

- [1] 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.). 2006. Т.70. №2. С. 216-223.
- [2] Фотина О.В., Еременко Д.О., Платонов С.Ю., Юминов О.А., Эсламизадех М.Х., Дроздов В.А. Временные и кинематические характеристики процессов ядерного девозбуждения как метод тестирования моделей плотности уровней. // Известия РАН (сер. физич.). 2006. Т.70. №5. С. 669-672.

- [3] Eremenko D.O., Drozdov V.A., Fotina O.V., Platonov S.Yu., Yuminov O.A., Eslamizadeh M.H. Stochastic model of tilting mode in nuclear fission. // Ядерная Физика. 2006. Т.69. С.1423-1427.
- [4] 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.). 2007. Т.71. С.408-415.
- [5] Дроздов В.А., Еременко Д.О., Фотина О.В., Платонов С.Ю., Юминов, О.А. Эсламизадех М.Х. Динамико- стохастический подход к описанию эволюции делящихся ядер с учетом оболочечных эффектов // Тезисы докладов 56-ой Международной конференции по проблемам ядерной спектроскопии и структуры атомного ядра “Ядро-2006”, сент. 4 – сент.8, г. Саров, ФГУМ “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, с.234 (под редакцией С.Н.Абрамовича).
- [6] Eremenko D.O., Drozdov V.A., Eslamizadeh M.H., Fotina O.V., Malaguti F., Platonov S.Yu., Tulinov A.F., Uguzzoni A., Yuminov O.A.. Uguzzoni A. Oscillations in the total duration of fission process for the  $^{238}\text{U} + \alpha$  reaction measured by the crystal blocking technique. // Book of Abstracts of the 22<sup>nd</sup> International Conferences on Atomic Collisions in Solids, ICACS-2006, 21-26 July 2006, Germany, Berlin, ed. G.Schimietz, P.69.
- [7] Eslamizadeh M.H., Eremenko D.O., Drozdov V.A., Fotina O.V., Platonov S.Yu., Yuminov O.A. Dynamical model of heavy nucleus fission at low energies. // Book of Abstracts of LVII International Conference on Nuclear Physics, “Nucleus -2007, Fundamental problems of nuclear physics, Atomic Power Engineering and Nuclear Technologies”, June 25-29, 2007, Voronezh. Saint–Peterburg, 2007. P.251 (ed. by A.K.Vlasnikov).

Типография МГУ  
117574, Москва, ул. Академика Хохлова, д. 11  
Заказ № 640 Тираж 100 экз.