



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4-2005-151

На правах рукописи
УДК 539.14

ЕРШОВ
Сергей Николаевич

**РЕАКЦИИ РАЗВАЛА ЯДЕР
С ДВУХНЕЙТРОННЫМ ГАЛО**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 2005

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

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Л.Д. Блохинцев

доктор физико-математических наук,
профессор

В.В. Буров

доктор физико-математических наук,
профессор

Э.Е. Саперштейн

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный университет

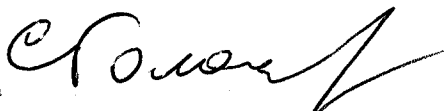
Защита диссертации состоится на заседании специализированного совета Д 720.01.01 в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

" _____ " _____ 2005 г. по адресу:
г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан " _____ " _____ 2005 г.

Ученый секретарь совета
доктор физико-математических наук



С.В. Голоскоков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время наибольший интерес в ядерной физике связан с исследованиями поведения атомных ядер в экстремальных условиях, которые могут быть созданы в современных лабораториях. Особый интерес связан с изучением радиоактивных ядер. Это нейтроно- или протонизбыточные ядра, нестабильные по отношению к β -распаду. Исследования с пучками радиоактивных ядер открыли новые перспективы в изучении структуры атомного ядра и нашли широкие приложения в других областях физики, включая ядерную астрофизику. Важнейшие вопросы физики ядра, например определение границы нуклонной стабильности ядер, синтез сверхтяжелых элементов, эволюция оболочечной структуры на пути к пределам существования атомных ядер (исчезновение и появление магических чисел) изучаются в реакциях с пучками нестабильных ядер. Неслучайно, физика радиоактивных пучков вышла на передний план исследований во многих мировых научных ядерных центрах. Новые установки для изучения экзотических ядер с параметрами, значительно превосходящими ныне существующие, планируются и строятся в Японии, Германии, Канаде, США. В будущем можно ожидать появления новых важных результатов, касающихся фундаментальных вопросов структуры атомных ядер и механизмов ядерных реакций. Но уже сейчас исследования с радиоактивными ядрами привели к фундаментальному результату: в некоторых слабосвязанных легких ядрах, находящихся на границе нуклонной стабильности, открыт новый тип ядерной структуры - ГАЛО.

Структура ядер с гало сильно отличается от структуры стабильных ядер, которая качественным образом может быть описана, как движение нуклонов ядра в некотором среднем, самосогласованном поле, созданном взаимодействием между всеми нуклонами. Количественное описание свойств стабильных ядер достигается учетом возмущений, вызванных остаточными взаимодействиями между нуклонами. Качественная картина структуры ядер с гало иная. Она характеризуется сосуществованием двух ядерных подсистем: нуклонов кора (кластер, состоящий из нуклонов), образующих сильносвязанное ядро, и нуклонов гало, движущихся относительно центра масс кора и образующих облако разряженной ядерной материи вокруг кора. В результате, специфика гало проявляется как

в структуре основного состояния (слабосвязанные системы с необычайно большими пространственными размерами и ярко выраженной кластеризацией), так и в структуре спектра низколежащих возбуждений, где наблюдается концентрация силы переходов около порога развала - так называемые мягкие моды возбуждений.

Характерной особенностью физики ядер с гало является тесная взаимосвязь механизма ядерной реакции и структуры ядра. Извлечение количественной информации о структуре ядер возможно только при использовании моделей механизмов реакции, корректно учитывающих их специфику. Практический путь изучения структуры гало - это исследование столкновений двух ядер с передачей энергии и импульса. Так как в известных ядрах с двухнейтронным гало основное состояние является единственным связанным состоянием, то развал ядер с гало в бинарных столкновениях является конечным процессом любой реакции, сопровождаемой возбуждением экзотической системы. Заметим, что чем большую роль в реакционных наблюдаемых играют возбуждение низколежащих состояний непрерывного спектра, тем более ярко проявляются отличия структуры гало от нормальных ядер. Развитие адекватных моделей развала имеет большую практическую ценность как средство извлечения достоверной информации о структуре ядер с гало и динамике процессов взаимодействия.

Реакции развала являются основным источником информации о структуре ядер с гало. На практике реализуются различные типы экспериментов по фрагментации экзотических ядер. В случае ядер с двухнейтронным гало одновременная регистрация всех трех фрагментов развала приводит к кинематически полному эксперименту, в котором возможно установить энергию возбуждения ядра с гало и, соответственно, спектр возбуждения. Кинематически полные эксперименты позволяют выбирать каналы реакции и содержат наиболее полную информацию о структуре ядра и динамике взаимодействия. Следует заметить, что область возбуждений около порога развала наиболее чувствительна к проявлениям характерных черт структуры гало.

Анализ реакций развала трехкластерных ядер с гало значительно более сложен чем двухкластерных. До настоящего времени отсутствовали теоретические модели для описания реакций развала, которые принимали бы во внимание важнейшие особенности структуры двухнейтронных ядер с гало как в основном состоянии, так и в непрерывном спектре, и

были бы способны описывать полный спектр наблюдаемых кинематически полных экспериментов по развалу при столкновениях с тяжелыми и легкими мишенями.

Основная цель диссертации состоит в развитии микроскопического четырехчастичного подхода для описания реакций развала ядер с двухнейтронным гало с учетом характерных особенностей их структуры как в основном состоянии, так и в нерывном спектре вблизи порога развала и использование развитого подхода для извлечения информации о структуре гало.

Научная новизна. В диссертации разработан новый микроскопический подход к анализу реакций развала ядер с двухнейтронным гало, ведущих к возбуждению состояний непрерывного спектра вблизи порога развала, и позволяющий в рамках единого подхода рассчитывать полный спектр наблюдаемых кинематически полных экспериментов при фрагментации на легких и тяжелых мишенях. Развитый метод включает: учет больших пространственных размеров ядер с гало; эффекты отдачи, возникающие из-за кластерной структуры и трехчастичной динамики взаимодействия фрагментов; учет структуры непрерывного спектра вблизи порога развала; одновременный учет кулоновского и ядерного развала, их интерференции. Для описания структуры ядра в основном состоянии и непрерывном спектре используется метод гиперсферических гармоник. Предлагаемый подход пригоден для описания реакций развала, в которых доминируют одноступенчатые процессы, то есть для столкновений при средних и промежуточных энергиях.

Развита модель для описания рассеяния электронов на ядрах, имеющих структуру двухнейтронного гало, в которой полностью учтено взаимодействие в конечном состоянии между тремя фрагментами развала. Модель используется для рассмотрения процессов с небольшими переданными импульсами, приводящими к низколежащим возбуждениям ядер, то есть области наиболее чувствительной к проявлению особенностей структуры гало. Модель применялась для предсказания результатов электронного рассеяния на ${}^6\text{He}$. Это боромиевское ядро является полигоном для теоретических исследований структуры ядер с двухнейтронным гало. Расчеты инклюзивных спектров показывают, что дипольные возбуждения доминируют в спектре при малых переданных импульсах. Позиция максимума и форма дипольного спектра изменяется с увеличением переданного момента. Это поведение отлично от поведения хорошо известного

2^+ резонанса. Экспериментальное подтверждение этого наблюдения может быть сильным аргументом против резонансной природы мягких дипольных возбуждений. Показано, что измерение электронов в совпадении с фрагментами может дать ценную информацию о ядерной структуре. Картина угловых и энергетических корреляций является довольно специфической для разных мультипольных возбуждений. Корреляционные измерения могут быть уникальным инструментом для исследования сложной динамики ядерных возбуждений и открыть дорогу к спектроскопии непрерывного спектра. Представленные расчеты использовались при разработке экспериментального проекта для рассеяния электронов при столкновении с экзотическими ядрами, который планируется для реализации в GSI.

В рамках развитой модели было проанализировано неупругое рассеяние ^{11}Li на протонной мишени при энергии столкновения 68 МэВ/А. полученных в RIKEN. Основное состояние и трехчастичные возбуждения в непрерывном спектре ^{11}Li рассчитывались в трехчастичной $^9\text{Li}+n+n$ кластерной модели, используя метод гиперсферических гармоник. В расчетах для описания взаимодействия протонной мишени с нуклонами кора использовались эффективные, зависящие от плотности NN силы, в то время как для взаимодействия с нейтронами гало применялись свободные t -матричные силы. Параметры эффективных сил были проверены вычислениями оптических потенциалов, которые применялись для описания экспериментальных данных по упругому рассеянию как ^9Li , так и ^{11}Li на протоне. Теория хорошо описывает данные по упругому рассеянию и правильно воспроизводит экспериментально наблюдаемую разницу в сечениях между ^{11}Li и ^9Li . Эта разница объясняется движением кора ^9Li в ядре ^{11}Li . Таким образом не появляется новых параметров, когда теория применяется к анализу неупругого рассеяния ^{11}Li . Расчеты неупругого рассеяния показывают концентрацию дипольных и монопольных возбуждений ^{11}Li около трехчастичного порога и хорошо описывают наблюдаемый пик в экспериментальном спектре ^{11}Li . Также, теория хорошо воспроизводит соответствующие экспериментальные угловые распределения и подтверждает доминирование дипольных возбуждений. Для выделения монопольных возбуждения необходимы экспериментальные данные на малых углах.

Впервые проведены микроскопические расчеты спектров развала ядер ^6He при столкновениях с ^{12}C и ^{208}Pb с энергией 240 МэВ/нуклон, по-

лученных в результате кинематически полных экспериментов в GSI. В теоретическом анализе экспериментальных данных получено одновременно хорошее описание как абсолютных значений сечений, так и формы спектров возбуждения для обеих реакций. Впервые проведены расчеты вкладов процессов неупругой фрагментации, связанных с возбуждением ядер-мишеней при столкновении с ядрами, имеющими структуру гало. Развита методика расчета процессов кулоновской и ядерной фрагментации с учетом их интерференции, что является необходимым элементом для согласованного анализа реакций развала на тяжелых и легких мишенях в рамках единого микроскопического подхода.

Практическая ценность работы. Разработанный метод активно использовался для анализа экспериментов по спин-изоспиновым возбуждениям атомных ядер в реакциях перезарядки (${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{He}$), выполненных в РНЦ "Курчатовский институт".

Результаты, представленные в диссертации, могут найти и частично уже нашли применение в теоретических и экспериментальных исследованиях свойств экзотических ядер с помощью ядерных реакций, которые проводятся в ряде российских и зарубежных научных центрах (ОИЯИ, РНЦ "Курчатовский институт", GSI, RIKEN)

**На защиту выносятся следующие
основные положения:**

1. Развита новая микроскопическая четырехчастичная методика для описания реакций развала ядер с двухнейтронным гало с учетом характерных особенностей их структуры. Подход основан на методе искаженных волн и пригоден для анализа низколежащих возбуждений непрерывного спектра вблизи порога развала, области наиболее чувствительной к проявлению специфических особенностей структуры гало. Метод позволяет рассчитывать все наблюдаемые кинематически полные эксперименты в ядро-ядерных столкновениях при средних и промежуточных энергиях, в которых доминируют одноступенчатые процессы. Разработанный метод создает основу спектроскопии непрерывного спектра через последовательный анализ разнообразных корреляционных сечений, доступных в кинематически полных экспериментах.
2. Развита методика расчета процессов неупругой фрагментации ядер с двухнейтронным гало при столкновениях с ядрами, в результате ко-

торых происходят неупругие возбуждения мишени. Метод использует оптическую редукцию многочастичной функции Грина. Впервые проведены расчеты вкладов неупругой фрагментации в реакциях развала ${}^6\text{He}$ при столкновениях со сложными ядрами при промежуточных энергиях для кинематически полных экспериментов.

3. Развита теория для электронного рассеяния на ядрах со структурой двухнейтронного гало с полным учетом взаимодействия в конечном состоянии между фрагментами развала. Теория используется для описания процессов с малыми переданными импульсами, ведущими к низкоэнергетическим возбуждениям ядра. Предсказываются сечения неупругого рассеяния электронов на ядре ${}^6\text{He}$ и сечения совпадения с фрагментами развала. Показано, что корреляционные измерения являются уникальным инструментом исследования сложной динамики ядерных возбуждений. Получено полуаналитическое выражение для связи между зарядовыми и материальными среднеквадратичными радиусами боромиевских ядер с двухнейтронным гало, основанное на знании соответствующих радиусов для фрагментов.
4. В рамках развитого метода проведен анализ экспериментальных данных кинематически полных экспериментов по развалу ${}^6\text{He}$ на легких и тяжелых мишенях при промежуточных энергиях столкновений. Впервые, в микроскопических расчетах получено хорошее описание как абсолютных величин сечений, так и формы спектров для реакций, в которых доминируют различные механизмы развала: ядерный и кулоновский. Продемонстрирована важная роль и необходимость учета неупругой фрагментации и кулон-ядерной интерференции для согласованного описания экспериментальных данных.
5. Показано, что узкие распределения фрагментов по импульсам в реакциях развала обусловлены распадами низкоэнергетических возбуждений, сила переходов которых в ядрах с гало концентрируется вблизи порога развала. Учет взаимодействия в конечном состоянии между фрагментами является определяющим для одновременного описания распределений по моментам нейтронов и кора. Получено, что форма распределений по поперечным импульсам является симметричной и может быть асимметричной для распределений по продольным импульсам. Асимметрия определяется интерференцией

между ядерными состояниями с различной четностью, возбуждаемыми при одинаковой энергии со сравнимой интенсивностью.

Апробация диссертации. Результаты, включенные в диссертацию, докладывались на семинарах ЛТФ, ЛЯР и ЛВЭ ОИЯИ, университетов г. Бергена (Норвегия), Гилдфорда (Англия), Гиссена (Германия) и различных международных конференциях: International School - Seminar on Heavy Ion Physics (Дубна, 1993); International Workshop on Radioactive Nuclear Beams Produced by Fragment - Separation Technique (Varna, Bulgaria, 1993); XV Nuclear Physics Divisional Conference "Low Energy Nuclear Dynamics" (St. - Petersburg, 1995); International Workshop "Extremes of Nuclear Structures" (Hirschegg, Austria, 1996); Joint Study Weekend on Drip-line Nuclei "Halo-96" (Guildford, UK, 1996); VI International School Seminar "Heavy Ion Physics" (Дубна, 1997); International Workshop "Light Exotic Nuclei: Structure and Reactions" (Дубна, 1998); International Conference "Nuclear Structure and Related Topics" (Дубна, 1997, 2000 и 2003); Workshop on Heavy Ion Modelling (Bergen, Norway, 1999); XV International Seminar on High Energy Physics Problems (Дубна, 2000); рабочее совещание "Изучение структуры экзотических ядер в релятивистских пучках методом ядерных фотоэмульсий" (Дубна, 2000); Workshop on the Physics of Halo Nuclei (Trento, Italy, 2001); North-West Europe Nuclear Physics Conference (Bergen, Norway, 2001); XV International School on Nuclear Physics, Neutron Physics and Nuclear Energy (Varna, Bulgaria, 2003); 2nd National Conference on Theoretical Physics (Constanta, Romania, 2004); Workshop on Computational Advances in the Nuclear Many-Body Problem (Oslo, Norway, 2004); International School "Selected Topics in Nuclear Theory" (Дубна, 2004); LV National Conference on Nuclear Physics "Frontiers in the Physics of Nucleus" (St. Petersburg, Peterhof, 2005); The International Student School "Nuclear Theory and Astrophysical Applications" (Дубна, 2005).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 32 работах, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения и приложения. Общий объем диссертации - 177 страниц. Она содержит 4 таблицы, 38 рисунков и библиографический список литературы, включающий 175 наименования.

Содержание диссертации

Во введении очерчен круг рассматриваемых физических вопросов, сформулированы тема и цели диссертации, обосновывается их актуальность, схематично изложено содержание диссертации.

Кратко обсуждаются основные экспериментальные факты, указывающие на появление структуры гало в легких ядрах, находящихся на границе нуклонной стабильности. Описываются особенности ядер с гало по сравнению со структурой стабильных ядер. Рассматриваются теоретические модели, используемые для описания структуры атомных ядер; проблемы и трудности, с которыми они сталкиваются при описании структуры экзотических ядер; модификации, необходимые для расширения области использования ядерных моделей. При описании структуры гало отмечается особая роль малочастичных подходов, в рамках которых можно дать наиболее простую и физически прозрачную интерпретацию феномена гало в атомных ядрах.

Кратко обсуждаются различные типы ядерных реакций, используемых для исследования ядер с гало, и теоретические подходы для их описания. Отмечается, что для расчетов реакций развала ядер с однеитронным гало развито несколько микроскопических моделей, в то время как для реакций развала ядер с двухнеитронным гало не существовало методов, способных описать совокупность наблюдаемых, характеризующих движение трех фрагментов развала с полной энергией возбуждения около порога. Данная область возбуждений является наиболее чувствительной к проявлению специфических особенностей структуры гало. Поэтому развитие моделей реакций, адекватно учитывающих специфику гало и позволяющих в рамках единой динамической картины рассчитывать широкий спектр наблюдаемых, является необходимым элементом для извлечения достоверной информации о структуре ядра из кинематически полных экспериментов.

Излагается логика представления материала в диссертации, а именно, что изложение метода в главах следует в порядке усложнения механизма реакции развала: от процессов, определяемых электромагнитными взаимодействиями, к процессам, определяемым нуклон-нуклонными силами; от реакций, где возможна только упругая фрагментация к реакциям, в которых происходит как упругие, так и неупругие развалы; от чисто ядерной фрагментации к сосуществованию кулоновской и ядерной диссоциаций.

В главе 1 отмечается, что экспериментальные возможности исследования ядер с гало ограничиваются их малым временем жизни и осуществляются в реакциях, вызываемых столкновениями с другими ядрами в обратной кинематике. Теоретический анализ данных реакций требует учета нуклон-нуклонных взаимодействий между ядрами. Сила и сложный характер нуклон-нуклонных взаимодействий вызывает неопределенности в отделении механизма ядерной реакции от структуры ядра. Несмотря на большое количество информации о ядрах с гало, полученной из столкновений с другими ядрами, для исследования их структуры желательно использовать более точные методы. Рассеяние электронов является одним из наиболее точных и проверенных методов изучения структуры атомных ядер, что определяется возможностью отделения структуры ядра от влияния механизма реакции, осуществимое благодаря слабости и хорошо известным свойствам электромагнитного взаимодействия электрона с ядерными зарядами и токами.

В первом разделе главы развивается модель для описания процесса рассеяния электронов, ведущего к низкоэнергетическим возбуждениям ядер, имеющих структуру двухнейтронного гало. В приближении однофотонного обмена выводится сечение электронного рассеяния для развала на три фрагмента с полным учетом взаимодействия в конечном состоянии между ними. Так как гало проявляется в процессах ведущих к возбуждению низколежащих состояний при небольших переданных импульсах, то для описания ядерных волновых функций используется нерелятивистское уравнение Шредингера и применяется нерелятивистская редукция операторов тока. В дополнение, при малых переданных импульсах вклады от конвекционного и спинового токов малы по сравнению с вкладами от кулоновского взаимодействия. Это значит, что при интересующих нас кинематических условиях доминирует вклад от кулоновского взаимодействия и только его достаточно учитывать при расчете сечений неупругого рассеяния. Ключевые элементы модели включают последовательный учет в координатном пространстве трехчастичных особенностей структуры гало в связанном состоянии и в непрерывном спектре. Для этого использовалась трехчастичная кластерная модель, в рамках которой можно получить хорошее описание свойств основного состояния и которая является естественным базисом для расчетов состояний непрерывного спектра, распадающихся на три фрагмента. Для решения трехчастичных задач и расчетов переходных плотностей для возбуждения в континууме приме-

няется метод гиперсферических гармоник.

В втором разделе главы модель используется для расчетов электронного рассеяния на ${}^6\text{He}$. В начале раздела обсуждается структура ядра ${}^6\text{He}$, приводятся расчеты структуры основного состояния и низколежащих возбуждений в непрерывном спектре в рамках трехчастичной $\alpha + n + n$ модели. В ядрах с гало заряд сосредоточен внутри кора, и зарядовое распределение ядра в основном состоянии определяется движением кора относительно центра масс ядра. Из измерений зарядового радиуса можно выделить среднее смещение кора от центра масс ядра, которое связано со средними расстояниями до нейтронов гало, давая таким образом меру материальных размеров всего ядра. Указывается возможность реконструировать среднеквадратичный материальный радиус ядра с гало, используя данные по зарядовым и материальным радиусам конститuentов боромиевских ядер. Используя экспериментальные значения для зарядового радиуса точечных протонов в ${}^6\text{He}$, $\sqrt{\langle r_p^2 \rangle} = 1.912 \pm 0.0018$ фм, недавно измеренный методами лазерной спектроскопии, а также экспериментальные зарядовый (для точечных протонов) и материальный радиусы α -частицы получена оценка среднеквадратичного материального радиуса ${}^6\text{He}$ $\sqrt{\langle r_m^2 \rangle} = 2.59 \pm 0.05$ фм.

Рассчитывается упругое рассеяние электронов на ${}^6\text{He}$. Зарядовый формфактор ${}^6\text{He}$, вычисленный в рамках трехчастичной кластерной модели, сравнивается с зарядовым формфактором ${}^4\text{He}$ и с приближенным выражением, однозначно определяемым среднеквадратичным зарядовым радиусом ядра и справедливым при малых переданных импульсах. Отмечается, что в рамках кластерной модели зарядовый формфактор полностью определяется движением центра масс кора и отклонение экспериментальных данных от теоретических расчетов может свидетельствовать об изменении свойств кора внутри ядра (поляризация кора) вследствие взаимодействия с нейтронами гало. Положение минимума зарядового формфактора ${}^6\text{He}$, согласно кластерной модели, совпадает с положением минимума в ${}^4\text{He}$. Проверка данного предсказания будет демонстрировать возможность использования кластерных моделей при больших переданных импульсах, но это будет трудной экспериментальной задачей, так как потребует измерений для переданных импульсов больших, чем 3 фм^{-1} .

Рассчитываются инклюзивные спектры неупругого рассеяния электронов с энергией 500 МэВ на ${}^6\text{He}$. Расчеты показывают, что дипольные возбуждения доминируют в спектре при малых переданных импульсах.

Позиция максимума и форма дипольного спектра изменяется с увеличением переданного импульса. Это поведение отлично от поведения хорошо известного 2^+ резонанса. Экспериментальное подтверждение этого наблюдения может быть сильным аргументом против резонансной природы мягких дипольных возбуждений.

Рассчитываются спектры электронов в совпадении с фрагментами развала. Показывается, что измерение электронов в совпадении с фрагментами может дать ценную информацию о ядерной структуре. Картина угловых и энергетических корреляций является довольно специфической для разных мультипольных возбуждений. Корреляционные измерения могут быть уникальным инструментом для исследования сложной динамики ядерных возбуждений и открыть дорогу к спектроскопии непрерывного спектра.

В настоящее время не существует экспериментальных установок для выполнения экспериментов по рассеянию электронов на короткоживущих ядрах. Но в ближайшем будущем планируется проведение электрон-ядерных экспериментов коллайдерного типа на новых установках по производству радиоактивных ядер в RIKEN и GSI. Можно ожидать, что первые измерения будут выполнены для процессов с наибольшими сечениями, а именно для упругого и инклюзивного неупругого рассеяния электронов. Поэтому результаты расчетов в данной главе имеют предсказательный характер.

В главе 2 рассматриваются реакции развала ядер с двухнейтронным гало, инициированные сильными взаимодействиями при столкновениях с нуклонами. По сравнению с электронным рассеянием данные реакции имеют более сложную динамику, в которой структура ядра и механизм ядерной реакции тесно связаны друг с другом. Тем не менее механизмы реакций развала на нуклонах проще, чем реакции развала на сложных ядрах, так как отсутствуют процессы неупругой фрагментации. Для нас центральным вопросом является исследование специфических особенностей структуры гало в реакциях развала. Поэтому из множества различных каналов реакций фрагментации выделяются процессы, наиболее чувствительные к гало. Следовательно обсуждение ограничивается столкновениями, в которых кор не разрушается, и которые ведут к низкоэнергетическим возбуждениям ядер с гало. Для исследования структуры экзотических ядер в неупругом рассеянии необходимо проведение экспериментов в обратной кинематике, в которой нестабильные ядра сталки-

ваются с нуклонной мишенью. В зарядово-обменных реакциях этих целей можно достичь и традиционным способом, рассеивая нуклоны на мишенях из стабильных ядер, например как в реакции ${}^6\text{Li}(n,p){}^6\text{He}$.

В первом разделе главы развивается микроскопическая четырехчастичная модель реакций развала ядер с двухнейтронных гало при столкновении с нуклонами, пригодная для описания ситуаций, в которых доминируют одноступенчатые процессы. В таких условиях при низкоэнергетических возбуждениях ядра механизмы реакции становятся более простыми и можно описывать динамику процесса в рамках метода искаженных волн. В развиваемом методе Т-матрица реакции определяется тремя составляющими: (i) ядерной структурой, описывающей переход из основного состояния ядра с двухнейтронным гало в непрерывный спектр состояний для развала на три фрагмента и выраженной через переходные плотности (ii) эффективным взаимодействием между нуклонами налетающего ядра и мишени; (iii) искаженными волнами, описывающими относительное движение сталкивающихся систем. В настоящее время рассмотрение всех ингредиентов (ядерной структуры и реакционной динамики) в рамках единого подхода с одним реалистическим нуклон-нуклонным взаимодействием находится за пределами вычислительных возможностей. Поэтому приходится использовать различные эффективные силы для описания ядерной структуры и механизма реакции. Тем не менее, составляющие (ii) и (iii) могут быть связаны, так как свойства эффективных нуклон-нуклонных взаимодействий проявляются в нуклон-ядерных потенциалах рассеяния. Самосогласованность требует, чтобы эффективное взаимодействие, ответственное за реакцию, использовалось также для расчета оптических потенциалов, необходимых для вычисления искаженных волн. В таком случае можно использовать экспериментальные данные по упругому рассеянию и полным сечениям реакции для определения эффективных взаимодействий и проверки точности расчетов волновых функций искаженных волн. Самосогласование значительно ограничивает свободу модификации эффективных взаимодействий в расчетах сечений развала. Отметим также, что в неупругом рассеянии взаимодействие со всеми нуклонами налетающего ядра (кора и гало) складываются когерентно в амплитуде. Таким образом взаимодействие между степенями свободы кора и гало является существенным и оказывает сильное влияние на динамику реакции. Для зарядово-обменных реакций суммирование ограничено только нейтронами гало, так как рассматриваются процессы в которых

кор неразрушается. Зарядово-обменная реакция на нуклонах кора приводит к его разрушению, и такие процессы, например для ${}^6\text{He}$, ведут к более высоким энергиям возбуждения ядра по сравнению с рассматриваемыми в данной главе. Кластерная структура ядер с гало и взаимодействие в конечном состоянии между фрагментами в трехчастичном непрерывном спектре учитывается в рамках метода гиперсферических гармоник. В рамках модели можно рассчитывать абсолютные величины разнообразных сечений, доступных при кинематически полных измерениях фрагментов развала. Модель предполагает отдельные переходные плотности, соответствующие ядерным откликам от нейтронов гало и нуклонов кора.

В разделе 1.2 представляется описание расчетов структуры ядер с двухнейтронным гало. Так как структура основного состояния ${}^6\text{He}$, его низколежащих возбуждений в непрерывном спектре и их описание в рамках метода гиперсферических гармоник было представлено в предыдущей главе, то приводятся только детали, касающиеся расчета основного состояния ${}^6\text{Li}$ и важные для расчета зарядово-обменных переходных плотностей (${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{He}$). Для ядра ${}^{11}\text{Li}$ в трехчастичной ${}^9\text{Li} + n + n$ кластерной модели представляются расчеты структуры как основного состояния, так монополярных и дипольных возбуждений в непрерывном спектре. Отмечается важность включения $1s$ -интродер состояний в расчеты структуры ${}^{11}\text{Li}$, что приводит к появлению больших примесей компонент $(1s_{1/2})^2$ в волновой функции основного состояния.

В разделе 1.3 обсуждается проблема идентификации "истинных" трехчастичных резонансов и показывается, что исследование энергетических корреляций в движении фрагментов распада может быть полезным инструментом в решении данного вопроса.

В разделе 1.4 обсуждаются эффективные взаимодействия, используемые для реакционных расчетов. Эффективное взаимодействие между нуклонами сталкивающихся ядер является ключевым элементом в микроскопических подходах к описанию одноступенчатых реакций. Оно отличается от взаимодействия двух свободных нуклонов, так как один из нуклонов находится в ядерной среде и его движение ограничено принципом Паули и взаимодействием с ядерным окружением. Обычно эти модификации выражаются посредством зависимости взаимодействия от плотности ядерной среды. Для нейтронов гало ситуация упрощается из-за их малой энергии связи и большой вероятности находится вне кора сильно связанных частиц. В процессе взаимодействия с нейтронами гало

малые передачи энергии и импульса не блокированы, как происходит в случае взаимодействия с нуклонами кора. В результате, взаимодействие с нейтронами гало похоже на взаимодействие со свободными нуклонами, и в близкой аналогии с импульсным приближением при промежуточных энергиях для его описания может быть использовано t -матричное взаимодействие. Вклад обменной (knock-out) амплитуды можно учесть в псевдопотенциальном приближении. Параметры эффективных сил проверяются вычислениями оптических потенциалов, которые применяются для описания экспериментальных данных по упругому рассеянию на протоне как ^{11}Li , так и ^9Li . При этом для описания взаимодействия протонной мишени с нуклонами кора и нейтронами гало использовались, соответственно, зависящие от плотности JLM силы и свободное t -матричное взаимодействие. Теория хорошо описывает данные по упругому рассеянию и правильно воспроизводит экспериментально наблюдаемую разницу в дифференциальных сечениях между ^{11}Li и ^9Li . Эта разница объясняется движением кора ^9Li в ядре ^{11}Li . Таким образом не появляются новых параметров, когда теория применяется к анализу неупругого рассеяния ^{11}Li .

В разделе 2.1 представляются расчеты зарядово-обменных (n,p)-реакций и неупругого рассеяния на протонах, ведущих к основному и возбужденным состояниям ядра ^6He . Хорошее согласие с экспериментальными данными подтверждают правильность динамической картины, положенной в основу описания реакций с нуклонами при промежуточных энергиях. Показано, что узкие распределения фрагментов по импульсам в реакциях развала обусловлены распадами низкоэнергетических возбуждений, сила переходов которых в ядрах с гало концентрируется вблизи порога развала. Учет взаимодействия в конечном состоянии между фрагментами является определяющим для одновременного описания распределений по моментам нейтронов и кора.

В разделах 2.2-2.3 в рамках развитой модели анализируется неупругое рассеяние ^{11}Li на протонной мишени и сравнивается с экспериментальными данными корреляционных измерений (А.А. Korshennikov et al., Phys. Rev. Lett., 78 (1997) 2317), полученных при энергии столкновения 68 МэВ/А. Расчеты неупругого рассеяния показывают концентрацию дипольных и монопольных возбуждений ^{11}Li около трехчастичного порога и хорошо описывают наблюдаемый пик в экспериментальном спектре ^{11}Li . Также, теория хорошо воспроизводит соответствующие эксперименталь-

ные угловые распределения и подтверждает доминирование дипольных возбуждений. Для выделения монополярных возбуждений необходимы экспериментальные данные на малых углах.

Касаясь динамики реакции, правильный учет трансляционной инвариантности исключительно важен для ядер с гало. Показано, что реакционные процессы с большой передачей импульса определяются, главным образом, взаимодействиями с нуклонами кора, в то время как при небольших переданных импульсах взаимодействия со всеми нуклонами, кора и гало, являются одинаково важными и приводят к сильно коррелированной динамике.

В разделах 2.4-2.5 рассматриваются расчеты энергетических и угловых корреляции между фрагментами развала ^{11}Li . Отмечается, что разные корреляции чувствительны к различным аспектам механизма реакции и ядерной структуры. Показывается, что двухмерные контуры энергетических корреляций фрагментов развала являются полезными для прояснения природы возбуждений гало и установления их характера. Далее, угловые корреляции чувствительны к парциальному составу орбитальных угловых моментов возбуждений ядер с гало. Расчеты угловых корреляций в неупругом рассеянии ^{11}Li показывает, что смесь орбитальных угловых моментов с различной четностью в непрерывном $^9\text{Li} + n + n$ спектре приводит к сильной асимметрии в случае дипольных возбуждений.

Таким образом, одновременный анализ множества наблюдаемых характеристик в рамках одной теории используется для уменьшения неопределенностей модельных предположений, связанных с динамикой реакции. Показано, что корреляции в реакциях развала являются ценным инструментом для исследования истинной природы непрерывного спектра возбуждений ядер с гало. Кинематически полные эксперименты при условии доминирования одно-ступенчатых процессов являются наиболее достоверным и перспективным инструментом для исследования структуры ядер с гало.

В **главе 3** рассматриваются реакции развала ядер с двухнейтронным гало, вызванные столкновениями с другими ядрами. Именно из исследования ядро-ядерных столкновений получена к настоящему времени большая часть информации о ядрах со структурой гало. Несмотря на то, что в динамике ядро-ядерных и нуклон-ядерных столкновений имеется много общих черт, есть и существенные различия. Отметим три момента: i) конечные размеры обоих сталкивающихся ядер приводят к необходимо-

сти рассмотрения более сложной геометрии реакционного процесса, ii) в дополнении к упругой фрагментации, происходящей в нуклон-ядерных столкновениях, при ядро-ядерных взаимодействиях возможны процессы неупругого развала, в которых стабильное ядро-мишень переходит в возбужденное состояние, iii) использование мишеней с разным зарядом (легкие и тяжелые ядра) обогащает динамику процесса и позволяет варьировать соотношение между различными механизмами развала, то есть между ядерной и кулоновской фрагментацией. В данной главе формализм, развитый для описания процессов развала ядер с гало при столкновении с нуклонами, обобщается для случая ядро-ядерных столкновений, а именно: учитываются конечные размеры обоих ядер; развивается модель для вычисления процессов неупругой фрагментации; развиваются численные методы, позволяющие учитывать одновременно кулоновскую и ядерную фрагментацию. Развитый подход применяется к анализу экспериментальных данных по развалу ${}^6\text{He}$ в столкновениях со стабильными мишенями при промежуточных энергиях, полученных в GSI, а также к анализу зарядово-обменных реакций (${}^6\text{Li}, {}^6\text{He}$) при небольших энергиях, используемых как для исследования структуры гало, так и изучения механизмов реакции перезарядки.

В первом разделе данной главы обсуждаются основные приближения, положенные в основу развиваемой модели, и физические условия при которых они справедливы. Согласно модели реакция развала рассматривается как неупругое возбуждение ядра с гало прямо в состояние непрерывного спектра трех фрагментов развала. Будет ли данное состояние континуума резонансным или нет определяется взаимодействием в конечном состоянии между фрагментами.

В разделе 1.1 из сечения фрагментации производится выделение вкладов упругого и неупругого развала. Для этого полное сечение фрагментации записывается в виде матричного элемента от многочастичной функции Грина. Применение оптико-модельной редукции, состоящей в замене многочастичной функции Грина на ее среднее значение по основному состоянию, позволяет упростить исходное выражение и привести его к виду, доступному для практических расчетов.

В разделе 1.2, используя метод гиперсферических функций для описания структуры ядра с двухнейтронным гало, выводятся подробные формулы для эксклюзивного сечения упругого развала в ядро-ядерных соударениях. Отмечается, что после фрагментации существует четыре различ-

ных, физически значимых импульса: начальный импульс пучка, импульс относительного движения между центрами масс вылетающего ядра и мишени и два относительных импульса между тремя фрагментами развала. Импульс пучка фиксирован начальными условиями и память о его величине и направлении сохраняется в системе через законы сохранения. Другие импульсы являются независимыми переменными через которые выражаются динамические корреляции. Используя данные переменные выводятся выражения для иерархической цепочки наблюдаемых, позволяющих реконструировать спектры возбуждений и множество различных корреляций между фрагментами, которые доступны для исследований в кинематически полных экспериментах.

В разделе 1.3 выводятся подробные выражения для эксклюзивного сечения неупругого развала. Полученные выражения имеют форму, пригодную для изучения пространственной локализации сечений неупругой фрагментации.

В разделе 1.4 выводятся выражения для распределений фрагментов по продольным и поперечным импульсам. Из анализа полученных выражений следует, что при развале боромиевских ядер распределение фрагментов по импульсам имеет симметричную форму для поперечных распределений и может быть асимметричным для продольных распределений. Асимметрия распределений обусловлена интерференцией между ядерными состояниями с различной четностью, которые возбуждаются со сравнимой интенсивностью при одинаковой энергии возбуждения.

Для непротиворечивого описания электромагнитной диссоциации необходим одновременный учет кулоновского и ядерного взаимодействия между нуклонами сталкивающихся ядер. Дальнодействующая природа кулоновских сил является главной особенностью и приводит к появлению дополнительных эффектов и вычислительных проблем по сравнению с расчетами реакций с ионами, в которых учтено только ядерное взаимодействие. В разделе 1.5 развивается схема вычислений, позволяющая совершать квантово-механические расчеты ядерного и кулоновского возбуждений, включая их интерференцию, без искусственного разделения на различные механизмы.

В разделе 1.6 обсуждаются вопросы взаимосвязи между степенями свободы нуклонов кора и гало, демонстрируется важность точного учета эффектов отдачи в реакционной динамике при развале легких ядер. Откуда следует, что правильный учет трансляционной инвариантности в

легких ядрах, связанный с эффектами отдачи, является важной частью реакционной динамики и должен корректно учитываться в количественном описании ядерных реакций.

В разделе 2.1 исследуются реакции перезарядки для изучения структуры возбуждений ядер с гало. Наиболее естественный путь для исследования мягких мод возбуждения в ядрах с гало является их неупругое рассеяние на стабильных ядрах в обратной кинематике. Среди экзотических ядер ${}^6\text{He}$ является единственным ядром, которое может быть исследовано более простым способом, через возбуждение состояний в зарядово-обменном процессе (n,p) типа на ${}^6\text{Li}$. В этом разделе анализируются дифференциальные сечения зарядово-обменной реакции ${}^6\text{Li}({}^7\text{Li}, {}^7\text{Be}){}^6\text{He}$, измеренные в Курчатовском институте (Sakuta et al, Europhys. Lett., **22** (1993) 511) при энергии пучка $E_{7\text{Li}} = 78$ и 82 МэВ. Показывается, что наилучшее описание формы угловых распределений получается для дипольных возбуждений.

В следующих разделах главы подробно анализируются в рамках развитого подхода данные кинематически полных экспериментов по развалу ${}^6\text{He}$ в столкновениях со стабильными мишенями при промежуточных энергиях, полученные в GSI.

В разделе 2.3 проводится сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными по инклюзивным сечениям и спектрам возбуждения ${}^6\text{He}$ для развала при столкновениях с ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{208}\text{Pb}$. Несмотря на различные механизмы двух реакций, расчеты правильно описывают как абсолютные значения, так и форму спектра для обоих процессов. Тем не менее, расчеты немного недооценивают полные сечения из-за недооценки вкладов при больших энергиях возбуждения. В этом отношении согласие с экспериментом может быть улучшено за счет учета дополнительных вкладов от переходов более высоких мультиполярностей, появляющихся при больших энергиях возбуждения и не рассматриваемых в представленных расчетах. Исследована пространственная локализация неупругой фрагментации и показано, что она носит поверхностный характер и сдвигается дальше от ядра с увеличением мультиполярности ядерных переходов.

В разделе 2.4 анализируются энергетические распределения фрагментов развала ${}^6\text{He}$. Теоретические расчеты описывают существующие экспериментальные данные. Продемонстрирована необходимость учета взаимодействия в конечном состоянии и показано, что без его учета только

спектр одиночного тяжелого фрагмента имеет форму качественно похожую на результаты полных вычислений, в то время как все другие спектры заметно отличаются.

В разделе 2.5 расчеты распределений фрагментов по импульсам сравниваются с экспериментальными данными. Показана определяющая роль возбуждения мягких мод в формировании узких распределений по импульсам и продемонстрирована важная роль учета взаимодействия в конечном состоянии для одновременного описания формы распределений тяжелого и легкого фрагментов развала. Взаимодействие в конечном состоянии определяет структуру возбуждений непрерывного спектра и, таким образом, прямо влияет на ширину импульсных распределений.

В разделе 2.6 анализируются дифференциальные угловые сечения для рассеяния ${}^6\text{He}$. Показано, что чисто кулоновское взаимодействие ответственно за появление пика на очень малых углах для рассеяния на легких мишенях. Такой пик является сигналом развала ядер с гало на больших расстояниях и, вследствие слабости кулоновских сил в системе ${}^6\text{He} + {}^{12}\text{C}$, четко отделяется от пика, обусловленного ядерным развалом.

В разделе 2.7 представлены расчеты угловых распределений фрагментов развала ${}^6\text{He}$. В трехчастичном развале ядер можно исследовать множество различных угловых распределений. В данной разделе рассматривается только один пример - угловые распределения α -частицы по отношению к направлению пучка для развала ${}^6\text{He}$ на ${}^{12}\text{C}$. Показано, что угловые распределения для упругого и неупругого развала качественно различны. Только в упругом развале из состояний с ненулевым полным угловым моментом появляется угловая анизотропия, в то время как в неупругой фрагментации α -частицы не имеют предпочтительного направления. Формальной причиной является то, что оптический потенциал, используемый при вычислении неупругой фрагментации, сферически симметричен.

В конце каждой главы собраны выводы по результатам изложенных в ней исследований, а в **заключении** сформулированы основные результаты представляемой диссертации.

В **приложении** изложены основы метода гиперсферических гармоник, его использования для решения уравнения Шредингера, описывающего структуру ядер с двухнейтронным гало в рамках трехчастичных кластерных моделей, а также представлены методы, используемые для расчета переходных плотностей и ядерных формфакторов.

Результаты, включенные в диссертацию, опубликованы
в следующих работах:

1. Ф.А. Гареев, С.А. Гончаров, С.Н. Ершов, Г.С.Казача, Е. Банг, *Исследование реакций перезарядки (${}^6\text{Li}, {}^6\text{He}$), ЯФ*, 1983, т. 38, с. 73-81.
2. D.V. Aleksandrov, Yu.A. Glukhov, A.S. Demyanova, A.A. Ogloblin, S.B. Sakuta, S.A. Fayans, F.A. Gareev, S.N. Ershov, I.N. Borzov, J. Bang, *A Study of the ${}^{14}\text{C}({}^6\text{Li}, {}^6\text{He}){}^{14}\text{N}$ Reaction at 93 MeV*, Nucl. Phys., 1985, v. A436, p. 338-364.
3. J. Bang, F.A. Gareev, S.N. Ershov, N.I. Pyatov, S.A. Fayans, *Microscopic DWIA Analysis of the (p,n) Reactions*, Nucl. Phys., 1985, v. A440, p. 445-479.
4. A.S. Demyanova, S.A. Fayans, Yu.A. Glukhov, A.A. Ogloblin, S.B. Sakuta, S.N. Ershov, F.A. Gareev, N.I. Pyatov, *A study of the ${}^{90}\text{Zr}({}^6\text{Li}, {}^6\text{He}){}^{90}\text{Nb}$ reaction at $E_{{}^6\text{Li}} = 93$ MeV*, Nucl. Phys. 1985, v. A444, p. 519-540.
5. Ф.А. Гареев, С.Н. Ершов, Н.И. Пятков, С.А. Фаянс, *Спиновые возбуждения в ядрах*, ЭЧАЯ, 1988, т. 19, с. 864-931.
6. Ф.А. Гареев, С.Н. Ершов, А.А. Оглоблин, С.Б. Сакута, *Реакции перезарядки с ионами лития и их применение для изучения структуры ядра*, ЭЧАЯ, 1989, т. 20, с. 1293-1340.
7. A.S. Demyanova, J.M. Bang, F.A. Gareev, S.A. Goncharov, S.N. Ershov, A.A. Ogloblin, P.P. Korovin, *Investigation of the Nucleus-Nucleus Interaction at Small Distances in Elastic Scattering of ${}^6\text{Li}$ and the Reaction (${}^6\text{Li}, {}^6\text{He}$) on Carbon Isotopes*, Nucl. Phys. 1989, v. A501, p. 336-366.
8. B.V. Danilin, M.V. Zhukov, S.N. Ershov, F.A. Gareev, R.S. Kurmanov, J.S. Vaagen and J.M. Bang, *Dynamical multichuster model for electro-weak and charge-exchange reactions*, Phys. Rev., 1991, v. C43, p. 2835-2843.
9. B.V. Danilin, M.V. Zhukov, S.N. Ershov, F.A. Gareev, R.S. Kurmanov, J.S. Vaagen, T. Rogde, *Nuclei with $A = 6$ as Probes for Selective Excitation of Nuclear States in Charge-Exchange Reactions*, 3rd International Spring Semonar on Nuclear Physics "Understanding the Variety of Nuclear Excitations", Ischia, 1990, ed. by A. Covello, World Scientific Publishing Company, 1991, pp. 155 -166.

10. S.A. Fayans, S.N. Ershov, E.F. Svinareva, *New Soft Mode in the ^{11}Li Nucleus Excited through (p,p') Reaction*, Phys. Lett., 1992, v. **B292**, p. 239-241.
11. F.A. Gareev, S.N. Ershov, E.F. Svinareva, B.V. Danilin, S.A. Fayans, M.V. Zhukov, S.A. Goncharov, J.S. Vaagen, *Proton Elastic Scattering on Neutron Halo Nuclei*, Europhys. Lett., 1992, v. **20**, p. 487-491.
12. M. Lewitowicz, C. Borcea, ..., S.N. Ershov et al., *Elastic scattering of a secondary ^{11}Li beam on ^{28}Si at 29 MeV/nucleon*, Nucl. Phys., 1993, v. **A562**, p. 301-316.
13. S.B. Sakuta, A.A. Ogloblin, O.Yu. Osadchy, Yu.A. Glukhov, S.N. Ershov, F.A. Gareev, J.S. Vaagen, *Direct experimental evidence for a soft dipole response in ^6He* , Europhys. Lett., 1993, v. **22**, p. 511-515.
14. Ф.А. Гареев, С.Н. Ершов, Г.С. Казача, С.Ю. Шмаков, В.В. Ужинский, *Изучение свойств экзотических ядер в упругом рассеянии*, ЯФ, 1995, т. **58**, с. 620-631.
15. S.N. Ershov, T. Rogde, B.V. Danilin, J.S. Vaagen, I.J. Thompson and F.A. Gareev, *Halo excitations of ^6He in inelastic and charge-exchange reactions*, Phys. Rev., 1997, v. **C56**, p. 1483-1499.
16. B.V. Danilin, T. Rogde, S.N. Ershov, H. Heiberg-Andersen, J.S. Vaagen, I.J. Thompson and M.V. Zhukov, *New modes of halo excitations in the ^6He nucleus*, Phys. Rev., 1997, v. **C55**, R577-R581.
17. B.V. Danilin, T. Rogde, S.N. Ershov, H. Heiberg-Andersen, J.S. Vaagen, I.J. Thompson, M.V. Zhukov, *Reply to "Comment on "New Modes of Halo Excitations in the ^6He Nucleus"*, Phys. Rev., 1999, v. **C59**, p. 556-557.
18. J.S. Vaagen, B.V. Danilin, S.N. Ershov et al., *Theoretical studies of light halo nuclei; Bound states and continuum*, Nucl. Phys., 1997, v. **A616**, p. 426c-437c.
19. S.N. Ershov, B.V. Danilin, T. Rogde and J.S. Vaagen, *New Insight into Halo Fragmentation*, Phys. Rev. Lett., 1999, v. **82**, p. 908-911.

20. B.V. Danilin, I.J. Thompson, M.V. Zhukov, J. Vaagen, S.N. Ershov, J.M. Bang, *The Borromean halo excitations*, Few-Body Systems, 1999, v. **10**, p. S273-S277.
21. S.N. Ershov, B.V. Danilin, J.S. Vaagen, *Four-body distorted wave theory for halo excitations*, Phys. Rev., 2000, v. **C62**, 041001(R), p. 1-4.
22. J.S. Vaagen, H. Heiberg-Andersen, B.V. Danilin, S.N. Ershov, V.I. Zagrebaev, I.J. Thompson, M.V. Zhukov, J.M. Bang, *Borromean Halo nuclei*, Physica Scripta, 2000, v. **T88**, p. 209-213.
23. S.N. Ershov, B.V. Danilin, J.S. Vaagen, *Inelastic excitations and momentum distributions in kinematically complete breakup reactions of two-neutron halo nuclei*, Phys. Rev., 2001, v. **C64**, 064609, p.1-23.
24. S.N. Ershov, B.V. Danilin, J.S. Vaagen, *Four-Body Distorted Wave Theory for Halo Excitations in Peripheral Fragmentation Reactions*, ЯФ, 2001, v. **64**, p. 1298-1303.
25. J.S. Vaagen, B.V. Danilin, S.N. Ershov, I.J. Thompson, M.V. Zhukov, *Extracting Reliable Knowledge of Halo Characteristics*, Nucl. Phys., 2001, v. **A690**, p. 302c-305c.
26. J.S. Vaagen, G. Hagen, B.V. Danilin, S.N. Ershov, I.J. Thompson, *Exotic matter at the low density limit: exploring bound and continuum structures of Borromean halo nuclei*, Proceedings "Structure and Dynamics of Elementary Matter", eds., W. Greiner, M.G. Itkis, J. Reinhardt, Kluwer Academic Publishers, 2004, p. 463-477.
27. S.N. Ershov, B.V. Danilin, J.S. Vaagen, A.A. Korshennikov, I.J. Thompson, *Structure of the ^{11}Li continuum from breakup on proton target*, Phys. Rev., 2004, v. **C70**, 054608, p. 1-9.
28. S.N. Ershov, *Breakup Reactions of Halo Nuclei*, ЯФ, 2004, v. **67**, p. 1851-1859.
29. S.N. Ershov, *Structure and Breakup Reactions of Two-Neutron Halo Nuclei*, BgNS Transactions, 2004, v. **9**, p. 70-77.
30. S.N. Ershov, *General structure of a two-body operator for spin-1/2 particles*, Phys. Rev., 2004, v. **C70**, 054604, p. 1-9.

31. B.V. Danilin, S.N. Ershov, J.S. Vaagen, *Charge and matter radii of Borromean halo nuclei: the ${}^6\text{He}$ nucleus*, Phys. Rev., 2005, v. **C71**, 057301, p.1-3.
32. S.N. Ershov, B.V. Danilin, J.S. Vaagen, *Electron scattering on two-neutron halo nuclei with full inclusion of final state interactions*, Phys. Rev., 2005, v. **C72**, p. 1-13.

Получено 5 октября 2005 г.

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 05.10.2005.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,44. Уч.-изд. л. 1,46. Тираж 100 экз. Заказ № 55045.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/