

Ш - 648



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4-82-400

ШИТИКОВА

Клара Владимировна

РАЗВИТИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА  
ГИПЕРСФЕРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ  
К СИСТЕМАТИЧЕСКОМУ ИССЛЕДОВАНИЮ  
СВОЙСТВ ЛЕГКИХ ЯДЕР

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1982

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики  
Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
старший научный сотрудник

Б.И. ЗАХАРЬЕВ

доктор физико-математических наук  
профессор

Р.И. ДЖИБУТИ

доктор физико-математических наук  
старший научный сотрудник

С.И. ДРОЗДОВ

Ведущая организация - Харьковский физико-технический институт  
АН УССР.

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1982 года.

Защита диссертации состоится " " \_\_\_\_\_ 1982 г.  
на заседании Специализированного совета Д.047.01.01 Лаборатории  
теоретической физики Объединенного института ядерных исследова-  
ний, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

Р.А. АСАНОВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Богатый экспериментальный материал, накопленный к настоящему времени, поставил перед теоретиками задачу извлечения информации о структуре ядер и механизме ядерных реакций из опытных данных, а также проверки на этой основе основных положений современной теории. В этом плане особую актуальность приобретают исследования, в которых применяются микроскопические подходы в теории ядра. Одним из таких методов является метод гиперсферических функций, сущность которого заключается во введении удобной ортонормированной системы многочастичных функций - гиперсферического базиса и в создании математического аппарата для работы с ними. При использовании этого метода в вычислениях не приходится вводить никаких внешних параметров, кроме вида и структуры нуклон-нуклонных потенциалов. При этом используются реальные  $N-N$ -взаимодействия. Метод гиперсферических функций постепенно совершенствовался и применялся ко все более широкому кругу задач физики ядра. Однако до сих пор не было систематического исследования различных ядерных свойств для совокупности ядер в этом подходе. Дело в том, что расширение сферы применения метода гиперсферических функций встречается с техническими трудностями, связанными с построением гиперсферических гармоник.

Цель работы состоит в систематическом исследовании и теоретической интерпретации совокупности свойств легких ядер в рамках специально разработанного последовательного микроскопического подхода в теории ядра, который состоит в формулировке и развитии метода построения гиперсферических функций с применением генеалогической техники, рекуррентной по числу нуклонов в ядре.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации был предложен, математически обоснован и применен перспективный метод конструирования гиперсферических функций с определенными свойствами перестановочной симметрии, который позволил провести систематическое исследование совокупности свойств легких ядер ( $A = 4 \div 16$ ).

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
БИБЛИОТЕКА

Новым вкладом является развитие математического аппарата для конструирования гиперсферических гармоник с применением эффективной генеалогической техники рекуррентной по числу нуклонов в ядре.

Впервые была предложена и апробирована приближенная вариационная трактовка метода К-гармоник в неортогональном базисе, составленном из оболочечных волновых функций с разными осцилляторными параметрами.

Впервые в формализме гиперсферических функций был реализован интерполяционный подход в теории ядра, позволяющий учесть связь между его внутренней и внешней областями.

Новым вкладом является исследование эффекта сжимаемости ядра, который автоматически учитывается в методе гиперсферических функций. Показано, что сжимаемость имеет существенное значение при описании возбужденных состояний ядер и приводит как к количественному, так и к качественному изменению характеристик этих состояний. Детальное исследование свойств параметра сжимаемости позволило дать обоснование предложенной ранее гипотезы об изменении жесткости ядра при перестройке ядерной структуры.

В формализме метода гиперсферических функций проведено систематическое исследование совокупности свойств легких ядер ( $A = 4 \div 16$ ). При этом впервые изучены спектры низших возбужденных состояний, мультипольные гигантские резонансы, спектроскопические факторы ядерных состояний по отношению к эмиссии нуклонов и кластеров, каналы распада монопольного и дипольного гигантских резонансов.

Новым вкладом является применение метода гиперсферических функций к исследованию реакций с тяжелыми ионами, что позволило предложить новый микроскопический подход к изучению этих процессов. Впервые проведено детальное теоретическое исследование проявления монопольных гигантских резонансов легких ядер в различных ядерных реакциях и сделаны определенные предсказания об энергии возбуждения, энергетически взвешенной монопольной сумме, ширине таких резонансов. Эти величины измеряются в настоящее время или будут измеряться в скором будущем в таких ядерных центрах, как ХФТИ (г. Харьков), СО АН СССР (г. Новосибирск), ИАЭ (г. Москва). Некоторые из этих предсказаний уже подтверждены последними экспериментами в Гренобле.

Предложенная и развитая в диссертации модификация метода гиперсферических функций используется в различных научных центрах, например, в ИИЯЭ (г. София, БНР), в ИЯФ (г. Краков, ПНР), в ТУ (г. Дрезден, ГДР).

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, полученные в диссертации:

1. Сформулирован и развит эффективный метод построения гиперсферических функций с определенными свойствами перестановочной симметрии. Математический аппарат реализован с применением генеалогической техники, рекуррентной по числу нуклонов в ядре. Предложенный метод сделал возможным адаптацию традиционного аппарата трансляционно-инвариантной модели оболочек в формализме гиперсферических функций.

2. Предложена и апробирована приближенная вариационная трактовка метода К-гармоник, в которой волновая функция разлагается по неортогональному осцилляторному базису. Удобство этого метода заключается в том, что с его помощью удается полностью исключить из расчета многомерные сферические координаты и в то же время нет необходимости строить большое число волновых функций ортогонального набора, количество и сложность которых быстро нарастает с увеличением числа квантов  $N$ .

3. Развита и реализована в формализме гиперсферических функций интерполяционный подход в теории ядра, который позволяет учесть связь между внутренней и внешней областями ядра. Исследования проведены на примере ядра  $H^3$ . Рассчитаны энергии связи, среднеквадратичный радиус. Изучен вопрос о роли кластерной функции в этих расчетах, а также вопрос о роли внутренней волновой функции, описывающей чистое связанное состояние трех нуклонов в расчетах дублетной фазы  $nD$ -расселения.

4. Разработана программа численного счета и составлены таблицы коэффициентов разложения (для ядер  $A = 4 \div 16$ ) радиальной части волновой функции метода К-гармоник по радиальным волновым функциям  $(3A-3)$ -мерного гармонического осциллятора. Это позволило получить аналитические выражения для матричных элементов операторов различных физических величин в формализме гиперсферических функций.

5. Детально изучен эффект сжимаемости ядра в формализме метода гиперсферических функций. В результате показано, что сжимаемость имеет существенное значение при описании возбужденных состояний ядер. Учет сжимаемости ядра приводит к количественным результатам порядка десятков процентов, а иногда и к качественным изменениям свойств ядер.

6. Проведено систематическое исследование свойств параметра сжимаемости легких ядер. В результате показано, что эта характеристика ядра растет, как функция числа частиц, примерно в 3,5 раза от начала до конца  $1P$ -оболочки. На  $\alpha$ -кластерных ядрах параметр сжимаемос-

Новым вкладом является развитие математического аппарата для конструирования гиперсферических гармоник с применением эффективной генеалогической техники рекуррентной по числу нуклонов в ядре.

Впервые была предложена и апробирована приближенная вариационная трактовка метода К-гармоник в неортогональном базисе, составленном из оболочечных волновых функций с разными осцилляторными параметрами.

Впервые в формализме гиперсферических функций был реализован интерполяционный подход в теории ядра, позволяющий учесть связь между его внутренней и внешней областями.

Новым вкладом является исследование эффекта сжимаемости ядра, который автоматически учитывается в методе гиперсферических функций. Показано, что сжимаемость имеет существенное значение при описании возбужденных состояний ядер и приводит как к количественному, так и к качественному изменению характеристик этих состояний. Детальное исследование свойств параметра сжимаемости позволило дать обоснование предложенной ранее гипотезы об изменении жесткости ядра при перестройке ядерной структуры.

В формализме метода гиперсферических функций проведено систематическое исследование совокупности свойств легких ядер ( $A = 4 \div 16$ ). При этом впервые изучены спектры низших возбужденных состояний, мультипольные гигантские резонансы, спектроскопические факторы ядерных состояний по отношению к эмиссии нуклонов и кластеров, каналы распада монопольного и дипольного гигантских резонансов.

Новым вкладом является применение метода гиперсферических функций к исследованию реакций с тяжелыми ионами, что позволило предложить новый микроскопический подход к изучению этих процессов. Впервые проведено детальное теоретическое исследование проявления монопольных гигантских резонансов легких ядер в различных ядерных реакциях и сделаны определенные предсказания об энергии возбуждения, энергетически взвешенной монопольной сумме, ширине таких резонансов. Эти величины измеряются в настоящее время или будут измеряться в скором будущем в таких ядерных центрах, как ХФТИ (г. Харьков), СО АН СССР (г. Новосибирск), ИАЭ (г. Москва). Некоторые из этих предсказаний уже подтверждены последними экспериментами в Гренобле.

Предложенная и развитая в диссертации модификация метода гиперсферических функций используется в различных научных центрах, например, в ИИЯЭ (г. София, БНР), в ИЯФ (г. Краков, ПНР), в ТУ (г. Дрезден, ГДР).

#### Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, полученные в диссертации:

1. Сформулирован и развит эффективный метод построения гиперсферических функций с определенными свойствами перестановочной симметрии. Математический аппарат реализован с применением генеалогической техники, рекуррентной по числу нуклонов в ядре. Предложенный метод сделал возможным адаптацию традиционного аппарата трансляционно-инвариантной модели оболочек в формализме гиперсферических функций.

2. Предложена и апробирована приближенная вариационная трактовка метода К-гармоник, в которой волновая функция разлагается по неортогональному осцилляторному базису. Удобство этого метода заключается в том, что с его помощью удается полностью исключить из расчета многомерные сферические координаты и в то же время нет необходимости строить большое число волновых функций ортогонального набора, количество и сложность которых быстро нарастает с увеличением числа квантов  $N$ .

3. Развита и реализована в формализме гиперсферических функций интерполяционный подход в теории ядра, который позволяет учесть связь между внутренней и внешней областями ядра. Исследования проведены на примере ядра  $H^3$ . Рассчитаны энергия связи, среднеквадратичный радиус. Изучен вопрос о роли кластерной функции в этих расчетах, а также вопрос о роли внутренней волновой функции, описывающей чистое связанное состояние трех нуклонов в расчетах дублетной фазы  $nD$ -рассеяния.

4. Разработана программа численного счета и составлены таблицы коэффициентов разложения (для ядер  $A = 4 \div 16$ ) радиальной части волновой функции метода К-гармоник по радиальным волновым функциям  $(3A-3)$ -мерного гармонического осциллятора. Это позволило получить аналитические выражения для матричных элементов операторов различных физических величин в формализме гиперсферических функций.

5. Детально изучен эффект сжимаемости ядра в формализме метода гиперсферических функций. В результате показано, что сжимаемость имеет существенное значение при описании возбужденных состояний ядер. Учет сжимаемости ядра приводит к количественным результатам порядка десятков процентов, а иногда и к качественным изменениям свойств ядер.

6. Проведено систематическое исследование свойств параметра сжимаемости легких ядер. В результате показано, что эта характеристика ядра растет, как функция числа частиц, примерно в 3,5 раза от начала до конца  $1P$ -оболочки. На  $d$ -кластерных ядрах параметр сжимаемос-



ти аномально увеличивается по сравнению со значениями для соседних ядер. Результаты расчетов в рамках метода гиперсферических функций показали, что параметр сжимаемости отличается в  $1.5 - 2$  раза для изовекторных и изоскалярных состояний. Этот факт явился обоснованием предложенной ранее гипотезы об изменении жесткости ядра при перестройке ядерной структуры, которая была выдвинута в связи с необходимостью перенормировки параметров, используемых в полумикроскопических моделях.

7. Впервые изучены спектры низших возбужденных состояний ядер в рамках метода гиперсферических функций с центральными потенциалами гауссовского типа. Показано, что порядок следования уровней и относительное их положение разумным образом воспроизводится в этих расчетах.

8. Развита формализм в рамках метода гиперсферических функций для описания состояния аномальной четности ядер (в приближении  $K = K_{min} + 1$ ). На основе этого метода изучены состояния аномальной четности ядер. Расчет энергетического распределения силы дипольных переходов ядра  $^{16}\text{O}$  позволили дать качественную трактовку эффекту, наблюдаемому при измерении сечения полного поглощения  $\gamma$  - квантов ядром  $^{16}\text{O}$ , и состоящему в том, что в области энергий гигантского резонанса находится около половины интегрального сечения, определяемого дипольным правилом сумм (больше половины интегрального сечения фотопоглощения приходится на область более высоких энергий  $\gamma$  - квантов).

9. Изучены монополярные гигантские резонансы в методе гиперсферических функций. В результате предсказаны энергия возбуждения и энергетически взвешенная монополярная сумма как функция числа частиц ( $A = 4 \div 16$ ).

10. Развита новый подход к расчету кластерных спектроскопических факторов в методе гиперсферических функций. В рамках этого метода проведен расчет  $\alpha$  - кластерных спектроскопических факторов для основного и монополярно-возбужденного состояния ядра  $^{16}\text{O}$ . Для переходов, в которых участвуют монополярно-возбужденные состояния, результаты расчета в методе гиперсферических функций отличаются в  $1.5 - 2$  раза от соответствующих величин, полученных в трансляционно-инвариантной модели оболочек.

11. Оценены каналы распада монополярного и дипольного гигантских резонансов в рамках метода гиперсферических функций. В результате этих исследований предсказано, что среди возбужденных состояний различной мультипольности монополярные гигантские резонансы выделены своей малой шириной, вследствие специфической природы волновой функ-

ции (волновая функция с узлом). Предсказана возможность обнаружения на эксперименте состояний монополярного резонанса в угловых распределениях протонов из реакций ( $e, e'p$ ).

12. Метод гиперсферических функций применен к исследованию реакций с тяжелыми ионами. В результате был предложен новый микроскопический подход к исследованию упругих и неупругих сечений этих реакций. При построении потенциала взаимодействия двух тяжелых частиц использовались плотности ядер, полученные в методе гиперсферических функций и проверенные по совокупности экспериментальных данных. В таком подходе построены не только потенциалы взаимодействия в основном состоянии, но и получены соответствующие потенциалы в возбужденном состоянии, а также недиагональные матричные элементы потенциала, которые описывают неупругие процессы. Численные расчеты продемонстрировали универсальность метода при описании упругих и неупругих сечений реакций с тяжелыми ионами. Хорошее согласие с опытными данными удалось получить без дополнительной перенормировки параметров расчета.

Апробация диссертации. Основные материалы диссертации неоднократно докладывались на семинарах ЛТФ ОИЯИ, НИИЯФ МГУ, ИАЭ (г. Москва), ХФИИ (г. Харьков), ИФ АН СССР (г. Тбилиси). Часть результатов докладывалась на УШ Всесоюзном совещании по теории систем частиц с сильным взаимодействием в Вильнюсе 1976 год, на Международной летней школе по физике тяжелых ионов в Пределе в 1976 году, на XXIX и XXX всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра в Риге в 1979 году и в Ленинграде в 1980 году, на Международной конференции по экстремальным состояниям в ядерных системах в Дрездене в 1980 году, на Международной школе по структуре ядра в Алуште в 1980 году, на Международном симпозиуме по синтезу и свойствам новых элементов в 1980 году в Дубне, на XII и XIII всесоюзных совещаниях по теории систем частиц с сильным взаимодействием в Вильнюсе в 1980 году и в Тбилиси в 1981 году.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 29 статей.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного содержания и заключения, содержит 272 страницы текста, включая 18 таблиц, 48 рисунков и библиографический список литературы из 262 названий.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко изложен материал диссертации и дано обоснование актуальности и важности рассмотренных проблем для решения

задач, связанных с исследованием структуры легких ядер и ядерных реакций.

В первой главе диссертации сформулированы основные положения предложенного и развитого формализма в рамках метода гиперсферических функций. Глава состоит из восьми параграфов.

Первый параграф носит вводный характер. Расширение сферы применения метода гиперсферических функций встречает технические трудности, связанные с построением гиперсферических гармоник с заданной перестановочной симметрией. В диссертации был сформулирован и развит эффективный метод построения гиперсферических функций с применением генеалогической техники, рекуррентной по числу нуклонов в ядре. Показано, что вопрос о гиперсферических гармониках с перестановочной симметрией сводится к изучению преобразования гармоник при переходе от одного набора координат Якоби к другому. Последний выполняется с помощью коэффициентов Рейнала-Реваи в случае трех частиц и матриц аналогичного типа для большого числа частиц. Результаты исследований, которые представлены в этой главе, опубликованы в работах /1, 3, 15, 17/.

Во втором параграфе исследована структура волновой функции в методе К-гармоник. В качестве аргументов волновой функции ядра, состоящего из  $A$  нуклонов, введены стандартный и нестандартный наборы координат Якоби, с помощью которых обеспечивается трансляционная инвариантность. Выбор координат Якоби проиллюстрирован в виде деревьев Якоби. Графическим образом показано, что матрица преобразования при переходе от одного дерева Якоби к другому в осцилляторном базисе выражается через обобщенные коэффициенты Тальми-Мошинского, фазовые множители и необходимое число  $n_j$ -символов.

Рассмотрению вопроса о структуре и свойствах гиперсферических гармоник посвящен третий параграф. Специфика метода гиперсферических функций состоит в том, что в  $3(A-1)$ -мерном пространстве координат Якоби вводятся сферические координаты: гиперрадиус  $\xi$  и гиперсферические углы  $\theta$  (в количестве  $3A-4$ ). Введены канонические гиперсферические деревья, которые иллюстрируют различные наборы гиперсферических координат. Волновая функция ядра разлагается по стандартным функциям от гиперсферических углов - гиперсферическим гармоникам. Гиперсферические гармоники являются собственными функциями угловой части оператора Лапласа, в аналитическом виде выражаются через полиномы Гегенбауэра. Обсуждены свойства гиперсферических гармоник.

В четвертом параграфе исследованы

осцилляторные функции в координатах Якоби и гиперсферических координатах. Дано решение уравнения Шредингера для  $3(A-1)$ -мерного гармонического осциллятора в гиперсферических координатах. Показано, что радиальная часть волновой функции в этом случае выражается через присоединенные полиномы Лагерра.

Изучению вопроса о преобразовании осцилляторных функций в гиперсферических координатах при переходе от одного набора координат Якоби к другому посвящен пятый параграф. Показано, что такое преобразование относится только к гиперсферическим гармоникам и осуществляется с помощью коэффициентов Рейнала-Реваи. Необходимость таких преобразований возникает при симметризации волновой функции, ибо при действии операций перестановок частиц один набор координат Якоби превращается в другой.

В шестом параграфе введены генеалогические коэффициенты в методе гиперсферических функций. Предложена рекуррентная процедура построения гиперсферических гармоник с данной перестановочной симметрией. Она осуществляется введением генеалогических коэффициентов в методе гиперсферических функций. Показано, что при вычислении генеалогических коэффициентов в методе гиперсферических функций можно использовать те же формулы, которые были получены ранее в трансляционно-инвариантной модели оболочек, обобщив их соответствующим образом. При этом следует дополнительно к каждой фазе по орбитальному моменту добавить фазу по гипермоменту, для каждого  $n_j$ -символа по орбитальному моменту ввести соответствующий  $n_j$ -символ по гипермоменту, коэффициенты Тальми-Мошинского заменить коэффициентами Рейнала-Реваи. Предложен рекуррентный способ конструирования гиперсферических гармоник с данной перестановочной симметрией.

В седьмом и восьмом параграфах этой главы рассмотрен вопрос о вычислении матричных элементов гамильтониана в методе гиперсферических функций с применением техники генеалогических коэффициентов и изложена схема нахождения собственных функций и собственных значений в методе К-гармоник

Во второй главе диссертации исследована связь метода гиперсферических функций с другими подходами в теории ядра: с трансляционно-инвариантной моделью оболочек и методом генераторных координат. Глава состоит из пяти параграфов.

Первый параграф носит вводный характер. Исследование связи метода гиперсферических функций с другими подходами в теории ядра, и в частности, с более старыми и традиционными методами стимулированы тем, что они позволяют выяснить достоинства и недостатки раз-

личных подходов, степень их эквивалентности друг другу, а также понять, какие дополнительные степени свободы учтены в том или ином методе. Так, исследование связи трансляционно-инвариантной модели оболочек с методом К-гармоник позволило использовать аппарат, развитый в трансляционно-инвариантной модели оболочек для построения К-гармоник с произвольным значением К. В результате изучения связи метода К-гармоник с методом генераторных координат была предложена приближенная вариационная трактовка метода К-гармоник, в которой волновая функция ядра разлагается по неортогональному осцилляторному базису. Удобство метода заключается в том, что все вычисления проводятся по обычным формулам модели оболочек, без явного использования многомерных сферических координат. Результаты исследований, которые представлены в этой главе, опубликованы в работах /2,4,5,7,8,16/.

Во втором параграфе исследована связь метода гиперсферических функций с трансляционно-инвариантной моделью оболочек. Вначале изложены основные положения этой модели, проведена классификация одно-квантовых возбужденных состояний (состояний с  $N = N_{min} + 1$ ) ядер  $A = 5 \div 40$ . Результаты этого анализа пригодны также и для метода гиперсферических функций, поскольку К-гармоники с  $K = N_{min}$  и  $K = N_{min} + 1$  могут быть охарактеризованы теми же квантовыми числами, что и соответствующие функции трансляционно-инвариантной модели оболочек. Проведено сопоставление трансляционно-инвариантной модели оболочек с методом гиперсферических функций. Исходным пунктом этих исследований явилось то обстоятельство, что волновые функции в трансляционно-инвариантной модели оболочек и в методе гиперсферических функций с одинаковым числом квантов представляют собой два эквивалентных набора вырожденных собственных функций гамильтониана, и их можно выразить друг через друга. Найден рекуррентный метод нахождения коэффициентов разложения и в результате предложена процедура построения К-гармоник в случае произвольных значений К. Получены формулы для разложения радиальной части волновых функций метода К-гармоник по радиальным волновым функциям  $(3A-3)$ -мерного гармонического осциллятора.

Изучению связи метода гиперсферических функций с методом генераторных координат посвящен параграф три. Развит формализм, основанный на хорошо известном в теории ядра методе генераторных координат, который применялся для описания коллективных движений в ядре. Для случая связанных состояний ядер написана система интегральных уравнений Хилла-Уилера, эквивалентная системе дифференциальных уравнений метода К-гармоник. Рассмотрен метод приближенного решения этих интегральных уравнений, который сводится к диагонализации гамильтониана в неортогональном базисе, составленном из оболочечных

волновых функций с разными осцилляторными параметрами. Оптимальные значения этих параметров находятся путем минимизации энергии.

В четвертом параграфе этой главы в рамках предложенного формализма проведен расчет для ядра Н с нуклон-нуклонными взаимодействиями в виде прямоугольной ямы. В результате показано, что сходимость разложения по неортогональному базису хорошая. Значение энергии связи, совпадающее с точным расчетом до второго знака после запятой, получается при учете двух-трех гауссоид в разложении для каждого значения К. Волновые функции можно аппроксимировать с достаточно высокой точностью набором трех-четырех гауссоид для каждого значения К,  $\nu$ . Показано, что в плане сходимости предложенный метод занимает промежуточное положение между методом К-гармоник и разложением по ортогональному осцилляторному базису. Таким образом, в этом подходе удается полностью исключить из расчета многомерные сферические координаты и в то же время нет необходимости строить большое число волновых функций ортогонального набора, количество и сложность которых быстро нарастает с увеличением числа квантов  $N$ .

Исследованию вопроса о применении интерполяционного подхода к теории ядра в формализме метода гиперсферических функций посвящен параграф пять. Использовано разбиение конфигурационного пространства системы нуклонов на внутреннюю и внешнюю области, к которому приводит короткодействующий характер ядерного взаимодействия. Соответственно этому волновая функция системы нуклонов ищется в виде суммы двух членов, первый из которых описывает внутреннюю область, где все нуклоны взаимодействуют друг с другом, а второй - внешнюю область, где возможна фрагментация ядра. Уравнения для волновых функций получены из вариационного принципа. Эти уравнения дают возможность учесть связь между внутренней и внешней областями ядра. В этом формализме с учетом в явном виде бинарного канала распада  $nD$  для различных центральных потенциалов проведены расчеты основных характеристик ядра  ${}^3\text{H}$ : энергии связи, среднеквадратичного радиуса и константы связи виртуального распада  ${}^3\text{H} \rightarrow n + D$ . Изучен вопрос о роли внутренней волновой функции, описывающей чистое связанное состояние трех нуклонов, в расчетах дублетной фазы упругого  $nD$ -рассеяния.

Полученные результаты позволили сделать заключение о том, что явный учет канала распада  ${}^3\text{H}$  не приводит к сколь-нибудь значительному вкладу в полную волновую функцию ядра  ${}^3\text{H}$ , но дает относительно большую поправку к энергии связи. Так, в случае потенциала в виде прямоугольной ямы вклад внешней волновой функции в нормировочный ин-



теграл равен всего лишь 2,2 %, в то время как поправка к энергии связи равна 11 % при полной энергии связи - 8,31 МэВ. Чтобы добиться такого увеличения энергии связи в обычных К-гармонических расчетах, надо учитывать три гармоники с  $K = 0, 2, 4$ .

Третья глава диссертации, состоящая из четырех параграфов, посвящена изучению эффекта сжимаемости ядер в методе гиперсферических функций.

Первый параграф носит вводный характер. В методе гиперсферических функций плотность ядра является динамической переменной, так что сжимаемость ядерного вещества учитывается автоматически. В этой главе исследован вопрос о том, в каких физических явлениях этот эффект будет наиболее существенным. С этой целью радиальная часть волновой функции метода К-гармоник была разложена по радиальным волновым функциям  $(3A-3)$ -мерного гармонического осциллятора. Разложение позволило в явном виде оценить эффект смешивания монополярных возбуждений, который характеризует сжимаемость ядра. Действительно, степень отличия матричных элементов операторов физических величин, найденных с волновыми функциями многомерного гармонического осциллятора, от соответствующих величин в формализме метода гиперсферических функций и характеризует этот эффект. Показано, что эффект сжимаемости ядра существенен при описании возбужденных состояний ядер.

Основные результаты этой главы опубликованы в работах /II-14, 19, 21/.

Во втором параграфе дан способ разложения радиальной части волновой функции в методе К-гармоник по волновым функциям  $(3A-3)$ -мерного гармонического осциллятора, то есть жесткого вибратора, для которого К-гармонические уравнения имеют аналитические решения и волновые функции которого выражаются через присоединенные полиномы Лагерра. Коэффициенты разложения и соответствующая частота осциллятора были найдены из условия, чтобы максимум низшей осцилляторной функции совпал с максимумом низшей радиальной функции в методе К-гармоник.

Таким образом были вычислены коэффициенты разложения радиальных волновых функций в методе К-гармоник по волновым функциям многомерного гармонического осциллятора для легких ядер ( $A = 4 \div 16$ ). Расчеты показали, что примесь монополярных возбуждений для основных состояний ядер не является существенной и составляет лишь несколько процентов. Что касается возбужденных состояний, то их структура является значительно более сложной и их волновая функция не сводится к функции одной моды возбуждения. Таким образом, разложение позволило

в явном виде оценить эффект смешивания монополярных возбуждений, который характеризует сжимаемость ядра. В предложенной схеме были получены формулы для матричных элементов операторов различных физических величин, которые затем были использованы для расчетов различных свойств ядер с числом частиц  $A = 4 \div 16$ .

В третьем параграфе проведены конкретные расчеты. Изучены волновые функции, энергии связи, средние квадратичные радиусы, монополярные и дипольные гигантские резонансы, неупругий формфактор рассеяния электронов, спектроскопические формфакторы для  $d$ -кластеров, параметр сжимаемости ядра. Проведенные исследования показали, что учет сжимаемости ядра приводит как к количественному, так и к качественно изменению всех рассмотренных характеристик возбужденных состояний ядер.

В четвертом параграфе детально изучены свойства параметра сжимаемости легких ядер. Показано, что параметр сжимаемости как функция числа частиц возрастает в 3,5 раза от начала до конца 1р-оболочки. На  $\alpha$ -кластерных ядрах параметр сжимаемости аномально увеличивается по сравнению со значениями для соседних ядер. Результаты расчетов показали, что параметр сжимаемости отличается в 1,5 - 2 раза для изовекторных и изоскалярных состояний. Этот факт явился обоснованием предложенной ранее гипотезы об изменении жесткости ядра при перестройке ядерной структуры, которая была выдвинута в связи с необходимостью перенормировки параметров, используемых в полумикроскопических моделях.

В четвертой главе диссертации рассмотрен вопрос о применении предложенного формализма в рамках метода гиперсферических функций к систематическому исследованию свойств легких ядер  $A = 4 \div 16$ . Глава состоит из восьми параграфов.

Первый параграф носит вводный характер. Предложенная модификация метода гиперсферических функций, в которой удалось использовать традиционный аппарат трансляционно-инвариантной модели оболочек, позволила провести систематическое исследование совокупности свойств ядер  $A = 4 \div 16$ . В этой главе изучены единым образом энергии связи и волновые функции, средние квадратичные радиусы, формфакторы и плотности распределения ядерного вещества; исследовались как низшие возбужденные состояния ядер, так и мультиполярные гигантские резонансы, кластерная структура волновой функции как для основного, так и для возбужденных состояний; оценивались каналы распада монополярного и дипольного гигантских резонансов. Расчеты проведены с различными вариантами нуклон-нуклонных потенциалов Волкова, Эйкемейер-Хакенбройха, Бринка-Баккера. В результате этих исследований удалось опи-

сать совокупность свойств основных состояний ядер и предсказать проявление монополярных резонансов в различных ядерных реакциях. Основные результаты этой главы опубликованы в работах /6,9,10,18,20,23,24/

Рассмотрению вопроса об описании основных состояний ядер в рамках метода гиперсферических функций посвящен второй параграф. Показано, что энергии связи легких ядер в минимальном приближении метода гиперсферических функций для нуклон-нуклонных потенциалов типа Волкова занижены по сравнению с экспериментальными значениями (за исключением ядер  ${}^4\text{He}$  и  ${}^{16}\text{O}$ ). Это связано как с недостаточностью приближения  $K = K_{\min}$ , так и с неадекватным выбором нуклон-нуклонного потенциала. Однако, по форме рассчитанная кривая энергии связи в зависимости от массового числа повторяет ход экспериментальной кривой, так что аномальное увеличение энергии связи для ядер, имеющих  $d$ -частичную структуру, хорошо воспроизводится.

В третьем параграфе главы изучены спектры низших возбужденных состояний ядер. Расчеты были проведены для ядер  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^7\text{Li}$  с потенциалами типа Эйкемейер-Хакенбройха и Волкова. Порядок следования уровней и их относительное положение разумным образом воспроизводятся для этих вариантов нуклон-нуклонного потенциала.

В четвертом и пятом параграфах метод гиперсферических функций был применен к исследованию высоковозбужденных состояний атомных ядер, таких как мультиполярные гигантские резонансы.

Теоретическому исследованию монополярных резонансов посвящен первый из них. Среди различных коллективных возбуждений монополярные колебания выделены тем, что они соответствуют колебаниям плотности ядерного вещества, то есть характеризуют его сжимаемость. Метод гиперсферических функций чрезвычайно удобен для микроскопического описания монополярных колебаний, так как коллективная переменная (гиперрадиус  $q$ ) связана со средним квадратичным радиусом ядра  $q^2 = A \langle r^2 \rangle$ , т.е. со средней плотностью ядра. Возбуждения по этой степени свободы соответствуют монополярным колебаниям ядра как целого. Было проведено детальное исследование в рамках метода гиперсферических функций свойств монополярного гигантского резонанса. В результате было предсказано поведение энергии возбуждения резонанса и распределения интегральной монополярной суммы как функции числа частиц в ядрах ( $A = 4 \div 16$ ). Проведенные недавно эксперименты в Гренобле подтвердили некоторые из этих предсказаний, в частности, энергию возбуждения монополярного состояния (в ядре  ${}^{12}\text{C}$ ). В конце параграфа проведены методические исследования, которые показали слабую чувствительность результатов расчета к выбору варианта нуклон-нуклонного потенциала и модели.

В пятом параграфе этой главы изучены дипольные гигантские резонансы. В этом случае разложение волновой

функции в методе К-гармоник начинается с приближения

$K = K_{\min} + 1$ . Был развит формализм для исследования таких состояний и применен к изучению состояний  $J^{\pi}, T = 1^{-}, 1$  ядра  ${}^{16}\text{O}$ . Результаты расчета показали, что около 30% интегральной дипольной суммы приходится на область энергий, расположенных выше гигантского резонанса. Этот эффект дает качественную трактовку тому факту, который наблюдается на опыте при измерении сечения полного поглощения  $\gamma$ -квантов ядром  ${}^{16}\text{O}$ , что в области энергии гигантского резонанса находится около половины интегрального сечения, определяемого дипольным правилом сумм (остальная часть интегрального сечения фотопоглощения приходится на область более высоких энергий возбуждения ядра). Для тех же состояний гигантского дипольного резонанса ядра  ${}^{16}\text{O}$  изучены формфакторы неупругого рассеяния электронов. Эти исследования показали, что эффект потери жесткости ядра при перестройке ядерной структуры,

который автоматически учитывается в методе гиперсферических функций, приводит к качественному изменению поведения формфакторов. Исчезает глубокий дифракционный минимум, значение формфактора в области максимума превышает значение формфактора в области сглаженного минимума примерно на два порядка, что согласуется с результатами эксперимента. Заметно увеличивается значение формфактора в области больших передаваемых импульсов.

Исследованию кластерных спектроскопических формфакторов посвящен шестой параграф. В нем был развит новый подход к расчету кластерных спектроскопических факторов в методе гиперсферических функций. Этот метод сводится к некоторой модификации формул трансляционно-инвариантной модели оболочек путем введения в них обобщенных  $N_j$ -символов с четверть-целыми моментами и замене коэффициентов Тальми-Мошинского коэффициентами Рейнала-Реваи. В рамках этого формализма был проведен расчет  $d$ -кластерных спектроскопических факторов для основного и монополярно-возбужденного состояния ядра  ${}^{16}\text{O}$ . Рассмотрены переходы  ${}^{16}\text{O}_{осч} \rightarrow {}^{12}\text{C}_{осч} + d$ ,  ${}^{16}\text{O}_{2035} \rightarrow {}^{12}\text{C}_{осч} + d$ ,  ${}^{16}\text{O}_{осч} \rightarrow {}^{12}\text{C}_{2035} + d$ . Согласно расчетам в основном приближении метода К-гармоник эти монополярные возбуждения лежат в районе 20 и 23 МэВ для  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^{16}\text{O}$  соответственно. Эти исследования показали, что для перехода с основного состояния  ${}^{16}\text{O}$  на основное состояние  ${}^{12}\text{C}$  результат очень близок к тому, который получается в трансляционно-инвариантной модели оболочек. Для переходов, в которых участвуют монополярно-возбужденные состояния, отличие результатов метода К-гармоник от трансляционно-инвариантной модели оболочек существенно.

В седьмом параграфе был рассмотрен вопрос о каналах распада монополюного гигантского резонанса. Для сравнения оценивались также каналы распада дипольного резонанса, который находится в той же области энергий возбуждения и свойства которого детально изучены в теоретических и экспериментальных исследованиях. Расчеты показали, что преимущественной модой распада  $J^{\pi} T = 0^+, 0$  состояния является вылет  $d$ -частиц, в то время как для гигантского дипольного резонанса по однопуклонному каналу распадается значительная часть дипольной суммы. Исследования показали, что среди возбужденных состояний различной мультипольности монополюные гигантские резонансы выделены своей малой шириной, вследствие специфической природы волновой функции (волновая функция с узлом). Предсказана возможность обнаружения на эксперименте состояний монополюного резонанса в угловых распределениях протонов (например, из реакции  $(e, e'p)$ ).

Действительно, теория предсказывает, что при возбуждении состояний дипольного резонанса должны наблюдаться протоны, вылетающие в состояниях с положительной четностью и однопуклонными ширинами распада порядка нескольких МэВ, а при распаде монополюного резонанса можно ожидать протоны в состояниях отрицательной четности с ширинами порядка десятков-сотен КэВ.

В восьмом параграфе метод гиперсферических функций применен к изучению упругих и неупругих формфакторов ядер с числом частиц  $A = 4 \div 16$ . В схему расчета было включено 16 наборов нуклон-нуклонных потенциалов Бринка-Баккера и Волкова. Среди них были найдены такие, которые наилучшим образом описывают совокупность физических величин: энергию связи, энергию возбуждения монополюного резонанса, средний квадратичный радиус, плотность распределения нуклонов в ядре, упругие и неупругие (с возбуждением монополюного резонанса) формфакторы легких ядер. Показано, что в рамках метода гиперсферических функций хорошо описывается поведение формфакторов легких ядер вплоть до первого минимума. В области больших передаваемых импульсов для ядер начала  $1p$ -оболочки теоретический формфактор идет ниже экспериментального. Для более тяжелых ядер согласие с экспериментом улучшается. Кор в потенциале нуклон-нуклонного взаимодействия влияет на поведение формфактора в области больших передаваемых импульсов, приводя к увеличению его абсолютных значений.

Таким образом, в формализме метода гиперсферических функций были получены плотности распределения нуклонов в ядре, проверенные по совокупности экспериментальных данных.

Пятая глава диссертации посвящена применению метода гиперсферических функций к исследованию реакций с тяжелыми ионами. Глава состоит из четырех параграфов.

Первый параграф носит вводный характер. В этой главе предложен и реализован новый микроскопический подход к изучению упругих и неупругих процессов в реакциях с тяжелыми ионами ( $A \leq 16$ ). Потенциал взаимодействия тяжелых ядерных частиц был сконструирован с включением в схему расчета численных значений для плотностей распределения ядерного вещества, полученных в предыдущей главе. В этом случае удастся построить не только диагональные, но и недиагональные матричные элементы потенциала для монополюных возбужденных состояний ядер, которые описывают неупругие процессы. В таком формализме был изучен вопрос о возможном проявлении монополюных гигантских резонансов в легких ядрах при столкновении тяжелых ионов. Актуальность этих исследований обусловлена тем, что в последние годы был проведен широкий круг исследований по обнаружению и идентификации монополюных гигантских резонансов в ядрах. Однако вопрос о существовании монополюных гигантских резонансов в легких ядрах ( $A \leq 16$ ) до сих пор остается открытым. Следует отметить, что метод гиперсферических функций чрезвычайно удобен для описания монополюных гигантских резонансов и может претендовать на надежность теоретических предсказаний. Результаты исследований, которые представлены в этой главе опубликованы в работах /24-29/.

Во втором параграфе рассмотрен вопрос о потенциале взаимодействия тяжелых ядерных частиц. При этом использован метод двукратной свертки, в котором потенциал взаимодействия представлен в виде усреднения нуклон-нуклонного взаимодействия по плотностям двух сталкивающихся ядер. Построены потенциалы ядерного взаимодействия для совокупности более легких, чем кислород ядер, с включением в схему расчета численных значений для плотности распределения ядерного вещества, полученных в предыдущей главе. Изучено влияние ряда эффектов на результаты расчета: трехчастичных сил в нуклон-нуклонном взаимодействии, зависимость потенциала свертки от числа частиц и проявление симметрии потенциала при взаимодействии одинаковых и разных ядер. Построены потенциалы взаимодействия тяжелых ядерных частиц как для основных, так и для монополюно-возбужденных состояний ядер, которые описывают неупругие процессы.

Изучению упругих сечений в угловых распределениях реакций с тяжелыми ионами в рамках оптической модели посвящен третий параграф. Проведена теоретическая апробация предложенного метода по следующей схеме: в качестве действительной и мнимой частей оптического потенциала использовался потенциал свертки из второго параграфа, при этом варьировалась лишь амплитуда сил при мнимой части. Несмотря на простоту потенциала, ко-

торый здесь использовался только с одним свободным параметром согласие с экспериментом оказалось хорошим. Теоретическое описание экспериментальных данных по упругому рассеянию тяжелых ионов при различных энергиях показало, что удастся воспроизвести результаты эксперимента за счет лишь уменьшения амплитуды мнимой частицы потенциала.

Затем аналогичный подход был применен к изучению неупругих процессов.

Исследованию этих вопросов посвящен четвертый параграф. В методе связанных каналов рассчитаны неупругие сечения взаимодействия тяжелых ионов с возбуждением состояний монополюсного гигантского резонанса. Амплитуда мнимой части оптического потенциала предполагалась пропорциональной его действительной части и была отнормирована в упругом канале.

Результаты расчета оказались в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными неупругого сечения с возбуждением  $O^+$ -состояния в реакции  ${}^3\text{He} - {}^{12}\text{C}$ . При этом не возникает необходимости в перенормировке параметров нуклон-нуклонного взаимодействия как в упругом, так и в неупругом каналах. Таким образом, эти исследования открывают перспективный метод для теоретического изучения монополюсных гигантских резонансов в легких ядрах при взаимодействии тяжелых ионов. Эти исследования представляют особый интерес, так как с одной стороны, в последние годы был проведен широкий фронт работ по обнаружению и идентификации монополюсных гигантских резонансов в ядрах. Однако, вопрос о существовании монополюсных резонансов в легких ядрах ( $A \leq 16$ ) до сих пор не решен однозначно. С другой стороны, метод гиперсферических функций может претендовать на надежность теоретических предсказаний в описании монополюсных колебаний. Предложенный метод может быть применен к изучению неупругих процессов в реакциях с тяжелыми ионами и при возбуждении состояний другой мультипольности.

В заключении кратко перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Смирнов Ю.Ф., Шитикова К.В. Генеалогические коэффициенты в трансляционно-инвариантной модели оболочек. Изв. АН СССР, сер. физ. 27, 1442-1450, 1963.
2. Смирнов Ю.Ф., Шитикова К.В., Эль-Самараи С.Х. Классификация возбужденных состояний легких ядер в трансляционно-инвариантной модели оболочек и их ассоциативная структура. Вестник МГУ, сер. физ. 2, 33-40, 1969.
3. Курдюмов И.В., Смирнов Ю.Ф., Шитикова К.В., Эль-Самараи С.Х. Многочастичные генеалогические коэффициенты в трансляционно-ин-

вариантной модели оболочек. Изв. АН СССР, сер. физ. 33, 150-158, 1969.

4. Kurdyumov I.V., Smirnov Yu.F., Shitikova K.V., S.Kh.El.Samarai Translationally invariant shell model. Nucl.Phys.A145, 593-612, 1970.
5. Курдюмов И.В., Смирнов Ю.Ф., Шитикова К.В. О связи трансляционно-инвариантной модели оболочек с методом К-гармоник. ТМФ, 7, 45-55, 1971.
6. Жуков М.В., Шитикова К.В. Применение метода К-гармоник к расчету свойств ядер в приближении  $K = K_{min} + 1$ . ЯФ, 14, 297-303, 1971.
7. Смирнов Ю.Ф., Шитикова К.В., Орлова Н.В. Классификация состояний одноквантового возбуждения в ядрах ( $1s-1d$ )-оболочки. Вестник МГУ, 553-564, 1973.
8. Обуховский И.Т. Смирнов Ю.Ф., Толстой В.Н., Шитикова К.В., Эль-Батануни Ф. О связи метода К-гармоник с методом генераторных координат. ЯФ, 17, 742-749, 1973.
9. Жуков М.В., Журина М.И., Шитикова К.В. Описание состояний аномальной четности ядер в методе К-гармоник. ЯФ, 17, 1191-1196, 1973.
10. Ерохин К.М., Орлова Н.В., Смирнов Ю.Ф., Шитикова К.В. Основные и низшие возбужденные состояния ядер  $1p$ -оболочки в методе К-гармоник. ЯФ, 22, 1102-1109, 1975.
11. Shitikova K.V. The K-harmonics method. Heavy ion physics. Predeal International Summerschool, 1976, Romania; 1977, p.513-538.
12. Shitikova K.V. Structure of light nuclei in the K-harmonics description with different nucleon-nucleon potentials. Preprint JINR E-4-10995, Dubna, 1977.
13. Шитикова К.В. Описание монополюсных возбуждений легких ядер в рамках метода К-гармоник. ОИЯИ, P4-10994, Дубна, 18 с, 1977.
14. Гончарова Н.Г., Мулей М., Шитикова К.В. Неупругие формфакторы легких ядер в методе К-гармоник. ЯФ, 26, 1183-1187, 1977.
15. Кныр В.А., Смирнов Ю.Ф., Шитикова К.В. Груша канонических преобразований и метод К-гармоник. ТМФ, 30, 370-381, 1977.
16. Базь А.И., Схиртладзе В.С., Шитикова К.В. Расчет трехнуклонной задачи на основе интерполяционного подхода. ЯФ, 25, 281-287, 1977.
17. Смирнов Ю.Ф., Шитикова К.В. Метод К-гармоник и модель оболочек. ЭЧАЯ, 8, 847-910, 1977.
18. Кныр В.А., Орлова Н.В., Смирнов Ю.Ф., Широкова А.А., Шитикова К.В. Cluster spectroscopic factors in the method K-harmonics. Phys.Lett., 76B, p.273-276, 1978.

19. Shitikova K.V. Method of the hyperspherical functions and the properties of light nuclei. Nucl.Phys., A331, p.365-388, 1979.
20. Широкова А.А., Шитикова К.В. О каналах распада монополярного гигантского резонанса. Изв. АН СССР, сер. физ., 43, 2396-2400, 1979.
21. Касчиев М., Шитикова К.В. О сжимаемости в методе гиперсферических функций ЯФ, 30, 1479-1486, 1979.
22. Burov V.V., Dostovalov V.N., Kaschiev M., Shitikova K.V. Elastic and inelastic form factors of light nuclei in the method of hyperspherical functions. J.Phys., G: Nucl.Phys., 7, 1981.  
Препринт ОИЯИ, P4-12758, 16 с, Дубна, 1979.
23. Shitikova K.V. Multipole giant resonances and the compressibility parameter of nucleus, p.22. The monopole giant resonance in the method of the hyperspherical functions, p.23. Abstracts of contributed papers. International Conference on extreme states in nuclear systems. Dresden, GDR February 4-9, 1980.
24. Молина Х.Л., Шитикова К.В. О ядерном потенциале взаимодействия в реакциях с тяжелыми ионами. ОИЯИ, P7-80-60, Дубна, 8 с., 1980.
25. Дымак Р., Молина Х.Л., Шитикова К.В. О потенциале ядерного взаимодействия в реакциях с тяжелыми ионами. Международный симпозиум по синтезу и свойствам новых элементов. Дубна, 23-27 сентября 1980. ОИЯИ, Д7-80-556, Дубна, 1980, с.68.
26. Dymarz R., Nazmitdinov R.G., Shitikova K.V. Elastic and inelastic scattering of  $\alpha$  on  $^{12}\text{C}$ . Isohepans, resumes des communications abstracts of contributed papers. Versailles, 6-10 Jullet, 1981, 10, 139.
27. Dymarz R., Molina J.L., Shitikova K.V. On the nuclear interaction potential in the reactions with heavy ions. Z.Phys. A299, 245-249, 1981.
28. Dymarz R., Shitikova K.V. Is There a giant monopole resonance in  $^{12}\text{C}$ ? JINR, E7-81-653, Dubna, 10C, 1981.
29. Демьянова А.С., Шитикова К.В. Применение фолдинг-модели к описанию сечения упругого рассеяния  ${}^6\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ . ЯФ, 35, 1431-1436, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел

1 июня 1982 года.