

## АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе Дүйсенбай Акнұр Дүйсенбайқызы  
«**Взаимодействия кластерных систем в ядрах**», представленную на соискание  
степени доктора философии (PhD) по специальности «6D060500-Ядерная  
физика»

**Общая характеристика работы.** Диссертационная работа посвящена исследованию структуры легких атомных ядер и динамики ядерных процессов, а так же теоретическому анализу спектров ядер  ${}^8\text{Li}$  и  ${}^8\text{B}$  и исследованию влиянию кулоновского взаимодействия на спектр резонансных состояний в двух- и трехкластерном континуумах.

### **Актуальность темы.**

Ядерная физика одна из наиболее быстро развивающихся областей науки с точки зрения теоретических и экспериментальных исследований. В этой области еще многое остается неясным и неизученным. Особый интерес представляют ядерные реакции с участием легких ядер, ответственных за синтез атомных ядер, формирование и эволюцию Вселенной, рождение звезд и связанные с этим процессом.

Анализ астрофизических данных о распространении легких атомных ядер во Вселенной стимулирует новые и более детальные экспериментальные и теоретические исследования свойств легких ядер и реакций с их участием. Астрофизические приложения ядерных данных требуют более детального и точного определения сечений ядерных реакций в области низких энергий. В этой области энергий отсутствуют надежные экспериментальные данные, и в этой связи ядерная астрофизика продолжает нуждаться в теоретических моделях.

Некоторые уровни энергии легких ядер, которые экспериментально исследованы в ядерных реакциях, иногда не могут быть объяснены в рамках простых моделей, таких как обычная оболочечная модель или коллективные модели ядер. По этой причине часто используется сочетание разных моделей. Среди них важное место занимают кластерные модели, в которых считается, что нуклоны большую часть времени объединяются в различные почти стабильные структуры, называемые кластерами, которые взаимодействуют друг с другом.

Модель взаимодействующих кластеров дает возможность детально исследовать свойства слабосвязанных легких ядер и их возможные конфигурации. Более конкретно, ядро как группа динамически взаимодействующих кластеров имеет собственную уникальную внутреннюю кластерную структуру, которая отличается от других ядер.

Физика кластеров исторически связана с ядром атома гелия ( $\alpha$ -частицы), и в этом выборе особую роль сыграли свойства самих  $\alpha$  частиц.

В моделях, предлагаемых для конкретного ядра (и аналогичного зеркального ядра), обычно учитываются лишь некоторые из его основных

характеристик. Поскольку образование кластеров сильно зависит от корреляций между нуклонами и свойств малонуклонных подсистем, особенности ядерных взаимодействий очень специфичны и важны при изучении ядерных кластерных явлений. Эффективность и надежность кластерных моделей подтверждена большим количеством экспериментальных данных: явлением кластерной радиоактивности ядер, компактностью  $\alpha$ -кластеров и образованием квазимолекулярных состояний в ядрах и их изотопы.

В то же время использование кластерных моделей значительно облегчает теоретические расчеты, сводя задачу многих частиц к эффективной задаче двух тел, если речь идет о двухкластерной системе. Каждый кластер рассматривается как стабильная группа, состоящая из нескольких нуклонов, взаимодействующих с другими объектами в целом. Первая и наиболее строгая формулировка кластерной модели была сделана Дж.А.Уилером. Он ввел понятие «резонирующая группа» и вывел динамические уравнения для волновой функции, описывающие относительное движение кластеров. Существенный вклад в понимание ядерных структур внесли Вильдермут и Танг. Они рассмотрели и разработали метод, учитывающий кластерное приближение и принцип Паули для каждого из кластеров и составного ядра. Было разработано несколько микроскопических методов решения стационарного уравнения Шредингера, основанных на кластерной модели, и был введен оператор антисимметризации для реализации принципа Паули. Основная сложность этого подхода связана с расчетами в условиях антисимметризации нуклонов. Разработка кластерной модели была проведена микроскопическими методами для упрощения расчета с учетом принципа Паули. Одним из таких методов является алгебраический вариант метода резонирующих групп, предложенный Г.Ф.Филипповым. Основные идеи алгебраической версии заложены в два пакета расчетных программ, с помощью которых проведены все расчеты данной работы.

Следует подчеркнуть, что кластерная структура ядра проявляется в реакциях с нейтронами даже при низких энергиях и с протонами при энергиях выше кулоновского барьера. Отметим, что в реакциях рассеяния нейтронов на ядрах, область низких энергий легко достигается с помощью имеющихся экспериментальных установок. Однако при рассеянии протонов на легких ядрах кулоновские силы отталкивания затемняют эффекты ядерных взаимодействий при низких энергиях. В таких случаях определение сечений ядерного рассеяния на основе экспериментальных данных становится затруднительным. Аналогичная ситуация имеет место в реакциях ядерно-ядерного рассеяния в области низких энергий. В данных случаях теоретические методы исследования и расчеты становятся важными инструментами для оценки сечений реакций и определения их характеристик.

Теоретический анализ показывает, что ядра – это не статические образования, которые жестко рассеивают нейтроны и протоны, а гибкие структурные конфигурации, которые реагируют на падающие частицы.

Многие легкие ядра слабо связаны, и также могут изменять свою конфигурацию (то есть размер и форму), когда они взаимодействуют с нуклонами или другими ядрами на относительно небольших расстояниях между взаимодействующими ядрами. Это явление называется поляризацией ядер. Для учета поляризуемости взаимодействующих кластеров, в работе сформулирована микроскопическая трехкластерная модель. Эта модель позволяет описывать так называемую кластерную поляризацию. Кластерная поляризация играет важную роль в образовании связанных и резонансных состояний в семи нуклонных системах.

**Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами.** Настоящая диссертационная работа выполнялась в соответствии с координационным планом научно-исследовательских работ по следующим программам фундаментальных исследований Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в области естественных наук: «Исследование возбужденных состояний легких ядер» 2018-2020 гг., шифр ИРН №АР09259876 (ГФ5).

**Целью диссертации** является теоретическое исследование свойств основных и возбужденных состояний легких атомных ядер, имеющих выраженную двух- и трехкластерную структуру, в том числе и тех, которые имеют большой избыток нейтронов или протонов, влияния поляризуемости взаимодействующих кластеров на структуру компаундов ядер и на протекания ядерных реакций, а также влияния кулоновского потенциала на формирование резонансных состояний в двух- и трехкластерном континуумах.

**Задачи исследования.** Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

– Для реализации алгебраической версии метода резонирующих групп получить аналитические выражения матричных элементов гамильтониана для двух- и трехкластерных систем. В двухкластерном приближении рассчитать спектр легких атомных ядер  ${}^5\text{He}$ ,  ${}^5\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{Be}$ . Построить волновые функции связанных и резонансных состояний в координатном, импульсном и осцилляторном пространствах. Определить фазы и интегральные сечения упругого рассеяния  $\alpha+n$ ,  $\alpha+p$ ,  $\alpha+d$ ,  $\alpha+t$ ,  $\alpha+{}^3\text{He}$ ,  $\alpha+\alpha$ .

– В рамках трехкластерной микроскопической модели, позволяющей учитывать поляризацию бинарных подсистем, исследовать состояния дискретного и непрерывного спектров ядер  ${}^8\text{Li}$  и  ${}^8\text{B}$ , которые представлены трехкластерной конфигурацией  ${}^4\text{He}+{}^3\text{H}+n$  и  ${}^4\text{He}+{}^3\text{He}+p$ , соответственно. Рассчитать фазы упругого и неупругого  ${}^7\text{Li}+n$  и  ${}^7\text{Be}+p$  рассеяния.

– Исследовать влияние кулоновского взаимодействия на энергию и ширину резонансных состояний в парах зеркальных ядер  ${}^8\text{Li}$  и  ${}^8\text{B}$ ,  ${}^9\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$ .

**Объектами исследования** являются легкие ядра, такие как  ${}^5\text{He}$ ,  ${}^5\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{Li}$ ,  ${}^8\text{B}$ ,  ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^9\text{B}$  и их кластерные структуры, и явления, которые связаны с ними: кластерная поляризация, эффекты кулоновских взаимодействий.

**Предметом исследования** являются кластер-кластерные взаимодействия в ядрах, связанные и резонансные состояния легких атомных ядер, фазовые сдвиги и сечения упругого и неупругого рассеяния кластеров, эффекты кулоновского взаимодействия в зеркальных ядрах.

**Методы исследования.** В работе использовались методы нерелятивистской квантовой механики для многочастичных систем и теории рассеяния. В работе также активно использовались метод резонирующих групп и многочастичная модель оболочек.

### **Новизна исследования**

– В рамках двухкластерной микроскопической модели исследована структура легких атомных ядер  ${}^5\text{He}$ ,  ${}^5\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{Be}$ . Изучена зависимость спектра этих ядер от формы и особенностей нуклон-нуклонного потенциала. Построены волновые функции связанных и резонансных состояний ядер  ${}^5\text{He}$ ,  ${}^5\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{Be}$  в координатном, импульсном и осцилляторном пространстве. Установлены общие черты волновых функций связанных состояний и долгоживущих резонансных состояний.

– Исследовано влияние поляризации ядер  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Be}$ , рассматриваемых как бинарные системы  ${}^4\text{He}+{}^3\text{H}$  и  ${}^4\text{He}+{}^3\text{He}$ , соответственно, на структуру ядер  ${}^8\text{Li}$  и  ${}^8\text{B}$ , а также на параметры упругого и неупругого  ${}^7\text{Li}+n$  и  ${}^7\text{Be}+p$  рассеяния. Рассчитанные протонный и нейтронный среднеквадратичные радиусы ядер  ${}^8\text{Li}$  и  ${}^8\text{B}$  подтверждают наличие нейтронного гало в ядре  ${}^8\text{Li}$  и протонного гало в ядре  ${}^8\text{B}$ , обнаруженных ранее экспериментальными методами.

– Исследовано влияния кулоновского взаимодействия на параметры резонансных состояний двух пар зеркальных ядер  ${}^8\text{Li}$  и  ${}^8\text{B}$ ,  ${}^9\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$ . Установлены два наиболее вероятных сценария движения резонансных состояний в плоскости энергия-ширина под воздействием кулоновских сил.

**Научно-практическая значимость работы.** Теоретические исследования имеют фундаментальное значение в ядерной физике и ядерной астрофизике и весьма актуальны в связи с изучением структуры легких ядер. С практической точки зрения полученные результаты могут служить основой для развития других альтернативных методов, а часть результатов может быть использована в педагогической практике для изложения новых направлений в ядерной физике, некоторые данные могут быть использованы как опорные точки для новых экспериментов. Рассмотрен ряд ядерных процессов, которые определяют синтез легких атомных ядер в ранней Вселенной, а также их распространение в звездах.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Форма потенциала взаимодействий для ядер  ${}^5\text{He}$ ,  ${}^5\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^8\text{B}$

слабо влияет на компактные двухкластерные состояния, т.е. на связанные состояния и на долгоживущие (узкие) резонансные состояния, и заметно влияет на короткоживущие (широкие) резонансные состояния: спин-орбитальное взаимодействие сильно изменяет параметры и волновую функцию резонансных состояний, а волновые функции долгоживущих резонансных состояний подобны волновым функциям связанных состояний, которые описывают компактные конфигурации, когда два кластера с большой вероятностью находятся на малых относительных расстояниях.

2. В процессах упругого и неупругого  ${}^7\text{Li}+n$  и  ${}^7\text{Be}+p$  взаимодействий, ядра  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Be}$  изменяют свои размеры и форму в результате действия кластерной поляризации, то есть кластерная поляризация существенно влияет на структуру связанных и резонансных состояний этих ядер: в ядре  ${}^8\text{Li}$  существует нейтронное гало, а в ядре  ${}^8\text{B}$  существует протонное гало.

3. Кулоновское взаимодействие протонов в парах зеркальных ядер  ${}^8\text{Li}$  и  ${}^8\text{B}$ ,  ${}^9\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$  имеет сильное, умеренное и слабое воздействие на параметры связанных состояний и резонансов, где  ${}^8\text{Li}$  и  ${}^8\text{B}$  распадаются на два, а  ${}^9\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$  на три фрагмента (кластера).

**Личный вклад автора.** Автором было самостоятельно написан весь объем диссертационной работы, проведены аналитические расчеты и подобрана соответствующая литература. Постановка задач, выбор методов исследования и обсуждение результатов проводились совместно с научными руководителями.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** подтверждаются публикациями в журналах дальнего зарубежья с высоким импакт-фактором и в изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МНВО РК и в трудах международных научных конференций ближнего и дальнего зарубежья.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ, из которых 1 в журнале входящем в базы данных Scopus и Tomson Reuters, 3 – в журналах, входящих в перечень, рекомендуемый ККСОН МНВО РК, 5 – в материалах международных конференций в РК и зарубежом.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав и заключения. Работа изложена на 109 страницах компьютерного набора, иллюстрируется 45 рисунками, 19 таблицами, 1 приложением и содержит список использованных источников.