

## АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе Калжигитова Нурсултана Кувандиковича «Микроскопическая двух- и трехкластерная модель легких атомных ядер  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^8\text{Be}$ », представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе «8D05308 – Ядерная физика»

**Общая характеристика диссертационной работы.** Диссертационная работа посвящена подробному исследованию структуры и резонансных состояний ядер  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^8\text{Be}$  в двухкластерном и трехкластерном приближении. Большое внимание в данной работе уделено исследованию влияния различных эффектов на структуру ядер и их резонансов, при учете более реалистичных условий для волновой функции взаимодействующих кластеров.

**Актуальность темы диссертации.** В ядерной физике, как и в смежных с нею областях науки на сегодняшний день, остаются открытыми и нерешенными множество вопросов, затрагивающих как структуру атомных ядер, так и форму ядерного нуклон-нуклонного взаимодействия внутри них. В теории атомного ядра еще не была создана единая модель, которая могла бы включить и учесть все полученные из экспериментов характеристики и свойства ядер. Проходящие в настоящее время эксперименты при низких энергиях, также проводятся с трудом и на результатах имеют большую ошибку в два и более раза отличаясь от имеющихся теоретических расчетов. В теориях и ядерных моделях также, до сих пор не был определен точный вид потенциала ядерного взаимодействия, что мог бы включить в себя всю имеющуюся с экспериментов информацию. В связи с этим, не смотря на множество уже сделанных ранее открытий, теория об атомном ядре продолжает развиваться, обрастая новыми как экспериментальными, так и теоретическими данными. При проведении исследований в данной области создаются, как и новые модели по исследованию структуры атомных ядер и взаимодействий между ними, так и улучшаются уже имеющиеся, с учетом новых полученных данных.

Продолжает оставаться неясной природа множества резонансных состояний как легких, так и более тяжелых ядер, образования которых напрямую затрагивает фундаментальные вопросы как непосредственно ядерной физики, что может касаться ядерных и термоядерных реакций, так и смежной с нею областей, как астрофизики, где проявление данных резонансных состояний представляет большой интерес в понимании эволюции вещества во вселенной. К таким открытым проблемам, которые широко известны всем на сегодняшний день можно отнести: состояние Хойла и космологическую литиевую проблем, понимания и решения которых также неотъемлемо связано с явлениями, происходящими внутри исследуемых атомных ядер и их взаимодействий.

Существует несколько теоретических методов, которые наиболее часто используются для исследования легких ядер. Это многочастичная модель оболочек, метод Хартри-Фока, и различные версии кластерной модели,

которые могут быть как макроскопическими, что не берут в учет внутреннюю структуру исследуемых кластеров, так и микроскопическими что, при рассмотрении взаимодействия между кластерами, описывают также и их внутреннюю структуру. В проводимых в рамках данной диссертационной работе исследованиях было отдано предпочтение именно микроскопическому методу кластерной модели, а именно алгебраической версии метода резонирующих групп.

Исследования проводимые по теме диссертации были направлены на изучения природы резонансных состояний в ядрах  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^8\text{Be}$ , которые играют ключевую роль во многих вопросах как ядерной физики, так и в астрофизики. Обладая уникальными особенностями в своей структуре, данные ядра были рассмотрены как с использованием стандартных подходов для исследования ядерных резонансов (S-матрица, фазы рассеяния, сечение упругих и неупругих процессов), так и расширенных методов анализа (вес волновой функции во внутренней области, среднее расстояние между кластерами и спектроскопический фактор в состояниях непрерывного спектра), что позволило взглянуть на природу исследуемых резонансов, их появления и эффектов стоящих за ними в более широком плане. Для чего при выполнении исследований по теме диссертации и была выбрана кластерная модель, а точнее алгебраическая версия метода резонирующих групп. Далее, был разработан и предложен алгоритм работы более нового и усовершенствованного метода, включающего в себя учет нескольких бинарных каналов реакций. Использование выбранных методов кластерной модели позволило затронуть более сложные и менее изученные вопросы, связанные со влиянием на структуру, форму и проявления в ядерных резонансах эффектов кластерной поляризации, а также же совсем мало изученных эффектов вызванных более реалистичным описанием волновых функций взаимодействующих кластеров в рамках используемой модели.

**Целью диссертационной работы** является исследование влияния кластерной поляризации и принципа Паули на спектр легких ядер.

**Задачи проводимого исследования:**

1. Провести поэтапное изучение структуры ядер  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^8\text{Be}$  с применением двухкластерной, а после и трехкластерной моделей, на основе расчетов в рамках МРГ подхода.
2. Проанализировать основные свойства и характеристики исследуемых ядер, а также природы их резонансных состояний с использованием как стандартных методов описания, так и расширенных методов.
3. Обобщить (расширить) кластерную модель на возможность учета нескольких трехкластерных конфигураций, а также поляризуемости кластеров при их сближении.
4. Исследовать эффекты кластерной поляризации и их влияния на структуру связанных и резонансных состояний в ядре  ${}^6\text{Li}$ .
5. Исследовать структуру и причины возникновения артефактных паулевских резонансов в обширном ряде расчетов структур легких ядер и найти схему их исключения.

**Объекты исследования:** легкие ядра  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^8\text{Be}$ .

**Предметом исследования** являются связанные и резонансные состояния ядер  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^8\text{Be}$ , волновые функции, спектры, фазы рассеяния, а также эффекты и, явление, действующие на них в двухкластерной и трехкластерной модели.

**Методы исследования:** метод резонирующих групп, двух- и трехкластерная модели атомных ядер.

Для исследования упругого альфа-альфа рассеяния и резонансной структуры ядра  ${}^8\text{Be}$  использовалась микроскопическая двухкластерная модель. Данная модель представляет собой алгебраическую версию метода резонирующих групп, которая основана на разложении волновой функции двухкластерной системы по полному набору базисных функций гармонического осциллятора или, другими словами, осцилляторных функций. Для определения взаимодействия нуклонов внутри каждого из кластеров и взаимодействия между кластерами использовались три известных парных, полуреалистических, нуклон-нуклонных потенциала: модифицированный потенциал Хасегавы-Нагаты, потенциал Волкова В2 и потенциал Миннеоты. Каждый из них обладает своими уникальными характеристиками и различается размерами кора на малых расстояниях между нуклонами, что хорошо реализует сильные, умеренные и слабые коры. Это позволяет исследовать зависимость расчетных величин от формы нуклон-нуклонного потенциала. Детальный анализ волновых функций резонансных состояний проводился в осцилляторном, координатном и импульсном пространствах.

Для изучения резонансной структуры ядра  ${}^6\text{Li}$  и различных процессов внутри него по аналогии с ядром  ${}^8\text{Be}$  была использована микроскопическая двухкластерная модель АВМРГ. Помимо этого, для исследования ядра  ${}^6\text{Li}$  использовалась более усовершенствованная микроскопическая многоканальная модель, включающая в себя две трехкластерные конфигурации, позволяя более качественно учесть все имеющиеся у ядра бинарные каналы. Примененный метод позволил детальнее изучить спектр резонансных состояний в широком диапазоне энергий ядра  ${}^6\text{Li}$  и приблизиться к выявлению эффектов, влияющих на его форму и свойства. Отличительной же особенностью нового метода является использование для описания состояния ядерной системы сразу двух видов базисных функций: осцилляторных и гауссовских что позволило взять в учет более реалистичный вид волновой функции исследуемой ядерной системы.

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

1) Резонансные состояния имеют в пространстве компактную форму, и чем меньше ширина резонанса, тем компактней состояние. Среди всех состояний непрерывного спектра резонансные состояния имеют минимальные значения массовых среднеквадратичных радиусов и среднего расстояния между кластерами, так массовый среднеквадратичный радиус  $0+$  резонанса в ядре  ${}^8\text{Be}$  в 3 раза меньше, чем аналогичный радиус других состояний непрерывного спектра.

2) Поляризация взаимодействующих кластеров играет существенную роль в формировании основного состояния ядра  ${}^6\text{Li}$ , а также его низколежащих резонансных состояний. Приближая расчетное значение спектральных параметров к их экспериментальным значениям. Для основного состояния  $1+$  кластерная поляризация сдвигает энергию на 1.2 МэВ (от - 0.249 до -1.474), а также уменьшает в 2.4 раза энергию и в 10 раз ширину  $3+$  резонанса. На высоковозбужденные состояния отрицательной четности ядра  ${}^6\text{Li}$  кластерная поляризация влияет очень слабо. Предложен способ визуализации кластерной поляризации.

3) Сформулирован четкий критерий определения условий возникновения артефактных резонансов (резонансы Паули) и алгоритм их выделения.

### **Новизна исследования и практическая значимость работы**

Исследование структур атомных ядер через кластерное представление проводится в настоящее время множеством исследовательских групп по всему миру: странах Европы, Японии, США, в странах ближнего и дальнего зарубежья. В Казахстане исследования ядерных структур и их взаимодействий между собой имеют богатую историю и несколько научных направлений как в области теоретической физики, так и в области экспериментальной ядерной физики.

Проведенные работы и полученные результаты соответствуют актуальным на сегодняшний день направлениям развития науки как на территории Казахстана, так и во всём мире. Полученные же результаты являются абсолютно новыми и дают свой вклад в развитие кластерной модели ядра, предлагая новый взгляд на ранее существующие проблемы.

В рамках проведенных исследований:

1) Было продемонстрировано как узкие и широкие резонансы ядра  ${}^8\text{Be}$  проявляют себя в различных физических величинах: в стандартных, таких как фазы рассеяния, сечения рассеяния, а также расширенных методах анализа, таких как вес волновой функции во внутренней области, среднее расстояние между кластерами, а также спектроскопический фактор. Наглядно показана связь между волновыми функциями резонансных состояний в координатном и осцилляторном пространствах. Было показано как правильно оценивать среднее между кластерами.

2) Детально проанализирована природа резонансов в легких ядрах и влияние эффекта принципа Паули на волновые функции резонансных состояний. В результате было наглядно показано, что чем меньше ширина резонанса, тем сильнее на него оказывает воздействие принцип Паули.

3) Проведя систематический анализ свойств паулевских резонансов в большом числе легких ядер, был установлен порог появления паулевских резонансов. Была также установлена граница между почти запрещенными (almost forbidden Pauli states) и разрешенными состояниями (allowed Pauli state).

4) Предложен новый метод по устранению влияния эффектов паулевских резонансов;

5) Роль кластерной поляризации в формировании связанного и резонансных состояний ядра  ${}^6\text{Li}$ .

**Связь данной работы с другими научными исследованиями.**

В настоящей диссертационной работе были представлены материалы и результаты что были получены посредством выполнения основных задач научно-исследовательской работы по проекту: АР09259876 «Физика компактных звездных объектов» 2021-2023 гг. Дальнейшие задачи и исследования по представленному в данной диссертационной работе направлению уже ведутся в рамках научно-исследовательской работы по проекту Жас Галым 24-26: АР22683187 «Структура легких ядер и гиперядер в многоканальных и многокластерных моделях».

**Достоверность и обоснованность полученных результатов.** Все проводимые исследования были выполнены с учетом принципов и основных норм научной этики. Полученные результаты и основные тезисы проводимого научного исследования неоднократно излагались и представлялись на множестве международных научных конференций, с участием мировых высококвалифицированных специалистов в области проводимого исследования. Полученные результаты прошли тщательное рецензирование и были опубликованы в высокорейтинговых, периодических, научных изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science, а также в отечественных журналах, рекомендуемых КОКНВО.

**Личный вклад автора.** Докторантом были самостоятельно выполнены следующие задачи: литературный обзор источников по теме диссертационного исследования, проведение численных и аналитических расчетов, анализ полученных результатов, построение графиков фазовых сдвигов упругого и неупругого рассеяния, а также волновых функций резонансных состояний исследуемых ядер  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^8\text{Be}$ . Написание и корректировка текста опубликованных по теме диссертационного исследования публикаций. Также, докторантом осуществлялась подача манускриптов статей в редакции как отечественных, так и иностранных научных изданий в качестве автора для корреспонденции.