

АННОТАЦИЯ

Диссертационной работы на соискание степени доктора философии PhD
по образовательной программе «8D05308 – Ядерная физика»

ХОДЖАЕВА РОМАЗАНА АХМЕДЖАНОВИЧА

Структурные характеристики ядер $^{10,11}\text{B}$ во взаимодействиях с легкими заряженными частицами при низких энергиях.

В диссертации представлены результаты комплексного изучения структурных характеристик ядер $^{10,11}\text{B}$. Рассматриваются процессы их взаимодействия с легкими заряженными частицами, протекающие в низкоэнергетическом диапазоне, на основе экспериментальных наблюдений и теоретического анализа.

Актуальность темы исследования. Изучение структуры легких ядер и механизмов их взаимодействия с дейтронами и альфа-частицами остается важной и нерешенной задачей современной ядерной физики и астрофизики. Особый интерес вызывает экзотические явления, такие как нейтронное гало и выраженная кластеризация, выявленные как в нейтроноизбыточных, так и в стабильных ядрах. Для ядер изотопов бора ^{10}B и ^{11}B характерны ярко выраженные кластерные конфигурации, которые существенно влияют на динамику рассеяния и реакции переноса, проявляясь в аномальном росте сечений под большими углами.

Практическая значимость исследования связана с ролью изотопов бора в термоядерных технологиях, ядерной медицине и астрофизике. Уточнение параметров взаимодействия и спектроскопических факторов для этих ядер помогает повысить точность моделирования процессов, актуальных для разработки новых технологий и понимания нуклеосинтеза в звездах. Ядро ^{10}B активно используется в прикладных технологиях – в частности в бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ), где эффективность взаимодействия с нейтронами зависит от структуры и свойств ядра.

Феномен ядерной радуги при рассеянии α -частиц на ядрах бора предоставляет уникальную возможность детально исследовать оптические потенциалы, минимизируя неоднозначности традиционных подходов. Современные методы теоретического анализа, включая учет кластерного обмена и сопряженных каналов, позволяют глубже раскрыть структуру и механизмы реакций с участием легких ядер.

Таким образом, исследование взаимодействий дейтронов и α -частиц с изотопами бора являются актуальным направлением, сочетающим фундаментальный интерес и прикладные задачи ядерной физики.

Целью данной диссертации является комплексное экспериментальное и теоретическое исследование влияния кластерных структур стабильных изотопов $^{10,11}\text{B}$ на формирование выходов ядерных реакций во взаимодействиях с дейтронами и альфа-частицами при низких энергиях (в диапазоне 7-10 МэВ на нуклон), включая определение

спектроскопических характеристик исследуемых ядер путем измерения дифференциальных сечений процессов.

Задачи исследования:

- проведение экспериментальных измерений выходов реакций, сопровождающих взаимодействие дейтронов и α -частиц с ядром ^{10}B в энергетическом диапазоне 7-10 МэВ на нуклон;
- выполнение расчетного анализа дифференциальных сечений рассеяния дейтронов и α -частиц на ядрах ^{10}B и ^{11}B в области малых энергий и извлечение параметров деформации исследуемых ядер;
- анализ влияния кластерных конфигураций « $^9\text{B} + n$ », « $^6\text{Li} + \alpha$ » и ^8Be на поведение сечений при больших углах и определение их спектроскопических амплитуд.

Объект исследования: дифференциальные сечения угловых распределений процессов $^{10}\text{B}(d,d)^{10}\text{B}$, $^{10}\text{B}(d,t)^{10}\text{B}$, $^{10}\text{B}(\alpha,\alpha)^{10}\text{B}$, $^{11}\text{B}(\alpha,\alpha)^{11}\text{B}$ в интервале энергий 7-10 МэВ/нуклон.

Предмет исследования: экспериментальное измерение дифференциальных сечений рассеяния дейтронов, α -частиц и реакций (d,t) на ядрах ^{10}B и ^{11}B на пучке ускорителя У150М. Исследования динамики процессов, формирующих поперечные сечения упругого и неупругого рассеяния, с целью определения достоверных параметров оптических потенциалов обеспечивающих реалистичное моделирование межъядерных взаимодействий для систем « $d+^{10}\text{B}$ » и « $\alpha+^{10}\text{B}$ ». Получение спектроскопических данных об энергетических уровнях ядер ^{10}B и ^{11}B .

Методы исследования: идентификация частиц в эксперименте проводилась с применением методики ΔE -E. Теоретический анализ экспериментальных данных проводился с помощью программ SPI-GENOA и FRESCO в рамках оптической модели, метода связанных каналов и метода искаженных волн.

Ключевые положения, выносимые на защиту:

1. Получены новые угловые распределения дифференциальных сечений ядерных процессов $^{10}\text{B}(d,d)^{10}\text{B}$, $^{10}\text{B}(d,t)^{10}\text{B}$, $^{10}\text{B}(\alpha,\alpha)^{10}\text{B}$ в низкоэнергетическом интервале 7-10 МэВ/нуклон в рамках анализа которых были определены структурные характеристики ядра ^{10}B .
2. Найдены физически обоснованные параметры оптических потенциалов межъядерного взаимодействия для систем « $d+^{10}\text{B}$ » при энергии 14,5 МэВ и « $\alpha+^{10}\text{B}$ » при энергии 29 МэВ обеспечивающие согласованное описание экспериментальных данных и надёжное извлечение параметров ядерной деформации и спектроскопических факторов.
3. Установлены параметры квадрупольной деформации ядер ^{10}B ($\beta_2 = 0,7$) и ^{11}B ($\beta_2 = 0,42$), извлеченные из анализа неупругого рассеяния в рамках метода связанных каналов уточняющие связь между основными и возбуждёнными состояниями ядер, подтверждающих коллективный характер их структуры.
4. Извлечены спектроскопические факторы кластерных конфигураций $^{10}\text{B} \rightarrow ^9\text{B} + n$, $^9\text{B} (3/2^-)$ ($SA = 0,67$), $^9\text{B} (5/2^-)$ ($SA = 0,94$), ^8Be ($SA = 0,8$) и $^{10}\text{B} \rightarrow$

${}^6\text{Li} + \alpha$ ($SA = 1,4$) учет которых объясняет подъем угловых распределений дифференциальных сечений упругого рассеяния при обратных углах и обосновывает кластерную структуру исследуемых ядер

Научная новизна. Полученные в диссертационной работе результаты расширяют экспериментальную базу данных по низкоэнергетическим ядерным взаимодействиям, прежде всего за счет измерений процессов взаимодействия дейтронов и α -частиц с ядрами ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{11}\text{B}$ в интервале энергий 7-10 МэВ/нуклон, для которого ранее имелись лишь фрагментарные сведения. Комплексный анализ экспериментального материала выполнен с привлечением нескольких теоретических подходов, что позволило проследить, каким образом особенности внутренней структуры исследуемых ядер отражаются на формировании сечений упругих и неупругих процессов. Сопоставление полученных результатов с опубликованными данными в более широком энергетическом диапазоне дало возможность уточнить интерпретацию наблюдаемых эффектов и конкретизировать физические механизмы, определяющие характер взаимодействия исследуемых ядерных систем.

В рамках метода связанных каналов уточнены значения параметров квадрупольной деформации ядер ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{11}\text{B}$ (с отрицательным знаком) в интервале энергий 7-10 МэВ/нуклон.

Извлечены физически обоснованные значения спектроскопических амплитуд кластерных конфигурации ${}^{10}\text{B} \rightarrow \langle {}^6\text{Li} + \alpha \rangle$, ${}^{10}\text{B} \rightarrow \langle {}^9\text{B} + n \rangle$ и ${}^8\text{Be}$ из описания сечений рассеяния (α, α), (d, d) и реакций (d, t) на ядре ${}^{10}\text{B}$ в задней полусфере.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Выполненное исследование обладает высокой научной и практической ценностью. Полученные новые прецизионные экспериментальные данные по взаимодействию дейтронов и α -частиц с ядрами ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{11}\text{B}$ в области низких энергий 7-10 МэВ существенно дополняют существующую базу ядерных данных, особенно в контексте широкого углового диапазона измерений, ранее слабо представленного в мировой практике. Экспериментальные сечения процессов, таких как ${}^{10}\text{B}(d, d){}^{10}\text{B}$, ${}^{10}\text{B}(d, t){}^9\text{B}$, ${}^{10}\text{B}(\alpha, \alpha){}^{10}\text{B}$ и ${}^{11}\text{B}(\alpha, \alpha){}^{11}\text{B}$ являются новым вкладом в глобальную ядерную базу данных и могут быть включены в международные библиотеки, такие как EXFOR, поддерживаемую МАГАТЭ.

С теоретической точки зрения, полученные результаты важны для уточнения структурных характеристик ядер ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{11}\text{B}$ и могут быть использованы для верификации и калибровки современных ядерных моделей. Сравнения новых экспериментальных данных с предсказаниями теоретических расчетов позволит повысить точность описания механизмов ядерных взаимодействий и реакций кластерного типа в расширенной области энергий.

Практическая значимость результатов заключается в их применении при моделировании физических процессов в перспективных ядерно-энергетических установках, включая системы с термоядерным и гибридным управлением. Кроме того, накопленные данные могут быть использованы при

расчетах реакций нуклеосинтеза, происходящих в астрофизических условиях – в звездах и межзвездной среде, где взаимодействия легких ядер играют ключевую роль в формировании химического состава Вселенной.

Достоверность результатов работы:

Обеспечивается использованием проверенных и широко признанных в мировой научной практике экспериментальных и теоретических методов. В экспериментальной части применялась надежная методика регистрации и идентификации частиц – ΔE - E методика, продемонстрировавшая высокую эффективность при исследовании ядерных реакций. Теоретическое моделирование проводилось с использованием оптической и фолдинговой моделей, а также метода искаженных волн и связанных каналов, что обеспечивает комплексное описание реакционных механизмов.

Численные расчеты выполнены с применением общепринятого в мировой ядерной физике программного комплекса FRESCO, многократно апробированного в задачах подобного класса.

Полученные результаты находятся в хорошем согласии с литературными данными других авторов, что дополнительно подтверждает корректность примененного методического подхода и обеспечивает высокую степень достоверности выводов, сделанных в рамках настоящего исследования

Связь настоящего исследования с другими научными проектами.

Диссертационная работа выполнена как часть более широкого комплекса научных исследований по ряду тематических направлений: BR10965191 «Комплексные исследования по ядерной и радиационной физике, физике высоких энергий и космологии для развития конкурентных технологий» (2021-2023 гг.), ИРН AP14870964 «Исследования процессов взаимодействия протонов и ионов ^{10}B с ядрами ^{11}B для термоядерных и астрофизических приложений» (2022-2024гг.) и BR21881941 «Экспериментальные и теоретические исследования в области высоких и сверхвысоких энергий для решения актуальных задач астрофизики и физики космических лучей» (2023-2025 гг.).

Личный вклад автора. В основе диссертационной работы лежат исследования, проведенные совместно с сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» (г. Москва, Российская Федерация) и лаборатории низкоэнергетических ядерных реакций Института ядерной физики (г. Алматы, Казахстан), итоговые результаты которых опубликованы совместно. Вклад автора охватывает формулировании ключевых научных проблем, участие в обсуждении методических подходов и экспериментальных планов, непосредственном выполнении широкого спектра экспериментальных измерений, а также в комплексной обработке полученных экспериментальных данных и их последующей интерпретации в контексте теоретическом моделей.

Апробация работы и публикации. Материалы диссертационной работы представлялись и докладывались на следующих международных научных конференциях:

– V International Scientific Forum «Nuclear Sciences and Technologies» – Almaty, Republic of Kazakhstan, 7-11 October, 2024.

– IV International Scientific Forum «Nuclear Science and Technologies», dedicated to the 65th anniversary of the Institute of Nuclear Physics.– Almaty, Republic of Kazakhstan, 26-30 September, 2022.

– III Международного научного форума «Ядерная наука и технологии», посвященный 30-летию Независимости Республики Казахстан. – Алматы, Республика Казахстан, 20-24 сентября, 2021.

Публикации по теме диссертационной работы. В рамках выполнения диссертационного исследования автором подготовлено 10 научных публикаций. Среди них – 3 статьи опубликованы в рецензируемых зарубежных журналах квартилей Q2–Q3 (Universe (Scopus – 74-ый перцентиль, WoS – Q3), Physics (Scopus – 55-ый перцентиль, WoS – Q2), Nuclear Physics A (Scopus – 71-ый перцентиль, WoS – Q2)) и 2 публикации в материалах международных конференций (Conference Paper), которые входят в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, а также 5 публикаций в сборниках материалов международных научных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает введение, четыре основных раздела, заключение и перечень использованной литературы, содержащий 101 источник. Общий объем работы составляет 92 страниц, включая 4 таблицы и 39 рисунков.