

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD)
по специальности 6D060500 – Ядерная физика

НАСУРЛА МАУЛЕН

Влияние кластерных структур стабильных изотопов лития и бора на формирование выходов ядерных реакций во взаимодействиях с дейтронами и ионами гелия

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию и теоретическому анализу дифференциальных сечений ядерных процессов ${}^7\text{Li}(d,d){}^7\text{Li}$, ${}^7\text{Li}(d,t){}^6\text{Li}$, ${}^{11}\text{B}(d,d){}^{11}\text{B}$, ${}^{11}\text{B}(d,t){}^{10}\text{B}$, ${}^{11}\text{B}(\alpha,\alpha){}^{11}\text{B}$, ${}^{11}\text{B}(\alpha,t){}^{12}\text{C}$ при энергиях 7-10 МэВ/нуклон в рамках различных теоретических моделей.

Актуальность исследований. Экспериментальные исследования процесса взаимодействия в ядерных реакциях, проводимые с использованием ускорительной техники, остаются основным источником непосредственной информации о структуре ядер и механизме ядерных реакций. Особое место при этом занимает простейший в ядерной динамике процесс – упругое рассеяние, а относительно большая величина сечения позволяет извлечь принципиально важную для физики ядра информацию о величине эффективного потенциала взаимодействия сталкивающихся систем. При этом физически достоверные величины потенциала необходимы для расчета выходов продуктов ядерных реакций с участием различных по типу частиц во входном и выходном каналах реакций.

В то же время в случае рассеяния сложных частиц параметры потенциала подвержены существенным неоднозначностям. Несмотря на многочисленные попытки, предпринимаемые экспериментаторами и теоретиками, задача определения потенциала взаимодействия составных частиц с ядрами далека от завершения и относится к одной из актуальных и открытых проблем физики ядра.

Совокупность накопленных данных по взаимодействию сложных частиц (нуклиды водорода и гелия, тяжелых ионов) с легкими ядрами при энергиях выше 10 МэВ/нуклон свидетельствует о том, что сечения рассеяния в полном угловом диапазоне формируются двумя механизмами: потенциальное рассеяние и обменные процессы. При этом вклад обменных процессов напрямую связан со структурой взаимодействующих систем. Комплексное рассмотрение потенциального рассеяния с обменными процессами позволяет использовать характер сечения реакций под большими углами для исследования эффектов кластеризации в различных состояниях ядер, изучать их структурные особенности. Очевидно, наиболее благоприятными объектами подобного исследования являются ядра лития и бора, обладающие выраженной кластерной структурой.

В настоящее время достаточно систематически изучено рассеяние ионов гелия на ядрах ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$, имеющих ярко выраженную кластерную структуру. Наблюдаемый при этом «аномальный» подъем сечения под обратными углами удастся описать при учете вклада обменного механизма передачи кластеров, физически неотличимого от потенциального рассеяния. Поэтому в ряде работ учет этого механизма позволил не только получить более достоверные параметры оптических потенциалов, но и извлечь из анализа сечений под большими углами значения кластерных спектроскопических факторов.

Дополнительным критерием достоверности получаемых спектроскопических факторов для кластерной конфигурации « ${}^3\text{He}+t$ » ядра ${}^6\text{Li}$ могут быть извлечение этих величин из альтернативного подхода, а именно из передачи t -кластера в ядерных реакциях.

Например, реакция (d,t) на ядрах ${}^7\text{Li}$ ранее исследовалась при энергиях 12 МэВ, 15 МэВ, 18 МэВ, 20 МэВ и 28 МэВ. Только при $E_d=12$ МэВ измерения были выполнены в полном диапазоне углов. В остальных случаях они проводились в области передней полусферы. Значительный подъем сечения реакция (d,t) при 12 МэВ можно было объяснить обменом t -кластера, но учитывался только вклад механизма прямого срыва нейтрона, который описывает поведение сечений в передних углах рассеяния. При других энергиях (15, 20, 28 МэВ) проводился лишь качественный анализ на основе приближения плоской волны, а значения спектроскопических факторов не извлекались.

Не меньший интерес представляет изучение упругого и неупругого рассеяния α -частиц и дейтронов на ядрах ${}^{11}\text{B}$. Это связано с наличием « α - α - t » кластерной структуры данного ядра. Изучение состояний ядра ${}^{11}\text{B}$, в котором одновременно могут сосуществовать как кластерная конфигурация $(2\alpha+t)$, так и структуры оболочечной модели, полезно для определения характеристик возбужденных нейтронных гало состояний данного ядра. Действительно, в ряде работ предполагалось, что низколежащие состояния ${}^{11}\text{B}$, в основном, имеют оболочечную структуру, в то время как кластерные структуры хорошо прослеживаются в состояниях с отрицательной четностью выше или вблизи порога развала на кластеры. Кроме того, в последних экспериментах по резонансному рассеянию на ядрах ${}^7\text{Li}$ была подтверждена новая полоса отрицательной четности, включающая следующие возбужденные состояния: 8,56 МэВ ($3/2^-$), 10,34 МэВ ($5/2^-$), 11,59 ($7/2^-$) и 13,03 МэВ ($9/2^-$). Поскольку эти состояния имеют большие ширины по альфа-распаду, то эта полоса может быть сформирована на основе кластерных структур. Кроме того, аналогия кластерной структуры ядра ${}^{11}\text{B}$ с трех кластерной структурой ${}^{12}\text{C}$ представляет особый интерес. В частности, в ряде работ было предложено, что состояние $3/2^-_3$ может иметь структуру, состоящую из трех кластеров в виде $2\alpha+t$ конфигурации и может быть аналогом возбужденного состояния ${}^{12}\text{C}$ со спином 0^+_2 , которое имеет структуру, состоящую из трех альфа-частиц. Тем не менее, предполагалось, что состояние 8,56 МэВ ($3/2^-$) не может соответствовать состоянию ${}^{12}\text{C}$ (0^+_2).

Аналогия между 8,56 МэВ ($3/2^-$) и ^{12}C (0^+_2) является спорной и требует дальнейшего исследования этой проблемы.

Следовательно, изучение взаимодействия заряженных частиц с ядрами лития и бора представляет большой интерес. С одной стороны, литий и бор являются одним из важнейших элементов топливного цикла в наиболее перспективных проектах термоядерных реакторов, использующих дейтерий-тритиевую плазму или альтернативные циклы безнейтронного топлива. Другой аспект связан с вопросами нуклеосинтеза легких ядер на ранней стадии эволюции Вселенной и реакциями, протекающими с образованием в звездной среде ядер бериллия, лития и бора.

Цель диссертационного исследования

Основной целью работы является экспериментальное и теоретическое исследование влияния кластерных структур стабильных изотопов лития и бора на формирование выходов ядерных реакций во взаимодействиях с дейтронами и α -частицами.

Задачи исследования. Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие задачи:

- Измерения дифференциальных сечений рассеяния дейтронов, α -частиц и реакций (d,t), (α,t) на ядрах ^7Li и ^{11}B при энергиях 7-10 МэВ/нуклон на изохронном циклотроне У150М Института ядерной физики (г. Алматы, Казахстан);

- Определение глобальных параметров оптического и фолдинг потенциалов взаимодействия для ядерных систем « $d+^7\text{Li}$ », « $d+^{11}\text{B}$ » и « $\alpha+^{11}\text{B}$ » из анализа экспериментальных данных по упругому рассеянию;

- Извлечение параметров деформаций для возбужденных состояний ядер ^7Li и ^{11}B из анализа экспериментальных данных по неупругому рассеянию;

- Определение величин спектроскопических факторов кластерных конфигураций $^7\text{Li} \rightarrow \langle \alpha+t \rangle$ и $^{11}\text{B} \rightarrow \langle 2\alpha+t \rangle$;

Объект исследования. Процессы $^7\text{Li}(d,d)^7\text{Li}$, $^7\text{Li}(d,t)^6\text{Li}$, $^{11}\text{B}(d,d)^{11}\text{B}$, $^{11}\text{B}(d,t)^{10}\text{B}$, $^{11}\text{B}(\alpha,\alpha)^{11}\text{B}$ и $^{11}\text{B}(\alpha,t)^{12}\text{C}$ при энергиях 7-10 МэВ/нуклон.

Предмет исследования. Дифференциальные сечения рассеяния d и α -частиц, реакций (d,t) и (α,t) на легких ядрах на пучке ускорителя У150М. Механизмы формирования сечений упругого и неупругого рассеяния ионов d и α -частиц, реакций (d,t) и (α,t) на ядрах ^7Li и ^{11}B . Параметры потенциалов ядро-ядерных взаимодействий. Спектроскопические характеристики состояний ядер ^7Li и ^{11}B .

Методы исследования. Для проведения экспериментального исследования на изохронном циклотроне У-150М Института ядерной физики (Алматы, Казахстан) была использована Е-Е методика регистрации и идентификации продуктов ядерных взаимодействий. Суть этой методики заключается в одновременном измерении удельных потерь энергии продуктов ядерных реакций в веществе (dE/dx) и их полной кинетической энергии (E). Теоретический анализ проводился с использованием компьютерной программы FRESKO, которая позволяет проводить

теоретические расчеты по следующим моделям: стандартная оптическая модель ядра, фолдинг модель, метод искаженных волн и метод связанных каналов реакций.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Дифференциальные сечения ядерных реакций ${}^7\text{Li}(d,d){}^7\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}(d,t){}^6\text{Li}$ при энергиях 14.5 и 25 МэВ, ${}^{11}\text{B}(d,t){}^{10}\text{B}$ при энергии 14.5 МэВ и ${}^{11}\text{B}(\alpha,t){}^{12}\text{C}$ при энергии 40.0 МэВ и их анализ по оптической модели ядра и методу искаженных волн, устраняет дискретную неоднозначность реальной части потенциала для систем « $d+{}^7\text{Li}$ », « $d+{}^{11}\text{B}$ » и « $\alpha+{}^{11}\text{B}$ » в широком диапазоне энергий.

2. Установленные значения параметров квадрупольной деформации ядер ${}^7\text{Li}$ ($\beta_2=1.1\pm 0.3$) и ${}^{11}\text{B}$ ($\beta_2=-0.80\pm 0.2$) при учете связи каналов между основным и возбужденными состояниями исследуемых ядер сокращают отклонения расчетных сечений от экспериментальных в области средних углов до 20-30%.

3. Установленные величины спектроскопических факторов кластерных конфигураций ${}^7\text{Li}\rightarrow\langle d+t \rangle$ ($SF = 1.19$) и ${}^{11}\text{B}\rightarrow\langle 2\alpha+t \rangle$ ($SF = 1.0$) корректно воспроизводят подъем сечений реакций (d,t) и (α,t) под обратными углами на исследуемых ядрах и обосновывают их кластерные структуры.

Научная новизна.

1. Впервые измерены дифференциальные сечения ядерных реакций ${}^7\text{Li}(d,d){}^7\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}(d,t){}^6\text{Li}$ при энергиях 14.5 и 25 МэВ, ${}^{11}\text{B}(d,t){}^{10}\text{B}$ при энергии 14.5 МэВ и ${}^{11}\text{B}(\alpha,t){}^{12}\text{C}$ при энергии 40.0 МэВ. Анализ этих данных в рамках оптической модели ядра и метода искаженных волн позволил устранить дискретную неоднозначность реальной части потенциала взаимодействия для систем « $d+{}^7\text{Li}$ », « $d+{}^{11}\text{B}$ » и « $\alpha+{}^{11}\text{B}$ ».

2. Определены значения параметров квадрупольной деформации ядер ${}^7\text{Li}$ ($\beta_2=1.1\pm 0.3$) и ${}^{11}\text{B}$ ($\beta_2=-0.80\pm 0.2$ с отрицательным знаком), что позволило существенно улучшить описания исследуемых угловых распределений в области средних углов рассеяния.

3. Рассчитаны величины спектроскопических факторов кластерных конфигураций ${}^7\text{Li}\rightarrow\langle d+t \rangle$ ($SF=1.19$) и ${}^{11}\text{B}\rightarrow\langle 2\alpha+t \rangle$ ($SF=1.0$), необходимые для определения сечений реакций (d,t) и (α,t) под обратными углами.

Научная и практическая ценность работы

Результаты выполненных исследований имеют высокую научную и практическую ценность. Полученные экспериментальные сечения процессов ${}^7\text{Li}(d,d){}^7\text{Li}$, ${}^7\text{Li}(d,t){}^6\text{Li}$, ${}^{11}\text{B}(d,t){}^{10}\text{B}$ и ${}^{11}\text{B}(\alpha,t){}^{12}\text{C}$ при энергиях 7-10 МэВ/нуклон в широком угловом диапазоне могут существенно дополнить банк мировых ядерных данных, библиотеку МАГАТЭ (EXFOR) по взаимодействию дейтронов и α -частиц с ядрами лития и бора.

Экспериментальные данные также необходимы для уточнения параметров теоретических моделей ядро-ядерных взаимодействий. Совокупность полученных данных по сечениям рассеяния дейтронов и α -частиц на ядрах ${}^7\text{Li}$ и ${}^{11}\text{B}$ при низких энергиях и структурные характеристики исследуемых ядерных систем будут полезны для модельных расчетов

энергетического баланса перспективных ядерно-энергетических установок, а также при теоретических расчетах по реакциям нуклеосинтеза в звездах и межзвёздных пространствах.

Достоверность результатов работы

В диссертационной работе использовались хорошо известные экспериментальные и теоретические методики и модели: E-E методика регистрации и идентификации частиц, оптическая модель, фолдинг модель, метод искаженных волн и метод связанных каналов. Расчеты проводились с использованием общепризнанного, широко апробированного компьютерного кода: FRESKO. Полученные результаты хорошо согласуются с работами других авторов в этой области.

Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами. Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательских работ по темам: «Изучение возбужденных гало-состояний нейтроноизбыточных ядер ^9Be , ^{11}B , ^{13}C во взаимодействиях с дейтронами» №ГР 0115РК01006 (2015-2017 гг.) и «Исследование радиационного захвата и периферийных ядерных реакций передачи протонов при энергиях вблизи кулоновского барьера, вызванных тяжелыми ионами, для астрофизических и термоядерных приложений», АР05132062/ГФ(2018-2020 гг.).

Личный вклад автора. Изложенные в диссертации результаты получены автором совместно с сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» (г. Москва, Российская Федерация), Университета Сайтама (г. Токио, Япония) и лаборатории низкоэнергетических ядерных реакций Института ядерной физики (г. Алматы, Казахстан) и отражены в совместных публикациях. Личный вклад автора заключается в участии в постановке задач исследования и планировании эксперимента, в проведении комплекса экспериментальных исследований, в обработке и анализе экспериментальных результатов.

Апробация работы.

Материалы диссертационной работы докладывались на 6 республиканских и международных конференциях: 19th International Workshop on Radiation Imaging Detectors iWoRID, Poland, Krakov, July 2–6, 2017; XXXVI Mazurian Lakes Conference on Physics, Piaski, Poland, September 3-9, 2017; Zakopane Conference of Nuclear Physics, "Extremes of the Nuclear Landscape", August 26- September 2, 2018, Zakopane, Poland; DREB2018 - 10th International Conference on Direct Reactions with Exotic Beams 4-8 June 2018, Matsue, Japan; II International Scientific Forum «Nuclear Science and Technologies» Almaty, Kazakhstan, June – 24-27, 2019; Ninth International Conference «Modern Problems of Nuclear Physics and Nuclear Technologies» September 24-27, 2019, Tashkent, Uzbekistan.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 19 работ (10 статей, 8 тезисов и один патент), из них 3 статьи в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки МОН РК, а также 1 патент Российской Федерации "Полупроводниковый детектор с внутренним усилением", 7 статей с ненулевым импакт-фактором в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка использованных источников из 217 наименований. Общий объем работы составляет 127 страницы текста, в том числе 16 таблиц и 51 рисунок.