

## АННОТАЦИЯ

**диссертационной работы Валиолда Динары Салаваткызы на тему «Исследование кулоновского развала экзотических ядер в нестационарном квантово-механическом подходе», представленной на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности: «6D060500 – Ядерная физика»**

### **Актуальность темы исследования**

Характерной чертой физики экзотических ядер является тесная связь механизма ядерной реакции со структурой ядра. Наиболее широко используемой реакцией для изучения гало ядер является реакция кулоновского развала, которую можно рассматривать как переход нуклона из гало ядра в континуум за счет изменяющегося кулоновского поля между нуклоном и мишенью при столкновениях. Таким образом, кулоновский развал является одним из основных инструментов в изучении гало ядер. Сечение развала дает полезную информацию о структуре гало.

В рамках диссертационной работы для более детального изучения механизма гало структуры было запланировано включить в расчет сечения развала низколежащие резонансы в различных парциальных и спиновых состояниях ядра  $^{11}\text{Be}$ . Кулоновский развал гало ядер исследуется численно путем решения нестационарного уравнения Шредингера на угловой лагранжевой и квазиравномерной радиальной сетке. Разработанная расчетная схема открывает новые возможности в изучении кулоновского, а также ядерного развала гало ядер как на тяжелых, так и на легких мишенях.

Одной из актуальных задач работы является изучение вклада низколежащих резонансов в сечение развала. Поскольку в предыдущих расчетах учитывались только два связанных состояния ядра  $^{11}\text{Be}$  (основное состояние  $1/2^+$  и первое возбужденное состояние  $1/2^-$ ), предполагается, что учет низколежащих резонансов улучшит теоретическое описание экспериментальных данных по сечению реакции развала  $^{11}\text{Be} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{10}\text{Be} + n + ^{208}\text{Pb}$  при промежуточных энергиях и объясняют появление видимых пиков в области энергий 1.23, 2.78 и 3.3 МэВ, что соответствует положению пиков резонансов  $5/2^+$ ,  $3/2^-$  и  $3/2^+$ . Также особое внимание следует уделить изучению влияния ядерных эффектов на сечение развала, что позволяет извлекать более подробную информацию о структуре экзотических ядер.

Таким образом, представленные задачи данной диссертационной работы имеют приоритетные направления не только в Казахстане, но и в мире. Исследования по этой теме являются одним из активно развивающихся направлений современной ядерной физики всех крупных научных центров мира. Полученные результаты вполне конкурентоспособны на международном уровне. Эти исследования представляют не только академический интерес, но и большое практическое значение. Ожидаемые результаты очень важны и актуальны для интерпретации и планирования

будущих экспериментов с экзотическими ядрами, поскольку в настоящее время наблюдается существенное отставание теоретических моделей от потребности в экспериментах в этой области. Ключевой проблемой, которую решают задачи диссертационной работы, является расширение подхода на область низких энергий, так как эта область практически не изучена как теоретически, так и экспериментально. Таким образом, полученные результаты будут важны для проверки существующих теоретических моделей и для практического применения теоретических расчетов в экспериментах по исследованию развала гало ядра на низко-энергетических радиоактивных пучках.

**Целью диссертационной работы** является исследование низколежащих резонансов в кулоновском развале гало-ядер  $^{11}\text{Be}$  на тяжелой мишени ( $^{208}\text{Pb}$ ) от средних (70 МэВ/нуклон) до низких энергий (5 МэВ/нуклон) в непertурбативном нестационарном квантово-механическом подходе.

Для достижения цели были определены следующие задачи:

- подобрать и проанализировать параметры потенциалов между нейтроном и кором  $^{10}\text{Be}$  для описания различных парциальных и спиновых состояний ядра  $^{11}\text{Be}$ ;
- исследовать влияние низколежащих резонансных состояний ( $5/2^+$ ,  $3/2^-$  и  $3/2^+$ ) на кулоновский развал ядра  $^{11}\text{Be}$  на тяжелой ( $^{208}\text{Pb}$ ) мишени в квазиклассическом и квантово-квазиклассическом нестационарном подходе;
- изучить вклад ядерного взаимодействия между снарядом и мишенью на развал;
- исследовать влияние криволинейной траектории при описании движения снаряда при низких энергиях пучка;
- исследовать возбуждение  $^{11}\text{Be}$  при столкновении с мишенью  $^{208}\text{Pb}$ .

**Объектами исследования** являются гало ядро,  $^{11}\text{Be}$ , низколежащие резонансы и сечение развала.

**Предметом исследования** является квантовая механика, работа посвящена численному решению нестационарного уравнения Шредингера, точным вычислениям сечений развала в квантово-механическом подходе.

**Методы исследования:** численные методы решения стационарных и нестационарных уравнений Шредингера: метод обратной итерации, метод прогонки, метод расщепления, представление дискретной переменной, конечно-разностный метод на квазиравномерной радиальной сетке.

**Основные положения, выносимые для защиты:**

1. Учет низколежащих резонансных состояний  $^{11}\text{Be}$  описывает экспериментальные данные по сечениям реакции развала  $^{11}\text{Be} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{10}\text{Be} + n + ^{208}\text{Pb}$  при 69 МэВ/нуклон с точностью 1-2% и объясняет появление видимых пиков при энергиях 1.23, 2.78, 3.3 МэВ, которые соответствуют положениям резонансов  $5/2^+$ ,  $3/2^-$  и  $3/2^+$  соответственно.

2. Сечения развала гало ядра  $^{11}\text{Be}$  на тяжелой ( $^{208}\text{Pb}$ ) мишени при низких энергиях столкновения (30-5 МэВ/нуклон) демонстрируют видимый пик, обусловленный резонансным состоянием  $5/2^+$  ( $E_r = 1,23$  МэВ).

3. Различия между линейной и криволинейной (реалистичной) траекториями снаряда при анализе реакции развала  $^{11}\text{Be} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{10}\text{Be} + n + ^{208}\text{Pb}$  составляют порядка нескольких процентов в диапазоне энергий 30-20 МэВ/нуклон, для 10 МэВ/нуклон расхождение составляет 10% и достигает величины более 20% при энергии 5 МэВ/нуклон, что превышает влияние ядерного взаимодействия.

**Новизна и оригинальность исследования** заключается в том, что впервые:

1. Низколежащие резонансные состояния ( $5/2^+$ ,  $3/2^-$  и  $3/2^+$ )  $^{11}\text{Be}$  были включены в анализ реакции развала  $^{11}\text{Be} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{10}\text{Be} + n + ^{208}\text{Pb}$  путем численного интегрирования нестационарного уравнения Шредингера.

2. Сечения развала одно-нейтронного гало ядра  $^{11}\text{Be}$  на тяжелой ( $^{208}\text{Pb}$ ) мишени рассчитаны путем решения нестационарного уравнения Шредингера с помощью непертурбативного алгоритма в широком диапазоне энергий пучка (70-5 МэВ/ нуклон).

3. Неупругие сечения возбуждения состояния  $1/2^-$  ядра  $^{11}\text{Be}$  при столкновениях с мишенью ( $^{208}\text{Pb}$ ) при малых энергиях пучка были рассчитаны с учетом кулоновского и ядерного взаимодействий между мишенью и снаряда. Анализируется влияние криволинейной траектории на движение снаряда при уменьшении энергии столкновения.

#### **Научная и практическая ценность работы.**

Экзотические ядра являются одним из наиболее интенсивно изучаемых объектов в современной мало-нуклонной ядерной физике. Теоретическое изучение гало ядер в рамках нестационарного квантово-механического подхода актуально в связи с планированием экспериментов по изучению легких ядер в радиоактивных пучках.

Разработанная в диссертации вычислительная схема открывает новые возможности в исследовании кулоновского, а также ядерного развала экзотических ядер как на тяжелых, так и на легких мишенях. Эта теоретическая модель потенциально может быть полезна для интерпретации и планирования низко-энергетических экспериментов по изучению гало структур. В особенности, полученные результаты при более низких энергиях (ниже 20 МэВ/нуклон) важны в связи с запланированной программой исследований на установках HIE-ISOLD (CERN) и ReA12 (MSU).

#### **Обоснованность и достоверность результатов работы.**

Результаты работы были успешно представлены на международных научных конференциях высокого уровня и легли в основу публикаций в высокорейтинговых журналах, таких как European Physical Journal A, Письма в ЭЧАЯ, Acta Physica Polonica B, Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. Достигнутые научные результаты хорошо согласуются с существующими работами других зарубежных авторов в этой области.

**Личный вклад автора.** В рамках исследования по теме диссертации автор принимал непосредственное участие в постановке задач, написании и отладке вычислительной программы, обработке и анализе полученных данных, интерпретации результатов, подготовке статей к публикации в

качестве полноправного члена научной группы. Вклад соискателя в результаты диссертационной работы являются существенными.

**Апробация итогов диссертационной работы.** Материалы диссертационной работы докладывались на следующих республиканских и международных конференциях:

1 "IV Международный научный форум - Ядерная наука и технологии". РГП ИЯФ МЭ РК (Алматы, Казахстан, 2022).

2 LXXI Международная конференция "ЯДРО - 2022. Ядерная физика и физика элементарных частиц. Ядерно-физические технологии", Московский государственный университет, (Москва, Россия, 2022).

3 Международный семинар по элементарным частицам и ядерной физике, РГП ИЯФ МЭ РК (Алматы, Казахстан, 2022).

4 I Международная школа-конференция "Атом. Наука. Технологии" РГП ИЯФ МЭ РК (Алматы, Казахстан, 2021).

5 XXV Международная научная конференция молодых ученых и специалистов (AYSS-2021), Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), (Алматы, Казахстан, 2021) и др.

Результаты исследования были доложены на семинаре Лаборатории теоретической физики имени Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований в июле 2020 года.

#### **Публикации.**

По результатам диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ, из них 4 - в журналах, входящих в базу данных, индексируемых наукометрическими базами SCOPUS, 2 - в журналах, входящих в список, рекомендованный ККСОН МОН РК.

**Статьи в журналах, индексируемых наукометрическими базами данных SCOPUS и Web of Science:**

1 Valiolda D., Melezhik V.S., Janseitov D. Investigation of low-lying resonances in breakup of halo nuclei within the time-dependent approach // The European Physical Journal A. – 2022. – Vol. 58. –P 341-3413.

2 Valiolda D., Melezhik V.S., Janseitov D. Study of bound and resonance states of  $^{11}\text{Be}$  in breakup reaction // Eurasian Journal of physics and functional materials. –2022. –Vol. 6, № 3. –P. 165-173.

3 Valiolda D., Melezhik V.S., Janseitov D. Study of nuclear contribution to breakup cross section of  $^{11}\text{Be}$  halo nuclei within time-dependent approach // Physics of Particles and Nuclei Letters. –2022. –Vol. 19, №5. –P. 477-480.

4 Valiolda D., Melezhik V.S., Janseitov D. Contribution of Low-lying Resonances in the Coulomb Breakup of  $^{11}\text{Be}$  Halo Nuclei// Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement. –2021. –Vol. 14, № 4. –P. 687-692.

#### **Статьи в научных изданиях Республики Казахстан:**

1 Исследование нейтронного гало ядра  $^{11}\text{Be}$  с учетом влияния внешнего поля// Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. –2018. –Том 318, №2. –С. 12-20.

2 Investigation of the neutron halo of the  $^{11}\text{Be}$  nucleus// Recent Contributions to Physics. –2018. –Том 64, №1. –С. 81-88.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы и 3 приложения. Объем диссертации составляет 90 страниц, содержит 34 рисунков и 11 таблиц, количество использованных источников - 62.

**Во введении** обсуждается актуальность темы диссертации и постановка задачи, представлены цели и новизна полученных результатов, их практическая и теоретическая значимость.

**Первый раздел** посвящен определению экзотических ядер и описанию ядра  $^{11}\text{Be}$  как гало-структуры. Рассмотрены основные особенности гало ядер, такие как ядерная плотность, большие радиусы и низкие энергии связи и другие. **Во втором разделе** формулируется непертурбативный нестационарный подход в реакциях развала. В этой модели нестационарное уравнение Шредингера для гало-нуклона интегрируется с помощью непертурбативного алгоритма на трехмерной пространственной сетке. **Третий раздел** посвящен обсуждению полученных результатов: расчету реакций развала. **В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации, и выполнены заключительные замечания.

**Основные результаты диссертационной работы.** При низких энергиях пучка (5-30 МэВ/нуклон) обнаружен значительный вклад низколежащих резонансов ( $5/2^+$ ,  $3/2^-$  и  $3/2^+$ ) и ядерной части взаимодействия между мишенью и снарядом в развал  $^{11}\text{Be}$  на  $^{208}\text{Pb}$  мишени. Удовлетворительная точность полуклассического подхода с линейными траекториями снаряда была также продемонстрирована для сечений развала  $^{11}\text{Be}$  до 30 - 20 МэВ/нуклон. Показано, что этот подход полезен и при более низких энергиях, где, однако, более адекватное описание дает квантово-квазиклассический подход. Сходимость вычислительной схемы и точность исследования продемонстрированы в рассматриваемом диапазоне энергий (5-69 МэВ/нуклон), включая низколежащие резонансы в различных парциальных и спиновых состояниях  $^{11}\text{Be}$ .