АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе Кажыкенова Шалкара Муратовича
на тему: «Экзотические состояния ядер с 1p оболочками»,
представленной на соискание степени доктора философии (PhD)
по образовательной программе 8D05308 – Ядерная физика

Общая характеристика диссертационной работы. Лёгкие ядра с 1p-оболочками представляют интерес благодаря сочетанию одночастичных, коллективных и кластерных проявлений. Реакции рассеяния служат эффективным инструментом изучения их структуры и проверки теоретических моделей ядерного взаимодействия.

В настоящей работе исследуются процессы взаимодействия протонов и дейтронов с ядрами ^{13}C, ^{14}C и ^{7}Li в области энергий, близкой к кулоновскому барьеру. В данном диапазоне энергий характеристики дифференциальных сечений обладают высокой чувствительностью к особенностям структуры ядра и параметрам взаимодействия. Это позволяет использовать реакции рассеяния для исследования распределения ядерной плотности и структурных эффектов в лёгких ядрах.

Анализ выполнен на основе опубликованных экспериментальных данных с привлечением современных теоретических подходов. Для построения потенциалов взаимодействия использованы оптическая модель и микроскопический фолдинг-подход.

Для описания динамики реакций применялись метод парциальных волн, приближение искажённых волн и формализмы связанных каналов с учётом влияния возбуждённых состояний и многоканальных процессов на характеристики рассеяния.

В работе исследованы угловые распределения дифференциальных сечений, фазовые сдвиги и амплитуды рассеяния для реакций ^{13}C(d,d)^{13}C, ^{13}C(d,p)^{14}C, ^{14}C(p,p)^{14}C и ^{7}Li(p,p)^{7}Li. Сопоставление результатов расчётов с экспериментальными данными позволило определить параметры оптических потенциалов, характеристики взаимодействия и особенности низколежащих возбуждённых состояний исследуемых ядер.

Анализ полученных результатов показывает влияние микроструктурных эффектов на формирование сечений упругого и неупругого рассеяния и позволяет уточнить интерпретацию экспериментальных данных для ядер с незамкнутой 1p-оболочкой. Работа посвящена исследованию структуры лёгких ядер и особенностей механизмов ядерных реакций.

Актуальность темы диссертации связана с необходимостью дальнейшего развития современных теоретических методов анализа ядерных реакций, позволяющих более полно описывать экспериментальные данные и получать достоверную информацию о структуре лёгких ядер с незамкнутой 1p-оболочкой. Несмотря на большое количество выполненных экспериментальных исследований, ряд вопросов, связанных с процессами рассеяния, переносом нуклонов и влиянием возбуждённых состояний на

характеристики ядерных реакций, до сих пор остаётся открытым. В связи с этим сохраняется необходимость применения современных микроскопических и многоканальных методов, позволяющих исследовать влияние структуры ядра на характеристики ядерных реакций в области энергий, близких к кулоновскому барьеру.

Цель диссертационной работы – установить влияние микроструктуры лёгких ядер ^{13}C, ^{14}C и ^{7}Li, включая их возможные экзотические состояния, на дифференциальные сечения реакций ^{13}C+^{12}C, ^{13}C(d,p)^{14}C, ^{14}C(p,p)^{14}C и ^{7}Li(p,p)^{7}Li.

Задачи исследования.

– установить влияние структурных особенностей ядер ^{13}C, ^{14}C и ^{7}Li на характеристики упругого и неупругого рассеяния протонов и дейтронов в области энергий, близкой к кулоновскому барьеру;

– построить и обосновать параметры микроскопических и оптических потенциалов взаимодействия для систем p+^{7}Li, d+^{13}C и p+^{14}C на основе сопоставления расчётных и экспериментальных данных;

– определить характеристики низколежащих возбуждённых состояний исследуемых ядер, включая параметры деформации и особенности их пространственной структуры;

– установить взаимосвязь между фазовыми сдвигами, парциальными амплитудами рассеяния и структурными характеристиками рассматриваемых ядер.

Объект исследования. Угловые распределения дифференциальных сечений при рассеянии протонов и дейтронов на ядрах ^{13}C, ^{7}Li и ^{14}C при энергиях 3,7-12,5 МэВ, включая реакции ^{13}C(d,d) ^{13}C, ^{13}C(d,p) ^{14}C, ^{14}C(p,p)^{14}C, ^{7}Li(p,p)^{7}Li.

Предметом исследования являются дифференциальные сечения, фазовые сдвиги и амплитуды рассеяния, структура возбуждённых состояний и параметры ядерных потенциалов для систем ^{13}C, ^{7}Li и ^{14}C при низких энергиях.

Методы исследования. В работе использованы современные методы теории ядерных реакций: оптическая модель с комплексным потенциалом, микроскопический фолдинг-подход с эффективным нуклон-нуклонным взаимодействием CDM3Y6, приближение искаженных волн (DWBA), метод парциальных волн и формализмы связанных каналов CC, CDCC и CRC. Мнимая часть оптического потенциала задавалась потенциалом Вудса–Саксона. Расчеты выполнялись в FRESCO, Python и Wolfram Mathematica, а сопоставление проводилось с экспериментальными данными из базы EXFOR и опубликованных работ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Для реакции ^{13}C+^{12}C в диапазоне энергий $E_{с.ц.м.}$=7,8-49,1 МэВ методом OM+DWBA установлено, что воспроизведение экспериментальных дифференциальных сечений в области больших углов рассеяния достигается при учёте одношагового нейтронного переноса; для конфигурации ^{13}C→^{12}C+n получена спектроскопическая амплитуда SA=0,87±0,10, слабо зависящая от энергии.

2. Для реакции $^{13}C(d,d)^{13}C$ при энергиях дейтрона E_d=14-16 МэВ форма угловых распределений определяется совместным влиянием виртуального развала дейтрона и процессов однонуклонного переноса. Воспроизведение экспериментальных данных требует учёта каналов $^{13}C(d,p)^{14}C$ и $^{13}C(d,n)^{14}N$.

3. По данным неупругого рассеяния дейтронов на ядре ^{13}C при энергии E_d=14,5 МэВ установлено, что возбуждённое состояние с энергией E=3,09 МэВ имеет преимущественно одночастичную структуру конфигурации ^{12}C+n, тогда как возбуждённые состояния с энергиями E=8,86 и 9,89 МэВ характеризуются доминирующим вкладом кластерной конфигурации $^{9}Be+\alpha$ при пренебрежимо малом вкладе конфигурации $^{12}C(0_2^+)$ +n.

4. Установлена применимость микроскопических потенциалов свертки (M3Y для ^{7}Li и CDM3Y для ^{14}C) на основе их кластерных плотностей (α+t и ^{12}C+2n) для количественного описания дифференциальных сечений упругого рассеяния протонов при энергиях 3,0-7,0 МэВ.

Научная новизна работы.

1. В низкоэнергетической области для ядер ^{13}C, ^{7}Li и ^{14}C выполнено исследование процессов упругого и неупругого рассеяния с использованием метода парциальных волн, приближения искажённых волн и формализмов связанных каналов для систем с незамкнутой 1p-оболочкой.

2. Для лёгких ядер с использованием микроскопических фолдинг-потенциалов прослежена зависимость результатов расчётов от структуры возбуждённых состояний. Особенности угловых распределений дифференциальных сечений связаны с проявлением одночастичных и кластерных конфигураций в ядрах ^{13}C и ^{14}C.

3. Для возбуждённых состояний ядра ^{13}C получены различия в структуре уровней. Для состояния с энергией 3,09 МэВ преобладает одночастичная конфигурация, тогда как уровни 8,86 и 9,89 МэВ характеризуются доминирующим вкладом кластерной конфигурации $^{9}Be+\alpha$.

4. При рассмотрении реакции $^{13}C+^{12}C$ в рамках кластерного фолдинг-подхода показано влияние одношагового нейтронного переноса на поведение дифференциальных сечений в области больших углов рассеяния. Учёт данного механизма обеспечивает воспроизведение особенностей аномального крупноуглового рассеяния, характерного для преломляющего режима взаимодействия.

5. Для системы $^{7}Li(p,p)^{7}Li$ в низкоэнергетической области рассмотрены особенности применения микроскопического фолдинг-подхода. При описании экспериментальных угловых распределений заметный вклад вносит мнимая часть оптического потенциала.

Теоретическая и практическая значимость исследования связана с исследованием микроструктуры лёгких ядер с незамкнутой 1p-оболочкой и особенностей ядерных реакций в области низких энергий. В работе рассмотрена связь между структурными характеристиками ядер ^{13}C, ^{14}C и ^{7}Li и параметрами упругого и неупругого рассеяния. Проанализированы угловые распределения дифференциальных сечений, фазовые сдвиги и амплитуды рассеяния. При описании исследуемых систем требуется учитывать не только

одночастичные состояния, но также кластерные конфигурации, процессы переноса и связь каналов.

Практическая значимость работы определяется использованием полученных расчётных характеристик при анализе экспериментальных данных по ядерным реакциям в области низких энергий. Рассчитанные параметры потенциалов, фазовые характеристики и дифференциальные сечения могут применяться при подготовке новых экспериментов, выборе диапазонов энергий и углов измерений, а также при уточнении существующих моделей ядерного взаимодействия. Полученные данные представляют интерес при формировании и дополнении специализированных баз ядерных данных, используемых при исследованиях структуры ядер и механизмов ядерных реакций.

Достоверность результатов обеспечивается использованием экспериментальных данных из базы EXFOR и опубликованных работ, а также применением современных методов теории ядерных реакций: оптической модели, микроскопического фолдинг-подхода, DWBA и метода парциальных волн. Численные расчеты выполнялись с использованием программного комплекса FRESCO.

Надежность выбранных параметров взаимодействия подтверждена сопоставлением расчетных угловых распределений с экспериментальными данными. Полученные результаты показывают устойчивое согласие с измеренными дифференциальными сечениями в исследуемом энергетическом диапазоне.

Связь данной работы с другими исследованиями. В настоящей диссертационной работе представлены материалы и результаты, связанные с выполнением научно-исследовательских работ по проектам и программе: AP14972391 «Исследование экзотических состояний ядер 1p-оболочки» (2022-2024 гг.), AP13067742 «Исследование кулоновского развала гало ядра ^{11}Be в нестационарном квантовом подходе» (2022-2024 гг.), AP19678586 «Получение экзотических ядер в реакции фрагментации от 10 МэВ/нуклон. Оценка выходов и продольных импульсных распределений» (2023-2025 гг.), BR24992891 «Комплексные исследования по ядерной, радиационной физике и технике, физике высоких энергий и космологии для развития конкурентных технологий» (2024-2026 гг.). Указанные исследования тематически связаны с изучением структуры легких и экзотических ядер, механизмов ядерных реакций и развитием расчетно-теоретических методов ядерной физики.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в самостоятельной постановке задач исследования, выборе теоретических подходов, выполнении расчётов в рамках метода парциальных волн и приближения искажённых волн, анализе и интерпретации результатов, сопоставлении теоретических данных с экспериментальными измерениями, а также подготовке публикаций по теме диссертации.

Публикации по теме диссертации. По результатам исследования опубликовано пять научных работ, в том числе две статьи в научных изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и

высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, и три статьи в зарубежных научных изданиях, индексируемых в базе Scopus и имеющих ненулевой импакт-фактор:

1. Urazbekov B.A., Karakozov B.K., Burtebayev N.T., Janseitov D.M., Nasrulla M., Alimov D., Valiolda D.S., **Kazhykenov Sh.**, Denikin A.S., Demyanova A.S., Danilov A.N., Starastcin V.A. Single-particle and cluster modes of ^{13}C excited states of 3.09, 8.86 and 9.89 MeV // International Journal of Modern Physics E. – 2022. – Vol. 31, No. 4. – 2250031. DOI: https://doi.org/10.1142/S0218301322500318

2. Janseitov D.M., Alimov D., Valiolda D.S., **Kazhykenov Sh.**, Zhaugasheva S.A., Mauyey B., Hamada Sh. Cluster folding analysis of the ^{13}C+^{12}C system at energies near the Coulomb barrier // Indian Journal of Physics. – 2025. – Vol. 99, No. 10. – P. 3891-3897. DOI: https://doi.org/10.1007/s12648-025-03585-1

3. **Kazhykenov Sh.M.**, Janseitov D.M., Yerbolatova G.U. Study of elastic scattering of protons on ^{7}Li in the energy range of 3-5.3 MeV // Physical Science and Technology. – 2025. – Vol.12, No. 1-2. – P. 134-141. DOI: https://doi.org/10.26577/phst202512113

4. Janseitov D.M., Alimov D., Valiolda D.S., **Kazhykenov Sh.**, Mauyey B., Kemper K.W., Hamada Sh. Observation of nucleon transfer and deuteron breakup on d+^{13}C system // Revista Mexicana de Física. – 2025. – Vol. 71, No. 3. – 031204. DOI: https://doi.org/10.31349/RevMexFis.71.031204

5. **Кажыкенов Ш.М.,** Джансейтов Д.М., Валиолда Д.С., Алтухов И. В. Проверка справедливости перекрестной проверки теоретических и численных методов на примере упругого рассеяния протонов на ^{14}C в диапазоне 3,7-7,0 МэВ // Вестник НЯЦ РК. – 2025. – № 4. – С. 198-208. DOI: https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-4-198-208

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научной школе-конференции «Атом. Наука. Технологии» (Казахстан, 2020 г.). Представлены на научном семинаре в ИЯФ (2026 г.). Отдельные результаты легли в основу исследовательского проекта по программе «Болашак» (2026 г.).

Диссертационная работа состоит из введения, восьми разделов, заключения и списка использованной литературы. Список использованной литературы состоит из 192 источников. Материалы исследования изложены на 95 страницах и содержат 9 таблиц и 28 рисунков.