

АННОТАЦИЯ

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

УСАБАЕВА ГУЛНАЗ АЮПЖАНОВНА

Исследование эмиссии легких заряженных частиц из взаимодействия стабильных изотопов водорода и гелия с ядрами ^{27}Al и ^{59}Co

Общая характеристика работы. Данная диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию и теоретическому анализу дважды-дифференциальных и интегральных сечений реакций (p,xp) и ($p,x\alpha$) для налетающих протонов с энергией $E_p = 7$ и 22 МэВ, а также реакций (α,xp) и ($\alpha,x\alpha$) для α -частиц с энергией $E_\alpha = 29$ МэВ, взаимодействующих с ядрами ^{27}Al и ^{59}Co .

Актуальность темы. В настоящее время новые прецизионные экспериментальные данные по дважды-дифференциальным сечениям реакций с заряженными частицами при средней энергии очень важны, так как роль новых ядерно-физических экспериментов в создании базы ядерных данных и развитие теоретических моделей в соответствии с современными подходами является ключевой как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях. Например, для производства различных радиоизотопов, требуется все больше и больше экспериментальных данных по образованию конечных изотопов. Также существует проблемы накоплений радиоактивных отходов с большим периодом полураспада, которые могут быть решены при разработке перспективных гибридных электроядерных установок ADS (Accelerator Driven System), состоящих из высокоэнергетического ускорителя протонов и глубоко подкритического атомного реактора. Основная идея заключается в использовании ускорителей заряженных частиц высоких энергий для производства нейтронов в мишениах из тяжелых элементов. Такая система позволяет получать достаточно высокие потоки нейтронов, которые можно использовать для производства энергии, трансмутации радиотоксичных изотопов или трития для термоядерных источников. Такие установки отвечают всем требованиям безопасности МАГАТЭ. Остановка ускорителя остановит выброс нейтронов из мишени в подкритический реактор, что приведет к быстрому затуханию цепной ядерной реакции. Физический сценарий работы такой системы предусматривает наличие экспериментальных данных по ключевым параметрам взаимодействия нуклидов – сечениям взаимодействия, энергетическим спектрам и угловым распределениям вторичных частиц ($^{1,2,3}\text{H}$, $^{3,4}\text{He}$ и др.), которые могут выступать в качестве агентов, инициирующих реакции с испусканием нейтронов.

Принципиально важным для экспериментального изучения предравновесного распада ядер является использование методик, позволяющих проводить одновременное измерение непрерывных угловых распределений для всех открытых каналов. Разработка концепции

промежуточного распада ядер как индикатора возникновения и эволюционной динамики возбужденного состояния - один из важнейших вопросов теории ядерных реакций. С практической точки зрения изучение взаимодействия легкозаряженных ($^{1,2,3}\text{H}$, $^{3,4}\text{He}$ и др.) частиц с веществом, знание их дифференциальных сечений, играет очень важную роль не только в ядерной и термоядерной науке, но и в таких сферах как дозиметрия, лучевая терапия, производство медицинских радионуклидов, астрофизика, космохимия. В настоящее время это напрямую связано с необходимостью решения проблемы отсутствия точных экспериментальных данных о дважды-дифференциальных сечениях реакций из-за влияния заряженных частиц в среднем диапазоне энергий. Соответственно основной задачей остается совершенствование и тестирование вычислительных кодов, основанных на феноменологическом и квантовомеханическом подходах.

Цель работы. Получение новых экспериментальных данных по дважды-дифференциальным, интегральным сечениям реакций с нуклидами водорода и гелия на ядрах ^{27}Al и ^{59}Co , с последующим их теоретическим анализом в рамках экситонной модели ядерного распада.

Задачи исследования. Для достижения цели работы необходимо выполнить следующие задачи:

- обеспечение экспериментальной автоматизированной системы регистрации и идентификации продуктов ядерных реакций и оптимизация программ измерения и анализа экспериментальных данных.
- экспериментальное определение дважды-дифференциальных и интегральных сечений реакций (p,xp) и ($p,x\alpha$) на изотопах ядер ^{27}Al и ^{59}Co , при энергии налетающих протонов $E_p=7$ и 22 МэВ, а также реакций (α,xp) и ($\alpha,x\alpha$) для α -частиц с энергией $E_\alpha=29$ МэВ.
- оптимизация программы TALYS для расчета сечений ядерных реакций; определить вклады различных механизмов ядерных реакций в формировании интегральных спектров (p,xp), ($p,x\alpha$) на ядрах ^{27}Al и ^{59}Co при энергии налетающих протонов $E_p=7$ и 22 МэВ, а также (α,xp) и ($\alpha,x\alpha$) для налетающих α -частиц с энергией $E_\alpha=29$ МэВ.

Объектами исследования были изотопы ядер ^{27}Al и ^{59}Co .

Предмет исследования. Дважды-дифференциальные и интегральные сечения реакций (p,xp) и ($p,x\alpha$) на ядрах ^{27}Al и ^{59}Co , при энергии налетающих протонов $E_p=7$ и 22 МэВ, а также дважды-дифференциальных и интегральных сечений реакций (α,xp) и ($\alpha,x\alpha$) для α -частиц с энергией $E_\alpha=29$ МэВ.

Методология исследования. Регистрация и идентификация вторичных частиц автоматизированной системой многомерного программируемого анализа на выведенных пучках циклотрона У – 150М Института ядерной физики РК. Теоретический анализ результатов эксперимента с использованием расчетных кодов на основе современных теоретических подходов.

Научная новизна.

1. Впервые в угловом диапазоне ($30\div135^\circ$ в л.с.) получены энергетические спектры реакций (p,xp) и ($p,x\alpha$) для протонов с энергиями E_p

= 7 и 22 МэВ, а также реакций (α ,xp) и (α ,x α) для α -частиц с энергией $E_\alpha = 29$ МэВ на ядрах ^{27}Al и ^{59}Co .

2. Впервые в широком энергетическом диапазоне выполнен теоретический анализ экспериментальных данных по дважды-дифференциальным и интегральным сечениям реакций (p,xp) и (p,x α) на ядрах ^{27}Al и ^{59}Co .

3. Впервые проведён анализ экспериментальных данных по дважды-дифференциальным и интегральным сечениям реакций (α ,x α) и (α ,xp) на ядрах ^{27}Al и ^{59}Co при энергии $E_\alpha = 29$ МэВ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Полученный массив новых экспериментальных данных по дважды-дифференциальным и интегральным сечениям реакций (p,xp) и (p,x α) при энергии протонов 7 и 22 МэВ, а также реакций (α ,xp) и (α ,x α) при энергии α -частиц 29 МэВ на изотопах ядер ^{27}Al и ^{59}Co , направленный на пополнение баз ядерных данных для широкого круга прикладных применений.

2. Из экспериментального и теоретического исследования дважды-дифференциальных и интегральных сечений реакции (p,xp) и (p,x α) на ядрах ^{27}Al и ^{59}Co в широком энергетическом диапазоне установлено, что с ростом энергии роль предравновесных процессов в их формирование растет и при энергии 30 МэВ становится определяющей.

3. Из экспериментального и теоретического исследования дважды-дифференциальных и интегральных сечений реакции (α ,x α) и (α ,xp) на ядрах ^{27}Al и ^{59}Co при $E_\alpha = 29$ МэВ установлено, что образование вторичных частиц происходит через равновесные процессы, так как высокая масса и заряд α -частиц ограничивают возможность возникновения сложных предравновесных процессов и внутриядерных каскадов.

Личный вклад автора. В процессе исследований автор принимал непосредственное участие в планировании, подготовке и проведении всех экспериментов, связанных с измерением сечений реакций p, xp), (p, x α) при энергии протона $E_p = 7$ МэВ и 22 МэВ, а также (α ,xp) и (α ,x α) при энергии α -частиц $E_\alpha = 29$ МэВ на ядрах ^{27}Al и ^{59}Co . Автор внес решающий вклад в обработку экспериментальных результатов и их теоретический анализ.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются прежде всего текущей практикой по регистрации и идентификации вторичных частиц автоматизированной системой многомерного программируемого анализа на выведенных пучках циклотрона У – 150М Института ядерной физики РК. Также, публикациями в журналах дальнего зарубежья с ненулевом импакт-факторами и в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, и в трудах международных научных конференций ближнего и дальнего зарубежья.

Апробация диссертационной работы.

Результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались:

- LXVIII международная конференция «NUCLEUS 2018». Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий (2018 г., Россия, Воронеж).
- II международный форум “ЯДЕРНАЯ НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ” (2019 г., Казахстан, Алматы (ИЯФ)).
- LXX международная конференция “NUCLEUS-2020” (2020 г., Россия, Санкт-Петербург).
- III международный форум “ЯДЕРНАЯ НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ” (2021 г., Казахстан, Алматы (ИЯФ)).
- Международная конференция “Современные проблемы ядерной энергетики и ядерных технологий” (2021 г., Узбекистан, Ташкент).

Связь темы с планами научных работ. Диссертационная работа выполнена в рамках грантового проекта Комитета науки АР08955998 «Исследование сечений взаимодействия нуклидов водорода с ядрами конструкционных материалов перспективных электроядерных установок», а также программы целевого финансирования BR09158499 Министерства энергетики Республики Казахстан «Развитие комплексных научных исследований в области ядерной и радиационной физики на основе казахстанских ускорительных комплексов».

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ: одна в журнале, рекомендованном Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан; пять в международных журналах, входящих в базы данных Scopus и Web of Science, шесть в сборниках материалов международных научных конференций.

Публикации в международных научных журналах, входящих в базы данных Scopus / Web of Science.

1. Gusseinova D., **Ussabayeva G.**, Zholdybayev T.K., Boztosun I., Kucuk Y., Koning A.J., Kerimkulov Zh., Sadykov B., Temirzhanov A., Canbula B. New measurements of (p, xp) and ($p, x\alpha$) reactions on ^{27}Al at 7.0, 22.0 and 30.0 MeV // The European Physical Journal A. – 2025. – Vol. 61. – Article ID: 133. <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-025-01603-8>

2. Zholdybayev T.K., Duisebayev B.A., Sadykov B.M., Nassurlla M., **Ussabayeva G.**, Ismailov K.M. Emission of light charged particles from reaction of ^3He ions of energy 50.0 MeV with ^{59}Co nucleus // Acta Physica Polonica B. – 2018. – Vol. 49, No. 3. – P. 693-698. <https://doi.org/10.5506/APhysPolB.49.693>

3. Zholdybayev T.K., Sadykov B.M., Nassurlla M., **Ussabayeva G.**, Duisebayev B.A., Ismailov K.M., Dyachkov V.V., Saduyev N.O. Inclusive spectra of protons and α particles from the interaction between α particles with an energy of 29 MeV and ^{27}Al and ^{59}Co nuclei // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2019. – Vol. 83, No. 9. – P. 1183-1186. <https://doi.org/10.3103/S1062873819090326>

4. **Ussabayeva G.A.**, Zholdybayev T.K., Sadykov B.M., Duisebayev B.A., Nassurlla M., Kerimkulov J.K., Ismailov K.M., Temirzhanov A.A. Proton and α -particles emission from the interaction of 22 MeV energy protons with ^{59}Co

nucleus // Acta Physica Polonica B. Proceedings Supplement. – 2023. – Vol. 16, Issue 2. – A13. <https://doi.org/10.5506/APhysPolBSupp.16.2-A13>

5. Zholdybayev T.K., **Ussabayeva G.A.**, Temirzhanov A.A., Mukan Zh.T., Sadykov B.M., Duisebayev B.A. Proton emission from the interaction of 7 MeV energy protons with ^{59}Co nucleus // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2642, Issue 1. – 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2642/1/012001>

Публикации в изданиях, рекомендованных КОКСНВО МНВО РК:

1. **Усабаева Г.**, Жолдыбаев Т.К., Садыков Б.М., Дуйсебаев Б.А., Насурлла М. Инклузивные спектры протонов из взаимодействия альфа-частиц с энергией 29 МэВ с ядрами ^{27}Al и ^{59}Co // Recent Contributions to Physics. – 2018. – Т. 65, № 2. – С. 33-41.

Публикации в сборниках тезисов международных научных конференций.

1. Duisebayev B.A., Zholdybayev T.K., Sadykov B.M., **Ussabayeva G.**, Nassurlla M., Ismailov K.M., Dyachkov V.V. The inclusive cross sections for the formation of p, d, α from the interaction of α -particles of 29 MeV energy with nuclei ^{27}Al and ^{59}Co // LXVIII International conference «NUCLEUS 2018». Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies. Russia, Voronezh, July 2-6, 2018. – P. 117.

2. Duisebayev B.A., Zholdybayev T.K., Sadykov B.M., Nassurlla M., Ismailov K.M., **Ussabayeva G.**, Boztosun I. Measurement of the (p,xp) reaction cross-section for proton energies of 7 MeV on the middle nuclei // LXVIII international conference «NUCLEUS 2018». Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies. Russia, Voronezh, July 2-6, 2018. – P. 112.

3. **Усабаева Г.**, Жолдыбаев Т.К., Садыков Б.М. Исследование вторичной эмиссии легких заряженных частиц при взаимодействии ионов ^3He с ядрами ^{27}Al , ^{59}Co , ^{112}Sn при энергии 50 МэВ // II Международный Форум «ЯДЕРНАЯ НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ». Казахстан, Алматы, 24-27 июня, 2019. – С. 38.

4. Alimov D., **Ussabayeva G.**, Kerimkulov J.K., Nassurlla M., Pan A., Sadykov B.M., Zholdybayev T.K. Investigation of inclusive spectra of light charged particles emitted from (p,x) reaction with ^{27}Al nucleus // LXX International conference «NUCLEUS 2020». NUCLEAR PHYSICS AND ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS. NUCLEAR PHYSICS TECHNOLOGIES. Russia, Saint-Peterburg, October 12-17, 2020. – P. 234.

5. **Ussabayeva G.**, Zholdybayev T.K., Sadykov B.M. Investigation of continues energy spectra of light charged particles from interaction of ^3He ions with ^{27}Al wide energy range // III Международный Форум «ЯДЕРНАЯ НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ». Казахстан, Алматы, 20-24 сентября, 2021. – С. 25.

6. **Ussabayeva G.**, Sadykov B.M., Zholdybayeva S, Zholdybayev T.K. Light charged particles production from interaction of ^3He ions with ^{27}Al wide energy range // Modern problems of nuclear energetics and nuclear technologies. Uzbekistan, Tashkent, November 23-25, 2021. – P. 44.