



МРНТИ 29.15.19, 29.03.47

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-151-2-192-206>

Научная статья

Методика измерения альфа-спектров реакции $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ на быстрых нейтронах при помощи ионизационной камеры

И.А. Чупраков^{1,2*}, Ю.М. Гледенов², Э. Сансарбаяр^{2,3}, А.К. Бекбаев^{1,2,4},
Б. Мухаметулы^{1,2,4}, Е.С. Коршиков⁴, Н.Т. Темербулатова^{1,2}

¹РГП «Институт ядерной физики», Алматы, Казахстан

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

³Национальный университет Монголии, Улан-Батор, Монголия

⁴Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

(E-mail: *nitro-chupa@mail.ru)

Аннотация. В данной работе представлена экспериментальная методика измерения одномерных и двумерных спектров альфа-частиц реакции $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ с использованием двухсекционной ионизационной камеры с сеткой на быстрых нейтронах. Актуальность исследования обусловлена растущим интересом к ядерным реакциям с участием нейтронов в контексте развития новых ядерных технологий, радиационной безопасности и астрофизических исследований. В частности, реакция $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ играет важную роль в процессах нуклеосинтеза в звездах и при расчетах радиационной защиты ядерных установок. Экспериментальные исследования проведены на ускорителе Ван де Граафа ЭГ-5 (ЛНФ ОИЯИ, Дубна) с использованием квазимоноэнергетических нейтронов, генерируемых в реакции $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$. В качестве мишеней применялись тонкие образцы аденина. Для контроля нейтронного потока использовались два детектора на основе высокообогащенного $^{238}\text{U}_3\text{O}_8$, расположенные непосредственно в рабочем объеме камеры. Проведено моделирование эксперимента, которое позволило учесть все основные факторы, влияющие на форму спектров, подбору оптимальных рабочих условий и тем самым повысить достоверность полученных результатов. Экспериментальные спектры сопоставлены с результатами моделирования, выполненного в среде MATLAB с учетом реальной геометрии установки. Полученные результаты представляют интерес для ядерной физики и прикладных исследований, связанных с взаимодействием быстрых нейтронов с азотсодержащими соединениями.

Ключевые слова: быстрые нейтроны; спектры альфа частиц; детектор; ядерные реакции с нейтронами; сечения реакции.

Поступила 30.04.2025. После доработки 30.05.2025. Принята к печати 02.06.2025. Доступно онлайн 25.06.2025.

¹ *автор для корреспонденции

Введение

Актуальность исследования реакций с испусканием заряженных частиц при помощи быстрых нейтронов представляет большой интерес как для прикладных задач (например, в проектировании и оценке повреждений энергетических установок), так и для фундаментальной ядерной физики, понимания протекания астрофизических процессов, моделирования ядерных процессов [1-3]. Особую сложность представляет описание реакций с участием заряженных частиц, таких, как (n, α) и (n, p) . Для проверки и улучшения различных теоретических моделей необходимо большое количество данных, полученных экспериментальным путем.

Однако на сегодняшний день данные о полных сечениях, энергетических спектрах заряженных частиц и их угловых распределениях в области энергии нейтронов от 1-10 МэВ и интересующих ядер очень мало. Согласно современным данным [4-13], большинство исследований (n, α) -реакций в диапазоне энергий нейтронов $\sim 1-10$ МэВ проводилось методом активационного анализа, который не позволяет измерить энергетические спектры и угловые распределения испускаемых частиц. Между тем именно эти данные критически важны для оценки радиационного повреждения конструкционных материалов реакторов, связанного с накоплением гелия и водорода.

Современные реакторы в настоящее время работают на оксидном топливе, однако рассматривается переход на более безопасное и экономичное топливо для реакторов IV поколения [14,15]. Одним из таких перспективных топлив являются нитриды, обладающие лучшей теплопроводностью по сравнению с оксидами, а также высокой температурой плавления, что повышает их устойчивость в процессе эксплуатации. Поскольку в активной зоне реактора может содержаться значительное количество азота, особенно важным становится уточнение параметров для реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)$. Существующие экспериментальные данные по сечениям ключевых реакций накопления гелия ($^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$) и водорода ($^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$) показывают существенные расхождения. В рамках данной работы мы исследуем первую из них. В предыдущих исследованиях [16] изучалась реакция $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ в интервале энергий нейтронов от 1,3 до 8,0 МэВ. Точность полученных значений сечения реакции, согласно указанным работам, находится в пределах 20-40%. В данной работе ставится задача проведения измерений энергетических спектров (как одномерных, так и двумерных) с применением двухсекционной ионизационной камеры сеточного типа.

Методология

Детали эксперимента

На рисунке 1 представлена схематично экспериментальная установка, которая расположена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединённого института ядерных исследований. Она включает в себя три ключевые части: источник квази-моноэнергетических нейтронов, детектор заряженных частицы, в частности α -частиц, с размещёнными образцами, а также монитор, предназначенный для счета быстрых нейтронов.

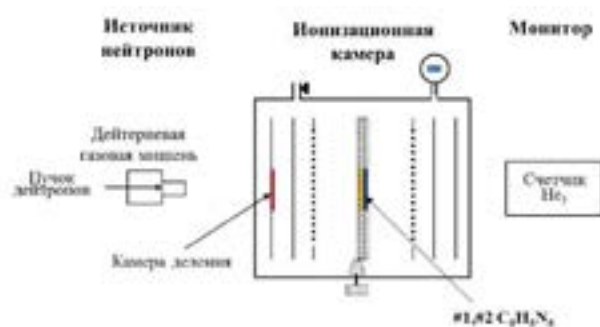


Рисунок 1. Схематический чертеж экспериментальной установки.

Источник нейтронов

Квазимоноэнергетические нейтроны генерировались в результате реакции $2\text{H}(\text{d}, \text{n})3\text{He}$, происходящей в дейтериевой газовой мишени. Газовая нейтрон-производящая мишень представляет собой цилиндр длиной 2,0 см. Между вакуумным каналом ускорителя ЭГ-5 и цилиндром установлена разделительная тонкая молибденовая фольга толщиной 6 мкм. Давление в нейтрон-производящей мишени 2,5 атм., а ток падающего дейтериевого пучка, направленного на фольгу, составлял 2,5-3,0 мкА. Поток нейтронов, получаемых в этих условиях, составлял порядка $6,5 \times 10^5$ нейтронов/см²*с.

Детектор заряженных частиц

Для регистрации заряженных частиц в эксперименте используется двухсекционная ионизационная камера с сеткой и общим катодом, которая использовалась в работах [17-19]. Внутреннее устройство детектора, включая катод с размещёнными образцами, представлено на рисунке 2. Камера выполнена в цилиндрическом корпусе из нержавеющей стали и оснащена пятью сигнальными и пятью высоковольтными вакуумными разъёмами. Также предусмотрен механизм, позволяющий заменять образцы внутри камеры без нарушения её герметичности. Конструкция катода рассчитана на размещение до пяти пар образцов, которые можно оперативно заменять в ходе измерений. Это обеспечивает проведение экспериментов в строго одинаковых условиях для всех образцов. Основным рабочим газом в камере служит криптон, с добавлением примерно 3% метана (CH_4) для улучшения характеристик газа. Одним из главных преимуществ данной версии спектрометра является возможность быстрой смены мишеней без вскрытия камеры и изменения её рабочих параметров. Такой подход позволяет рационально использовать время пучка и эффективно расходовать дорогостоящие рабочие газы, такие, как Kr, Xe и CF_4 . Внутренний вид камеры без кожуха показан на рисунке 2.

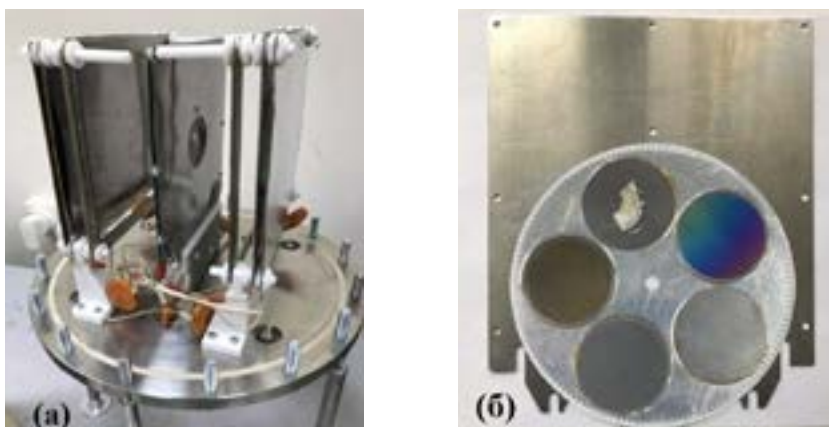


Рисунок 2. (а) Двухсекционная ионизационная камера с сеткой, смонтированная на днище при снятом корпусе и (б) строение катода с установленными образцами.

Мониторы нейтронного потока и измерения абсолютного нейтронного потока.

Для измерения абсолютного нейтронного потока на каждой энергии нейтронов проводились отдельные эксперименты с использованием реакции $^{238}\text{U}(n,f)$. Образец урана с содержанием ^{238}U не менее 99,999% устанавливался точно в том же месте и имел такие же размеры, как и исследуемые образцы, что обеспечивало идентичные условия облучения. Одновременно с этим проводилась калибровка камеры деления и длинного счётчика на основе ^3He , которые применялись для мониторинга нейтронного потока в процессе эксперимента. Оба метода показали очень близкие и согласующиеся между собой результаты, что подтверждает надёжность измерений.

Образцы

Конструкция катода позволяет размещать 5 образцов с одной стороны и 5 – с другой. Исследуемые образцы аденина ($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5$) были расположены на обеих сторонах диска. Параметры каждой мишени из аденина и схема компоновки катода приведены в таблице 1. Для измерения потока нейтронов в позиции исследуемого образца размещался эталонный образец ^{238}U с обогащением 99,999%. Для измерения фона использовалась подложка из тантала (Ta). Исследуемое вещество аденин было нанесено на идентичную танталовую подложку методом напыления.

Таблица 1. Информация о прямых и обратных мишенях на устройстве смены образцов

Мишень	Вперед	Назад	Назначение
1	α - источник (^{234}U , 4.77 MeV; ^{238}U , 4.20 MeV)	α - источник (^{234}U , 4.77 MeV; ^{238}U , 4.20 MeV)	Калибровка энергии, определение линии 90°
2	$\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5$ 44мм. диаметр, 144,7 мг/см ²	$\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5$ 44 мм. диаметр, 154,6 мг/см ²	Измерение вперед
3	Тантал 0.1 мм, 48 мм. диаметр	Тантал 0.1 мм, 48 мм. диаметр	Фоновые измерения

4	^{238}U 308 99.999%, 44 мм. диаметр , NU=1.74E19	Тантал 0.1 mm, 48 мм. диаметр	Определение нейтронно- го потока
---	--	----------------------------------	-------------------------------------

Электроника α спектрометра

Сигналы, поступающие с катода и анодов ионизационной камеры, усиливались и оцифровывались с помощью специализированных оцифровщиков формы импульсов. В эксперименте использовалась система сбора, накопления и обработки данных на базе платформы PXI, оснащённая оцифровщиком PXIE-4. Система PXI включала в себя шасси NI PXI-1031 с установленным контроллером NI PXI-8820, а также высокоскоростной оцифровщик PXIE-4, разработанный компанией XIA [20]. Блок-схема используемой электронной аппаратуры представлена на рисунке 3.

В процессе работы два сигнала с анодов и один – с общего катода после прохождения через зарядочувствительные предусилители и быстрые усилители подавались на три канала оцифровщика. Четвёртый канал предназначался для подключения счётчика нейтронов, применяемого при измерениях нейтронного потока.

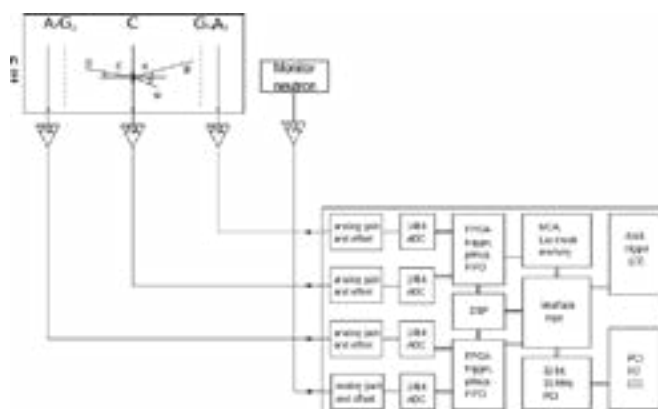


Рисунок 3. Функциональная блок-схема сбора и обработки сигналов Pixie-4

Симуляция измерений альфа-спектров реакции $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$

Перед началом нашего эксперимента мы провели детальные предварительные расчёты, чтобы предсказать ожидаемые спектры. Для этого использовали программное обеспечение, разработанное на платформе Matlab, а также информацию о сечениях, угловых и энергетических распределениях, полученную из пакета Talys 1.9.[21]. Геометрия установки была точно воспроизведена по схеме, изображённой на рисунке 6. В качестве исследуемого образца мы выбрали аденин с толщиной 100 и 200 мкг/см², что позволило исследовать влияние массы образца на результаты. В эксперименте использовались газовые смеси, такие, как Kr+3% CO₂, 5% водорода (H₂) и ксенон с 5% водорода. Кроме того, мы рассмотрели смесь Kr+5% N₂ для экспериментов с газообразным образцом. Энергетический диапазон нейтронов от 4,0 до 6,0 МэВ был выбран для исследования реакции, характерных для данного интервала энергий.

На рисунке 4 представлены расчетные одномерные спектры α частиц из реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ для энергии нейтронов $E_n = 5$ МэВ. В ходе расчетов установлены ожидаемые положения событий от $^{14}\text{N}(n, \alpha)$ реакции, а также потенциальные фоновые процессы, которые могут затруднить анализ экспериментальных результатов. Также на рисунке 4 показано влияние фоновых реакций. Рисунки 5 и 6 предоставляют более подробную информацию о рассчитанных двумерных катодно-анодных спектрах. На рисунке 5 показаны результаты для направления "вперед" как с учётом фоновых реакций, так и без них. Рисунок 6 демонстрирует аналогичные данные для направления "назад". Полученные результаты подчеркивают важность предварительного моделирования для успешного проведения экспериментов и их последующей интерпретации. Проведённые расчёты служат основой для дальнейших исследований и анализа данных.

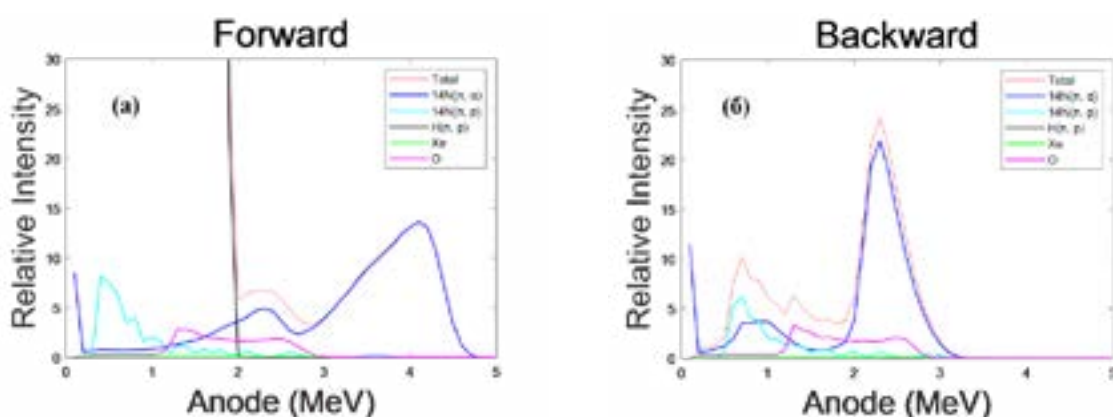


Рисунок 4. (а) Одномерный расчетный спектр α частиц из реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ в направлении «вперед» и (б) в направлении «назад» при $E_n = 5,0$ МэВ.

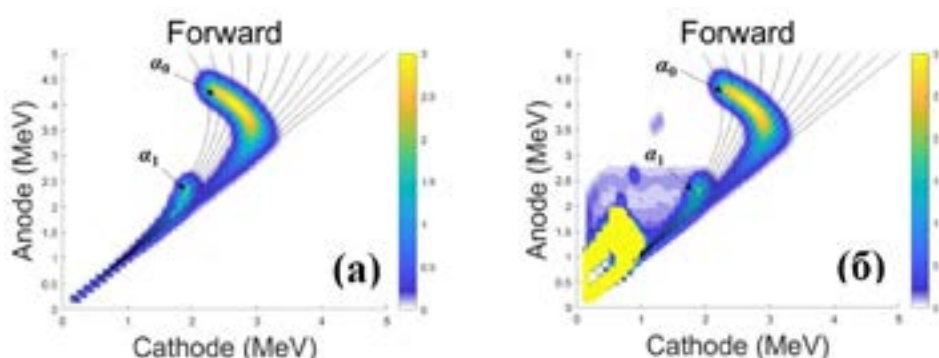


Рисунок 5. Двумерный расчетный спектр α частиц из реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ при $E_n = 5,0$ МэВ, направление «вперед» (а); (б) с добавлением вклада фоновых реакций.

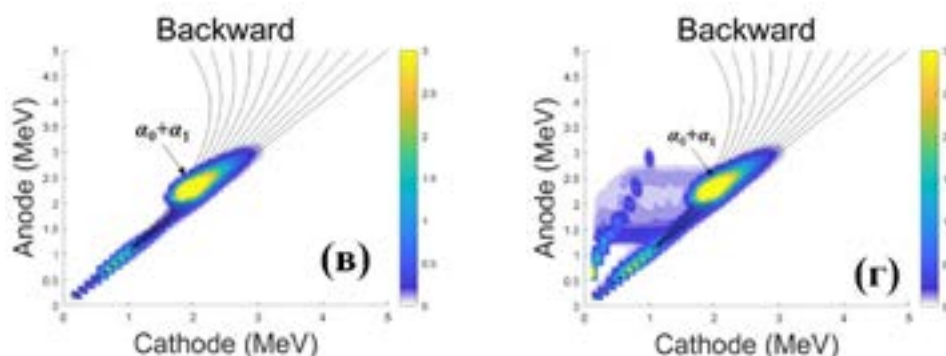


Рисунок 6. Двумерный расчетный спектр α частиц из реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ при $E_n = 5,0$ МэВ, (в) направление «назад»; (г) с добавлением вклада фоновых реакций.

Измерение альфа-спектров реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$

Методика измерения и обработки экспериментальных данных может быть продемонстрирована на примере измерений реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ проведенных при энергиях нейтронов: 4,5; 5,0; 5,25 и 5,3 МэВ. Схема эксперимента показана на рисунке 1. В качестве рабочего газа использовалась готовая смесь $\text{Kr} + 3\%\text{CH}_4$ при давлении 0,7 атм. Катод ИК содержит диск с пятью позициями для образцов, которые устанавливались подложками друг к другу в каждую из них. Все образцы диаметром 44 мм нанесены на танталовую подложку толщиной 0,1 мм и диаметром 48 мм. В трех из пяти позиций установлены 2 пиковый α источник, образцы аденина ($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5$, толщиной 196 и 195 мкг/см²) и Та подложки, в четвертой образец ^{238}U (содержание более 99,999%, $\text{NU}=2,064 \cdot 10^{19}$).

Для каждой энергии выполнено 5 серий измерений:

- 1) Калибровка аппаратуры с использованием 2 пикового α источника (рисунок 9) - 20 мин. Первая линия с энергией 4,22 МэВ принадлежит α - частицам ^{238}U , а вторая линия с энергией 4,77 МэВ α - частицам ^{234}U , соответственно.
- 2) Измерение с ^{14}N образцом – 2 часа;
- 3) Измерение фона (Та подложка) – 3 часа;
- 4) Измерение с образцом ^{238}U – 1 час;
- 5) Повторное измерение с α источником для проверки стабильности аппаратуры.

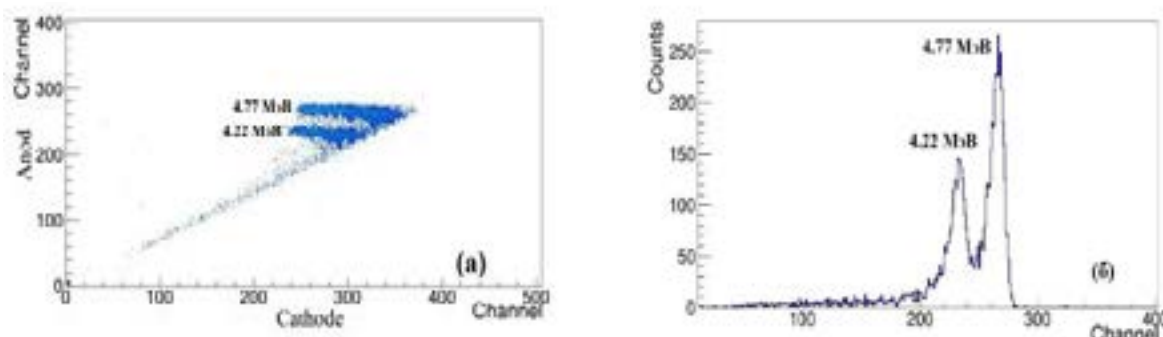


Рисунок 7. (а) измеренный двумерный анод-катод спектр и (б) линейный спектр от компанд α – источника natU.

Сигналы от осколков деления камеры деления подавались в систему сбора данных при измерении переднего плана, фона и реакции $^{238}\text{U}(n, f)$. Во всех измерениях длинный счетчик ^3He также использовался в качестве монитора потока нейтронов. Анализ данных показал, что результаты контроля нейтронного пучка с помощью длинного счетчика и камеры деления весьма близки.

Результаты

На рисунке 8 представлены измеренные экспериментальные анод-катод двумерные спектры из реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ без вычитания фона (а) в направлении «вперед» и в направлении «назад» (б), а на рисунке 9 - двумерные спектры за вычетом фона. На рисунке 10 приведены анодные спектры при $E_n = 5,3$ МэВ. Из рисунка 8 видно, что значительный вклад в альфа-спектр вносят фоновые реакции от рабочего газа (протоны отдачи от добавки метана) и от твердого образца аденина. С использованием обычно применяемых смесей рабочих газов на основе аргона, криптона, метана... часто не удается в эксперименте выделить искомые события из исследуемой реакции из-за перекрытия спектров продуктами реакций на рабочем газе, являющимися в нашем случае дополнительным фоном. В направлении «вперед» удалось успешно разделить искомые события от фоновых, в отличие от направления «назад», где это оказалось более сложной задачей. Так, в направлении «назад» полученные спектры хорошо согласуются с расчетными, что показывает влияние кинематического эффекта для легких ядер. Отдельные измерения фона существенно помогли выделить искомые события, а моделирование повысило точность и надёжность полученных результатов.

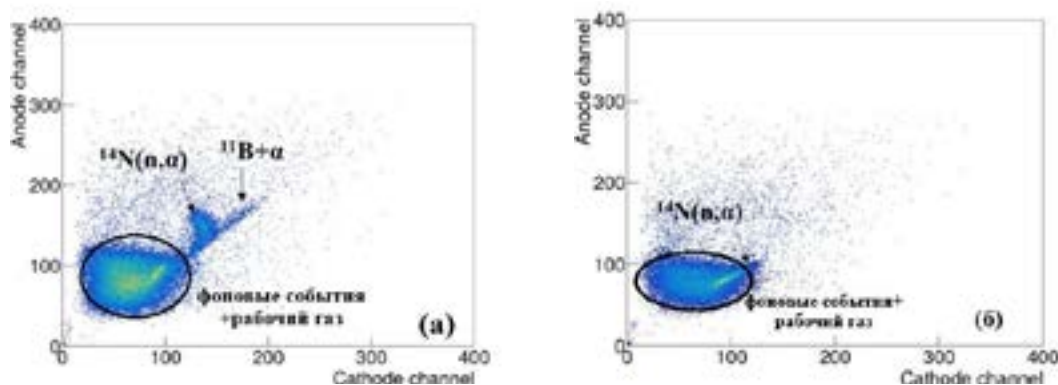


Рисунок 8. Анод-катод двумерные спектры из реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ без вычитания фона (а) в направлении «вперед» и (б) в направлении «назад» при $E_n = 5,3$ МэВ.

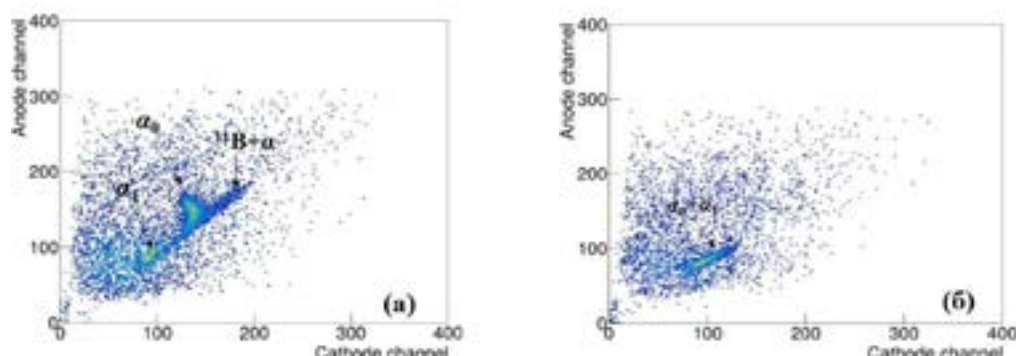


Рисунок 9. Анод-катод двумерный спектр из реакции $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ за вычетом фона при $E_n = 5,3$ МэВ (а) в направлении «вперед» и (б) в направлении «назад».

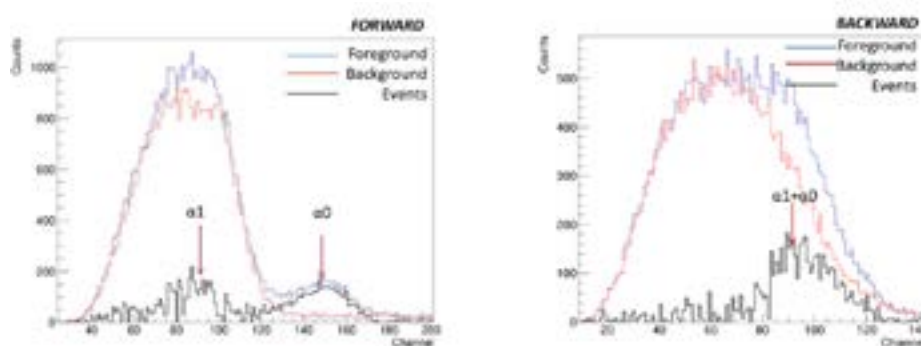


Рисунок 10. Анодный спектр реакции $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ при $E_n = 5,3$ МэВ.

Заключение

В ходе эксперимента были проведены измерения реакции $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ в диапазоне энергий нейтронов 4,5–5,3 МэВ с использованием тонких твёрдых образцов аденина. В качестве рабочего газа применялась готовая смесь Kr с 3%CH₄. В эксперименте надёжно зарегистрированы α_0 -переходы, а также получены указания на возможное наличие α_1 -переходов. Точность определения интенсивности нейтронного потока составила 2–3%. Экспериментальные спектры хорошо согласуются с результатами моделирования в Matlab, что подтверждает корректность методики измерений. Однако для более точного анализа требуется дополнительное исследование с газообразным образцом, обеспечивающим чёткое разделение α -переходов. Используемая система детектирования позволяет регистрировать спектры α -частиц для переходов на различные уровни дочернего ядра, а также анализировать угловое распределение продуктов реакции. Это открывает перспективу для точного определения сечений реакций с быстрыми нейтронами, что важно для дальнейших исследований в области ядерной физики.

Благодарность, конфликт интересов

Работа выполнена в рамках проекта (грант №BR21881930) при поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Вклад авторов

Чупраков И.А. – существенный вклад в концепцию и дизайн работы; анализ и интерпретация результатов работы, а также написание основного текста научной статьи;

Гледенов Ю.М. – руководство по исследованию, утверждение окончательного варианта статьи для публикации;

Энхболд С. – анализ и интерпретация результатов работы, написание текста;

Бекбаев А.К. – теоретические расчеты и анализ результатов работы;

Мухаметулы Б. – участие в эксперименте, выполнение задач по сбору данных, их предварительная обработка и анализ;

Коршиков Е.С. – проведение эксперимента, подготовка экспериментального оборудования и запуск системы сбора данных, организация и контроль сбора данных во время всего эксперимента.

Темербулатова Н.Т. – подготовка и изготовления исследуемых образцов.

Список литературы

1. Yu.M. Gledenov, M. Sedysheva, G. Zhang et al. *Investigation of (n,α) Reaction for Rare-Earth Elements in the MeV Neutron Energy Region*, Journal of the Korean physical society 59(2), p.1693–1696(2011). DOI: <https://doi.org/10.3938/jkps.59.1693>
2. U. Kannan, *Perspectives on nuclear data for advanced reactor design and analysis*, Life Cycle Reliab Saf Eng 9, p.135–146(2020). DOI: <https://doi.org/10.1007/s41872-020-00120-5>
3. F. Käppeler, R. Gallino, S. Bisterzo, W. Aoki, *The s Process: Nuclear Physics, Stellar Models, and Observations*, Reviews of Modern Physics, 83(1), p.157–193(2011). DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.83.157>
4. EXFOR. *Experimental Nuclear Reaction Data*, <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>. (дата обращения: 20.01.2025)
5. *Evaluated Nuclear Data File ENDF/B-VIII.0*, <http://www-nds.iaea.org/exfor/endl.html>. (дата обращения: 15.01.2025)
6. D.A. Brown, M.B. Chadwick, R. Capote et al., *ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data*, Nucl. Data Sheets 148, p.114–124(2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2018.02.001>
7. M.B. Chadwick, M. Herman, P. Obložinský et al., *ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data*, Nucl. Data Sheets, 112(12), p.2887–2996(2011). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>
8. JEFF-3.3. <https://www.oecd-neo.org/dbdata/jeff/jeff33/index.html#neutrons> (дата обращения: 20.01.2025).
9. Y.L. Yan, J.S. Zhang, J.F. Duan. *The database of nuclear physics*. <http://www.nuclear.csdb.cn/pingjia.html> (дата обращения: 15.01.2025)
10. ADS-2.0. <https://wwwnds.iaea.org/exfor/servlet/E4sGetTabSect?SectID=14236409&req=2833&PenSectID=19357937&json> (дата обращения: 20.01.2025).

11. A.J. Koning, D. Rochman, J. Ch. Sublet et al. *TENDL: Complete Nuclear Data Library for Innovative Nuclear Science and Technology*, Nucl. Data Sheets, 155, p.1–55(2019)0. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2019.01.002>
12. O. Iwamoto, N. Iwamoto, K. Shibata, et al. *Status of JENDL*, EPJ Web of Conferences 2020. DOI: <https://www-nds.iaea.org/exfor/servlet/E4sGetTabSect?SectID=14620406&req=2833&PenSectID=19396258>.
13. H.D. Lemmel, P.K. McLaughlin, BROND-2.2. *Russian evaluated neutron reaction data library. Summary documentation* (International Atomic Energy Agency, Vienna, 1994) (дата обращения: 15.01.2025).
- 14 C. Ekberg, D.R. Costa, M. Hedberg et al., *Nitride fuel for Gen IV nuclear power systems*, J. Radioanal. Nucl.
15. R.D. Syarifah, Z. Su'ud, K. Basar et al., *Comparison of uranium plutonium nitride (U-Pu-N) and thorium nitride (Th-N) fuel for 500 MWth gas-cooled fast reactor (GFR) long life without refueling*, Int. J. Energy Res., 42(1) (2018). DOI: <https://doi.org/10.1002/er.3923>
16. V.A. Khryachkov, I.P. Bondarenko, B.D. Kuzminov et al. *(n,α) reactions cross section research at IPPE*, EPJ Web of Conferences, 21 (2012). DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20122103005>
17. G. Zhang, Yu. M. Gledenov, G. Khuukhenkhuu, M. V Sedysheva, P. J. Szalanski, J. Liu, H. Wu, X. Liu, J. Chen, and V. A. Stolupin, Cross sections of the $^{67}\text{Zn}(n,\alpha)^{64}\text{Ni}$ reaction at 4.0, 5.0, and 6.0 MeV, Phys. Rev. C, 82, p.054619(2010). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.82.054619>
18. E. Sansarbayer, Yu. M. Gledenov, I. Chuprakov, G. Khuukhenkhuu, G. S. Ahmadov, L. Krupa, G. Zhang, J. Haoyu, Z. Cui, Y.Hu, J. Liu, N. Battsooj, I. Wilhelm, M. Solar, R. Sykora, and Z. Kohout Cross sections for the $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{32}\text{P}$ reaction in the 3.3–5.3 MeV neutron energy region, Phys. Rev. C, 104, p.044620(2021). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.104.044620>
19. G.Zhang, E. Sansarbayer, Yu. M. Gledenov, G. Khuukhenkhuu, L. Krupa, Gustova N. S., Voronyuk M. G., Chuprakov I., Battsooj N., et.al, Cross sections of the $^{91}\text{Zr}(n,\alpha)^{88}\text{Sr}$ reaction in the 3.9–5.3 MeV neutron energy region, Phys. Rev. C, 106, p.064602(2022). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.106.064602>
20. https://www.xia.com/dfg_products.html (дата обращения: 15.01.2025) -
21. J. Koning, S. Hilaire, and S. Goriely, TALYS-1.9 (2017), <http://www.TALYS.eu>. (дата обращения: 15.01.2025).

И.А. Чупраков^{1,2*}, Ю.М. Гледенов², Э. Сансарбаяр^{2,3}, А.К. Бекбаев^{1,2,4},

Б. Мұхаметұлы^{1,2,4}, Е.С. Коршиков⁴, Н.Т. Темербулатова^{1,2}

¹РГП Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

²Біріккен ядролық зерттеулер институты, Дубна, Ресей

³Моңғолия ұлттық университеті, Ұлан-Батор, Моңғолия

⁴Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

(E-mail: nitro-chupa@mail.ru)

Иондау камерасы арқылы жылдам нейтрондарда $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ реакциясының альфа-спектрлерін өлшеу әдістемесі

Аңдатпа. Бұл жұмыста жедел нейтрондарды қолданып, торлы қос бөлікті иондалу камерасы арқылы $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ реакциясынан туындайтын альфа-бөлшектердің бір өлшемді және екі

өлшемді спектрлерін өлшеу әдістемесі ұсынылған. Зерттеудің өзектілігі нейтрондар қатысатын ядролық реакцияларға қызығушылықтың артуымен, жаңа ядролық технологиялардың дамуы, радиациялық қауіпсіздік және астрофизикалық зерттеулер контекстінде байланысты. Тәжірибелік зерттеулер Дубнадағы БҰҒЗИ БНФЗ-да орналасқан ЭГ-5 Ван де Грааф үдеткішінде $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$ реакциясы арқылы алынған жартылай моноэнергетикалық нейтрондарды пайдаланып жүргізілді. Нысан ретінде жұқа аденин үлгілері қолданылды. Нейтрон ағынын бақылау үшін камераның жұмыс көлеміне орналастырылған жоғары байытылған $^{238}\text{U}_3\text{O}_8$ негізіндегі екі детектор пайдаланылды. Эксперименттің модельдеуі жүргізілді, бұл спектрлердің формасына әсер ететін барлық негізгі факторларды ескеруге, оңтайлы жұмыс шарттарын таңдауға мүмкіндік берді және осылайша алынған нәтижелердің нақтылығын арттырды. Эксперименттік спектрлер MATLAB ортасында қондырғының нақты геометриясын есепке ала отырып алынған модельдеу нәтижелерімен салыстырылды. Алынған нәтижелер ядролық физикаға және азот қосылыстарымен жедел нейтрондардың өзара әрекеттесуіне байланысты қолданбалы зерттеулер үшін қызығушылық тудырады.

Түйін сөздер: жылдам нейтрондар, альфа бөлшектерінің спектрлері, детектор, нейтрондармен ядролық реакциялар, реакция қималары.

I.A. Chuprakov^{1,2*}, Yu.M. Gledenov², E. Sansarbayar^{2,3}, A.K. Bekbayev^{1,2,4},
B. Mukhametuly^{1,2,4}, E.S. Korshikov⁴, N.T. Temerbulatova^{1,2}

¹*Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan*

²*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

³*National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia*

⁴*Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

(E-mail: nitro-chupa@mail.ru)

Method of measuring alpha spectra of the reaction $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ on fast neutrons using an ionization chamber

Abstract. This work presents an experimental method for measuring one-dimensional and two-dimensional spectra of alpha particles from the $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ reaction using a two-section gridded ionization chamber with fast neutrons. The relevance of the research stems from the growing interest in nuclear reactions involving neutrons in the context of the development of new nuclear technologies, radiation safety, and astrophysical studies. In particular, the $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ reaction plays an important role in nucleosynthesis processes in stars and radiation shielding calculations for nuclear facilities. Experimental studies were conducted on the EG-5 Van de Graaff accelerator (FLNP JINR, Dubna) using quasi-monoenergetic neutrons generated in the $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$ reaction. Thin adenine samples were used as targets. Two detectors based on highly enriched $^{238}\text{U}_3\text{O}_8$ were used to control the neutron flux, located directly in the chamber's working volume. A simulation of the experiment was carried out, which made it possible to take into account all the main factors affecting the shape of the spectra, to select optimal operating conditions, and thereby increase the reliability of the results. Experimental spectra are compared with the results of modeling performed in the MATLAB environment, taking into account the

real geometry of the setup. The results obtained are of interest for nuclear physics and applied research related to the interaction of fast neutrons with nitrogen-containing compounds.

Key words: fast neutrons, alpha particle spectra, detector, nuclear reactions with neutrons, reaction cross-sections.

References

1. Yu.M. Gledenov, M. Sedysheva, G. Zhang et al. *Investigation of (n, α) Reaction for Rare-Earth Elements in the MeV Neutron Energy Region*, Journal of the Korean physical society 59(2), p.1693–1696(2011). DOI: <https://doi.org/10.3938/jkps.59.1693>
2. U. Kannan, *Perspectives on nuclear data for advanced reactor design and analysis, Life Cycle Reliab Saf Eng* 9, p.135–146(2020). DOI: <https://doi.org/10.1007/s41872-020-00120-5>
3. F. Käppeler, R. Gallino, S. Bisterzo, W. Aoki, *The s Process: Nuclear Physics, Stellar Models, and Observations*, Reviews of Modern Physics, 83(1), p.157–193(2011). DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.83.157>
4. EXFOR. Experimental Nuclear Reaction Data, <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm> [cited 2025 20 January]
5. *Evaluated Nuclear Data File ENDF/B-VIII.0*, <http://www-nds.iaea.org/exfor/endl.html> [cited 2025 15 January]
6. D.A. Brown, M.B. Chadwick, R. Capote et al., ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data, Nucl. Data Sheets 148, p.114–124(2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2018.02.001>
7. M.B. Chadwick, M. Herman, P. Obložinský et al., *ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data*, Nucl. Data Sheets, 112(12), p.2887–2996(2011). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>
8. JEFF-3.3., <https://www.oecd-neo.org/dbdata/jeff/jeff33/index.html#neutrons> [cited 2025 20 January]
9. Y.L. Yan, J.S. Zhang, J.F. Duan. *The database of nuclear physics*. <http://www.nuclear.csdb.cn/pingjia.html>.
10. ADS-2.0, <https://wwwnds.iaea.org/exfor/servlet/E4sGetTabSect?SectID=14236409&req=2833&PenSectID=19357937&json> [cited 2025 20 January]
11. A.J. Koning, D. Rochman, J. Ch. Sublet et al. *TENDL: Complete Nuclear Data Library for Innovative Nuclear Science and Technology*, Nucl. Data Sheets, 155, p.1–55(2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2019.01.002>.
12. O. Iwamoto, N. Iwamoto, K. Shibata, et al. *Status of JENDL*, EPJ Web of Conferences 2020. DOI: <https://www-nds.iaea.org/exfor/servlet/E4sGetTabSect?SectID=14620406&req=2833&PenSectID=19396258>.
13. H.D. Lemmel, P.K. McLaughlin, BROND-2.2. *Russian evaluated neutron reaction data library. Summary documentation* (International Atomic Energy Agency, Vienna, 1994)
14. C. Ekberg, D.R. Costa, M. Hedberg et al., *Nitride fuel for Gen IV nuclear power systems*, J. Radioanal. Nucl. Chem, 318(3) (2018). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6316-0>
15. R.D. Syarifah, Z. Su'ud, K. Basar et al., *Comparison of uranium plutonium nitride (U-Pu-N) and thorium nitride (Th-N) fuel for 500 MWth gas-cooled fast reactor (GFR) long life without refueling*, Int. J. Energy Res., 42(1) (2018). DOI: <https://doi.org/10.1002/er.3923>

16. V.A. Khryachkov, I.P. Bondarenko, B.D. Kuzminov et al. *(n,α) reactions cross section research at IPPE, EPJ Web of Conferences 21(2012)*. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20122103005>
17. G. Zhang, Yu. M. Gledenov, G. Khuukhenkhuu, M. V Sedysheva, P. J. Szalanski, J. Liu, H. Wu, X. Liu, J. Chen, and V. A. Stolupin, Cross sections of the $^{67}\text{Zn}(n, \alpha)^{64}\text{Ni}$ reaction at 4.0, 5.0, and 6.0 MeV, *Phys. Rev. C*, 82, p.054619(2010). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.82.054619>
18. E. Sansarbayer, Yu. M. Gledenov, I. Chuprakov, G. Khuukhenkhuu, G. S. Ahmadov, L. Krupa, G. Zhang, J. Haoyu, Z. Cui, Y. Hu, J. Liu, N. Battsooj, I. Wilhelm, M. Solar, R. Sykora, and Z. Kohout Cross sections for the $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{32}\text{P}$ reaction in the 3.3–5.3 MeV neutron energy region, *Phys. Rev. C*, 104, p.044620(2021). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.104.044620>
19. G. Zhang, E. Sansarbayer, Yu. M. Gledenov, G. Khuukhenkhuu, L. Krupa, Gustova N. S., Voronyuk M. G., Chuprakov I., Battsooj N., et.al, Cross sections of the $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ reaction in the 3.9–5.3 MeV neutron energy region, *Phys. Rev. C*, 106, p.064602(2022). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.106.064602>
20. https://www.xia.com/dfg_products.html [cited 2025 15 January]
21. J. Koning, S. Hilaire, and S. Goriely, TALYS-1.9 (2017), <http://www.TALYS.eu>, [cited 2025 15 January]

Сведения об авторах:

Чупраков И.А. – автор для корреспонденции, PhD, старший научный сотрудник РГП «Институт ядерной физики», ул. Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан

Гledenov Ю.М. – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт ядерных исследований, 141980, г. Дубна, Россия

Энхболд С. – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Дубна, Россия

Бекбаев А.К. – PhD, заместитель главного инженера комплекса ВВР-К, РГП «Институт ядерной физики», ул. Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан

Мухаметулы Б. – PhD, старший научный сотрудник, РГП «Институт ядерной физики», ул. Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан

Коршиков Е.С. – PhD, ведущий научный сотрудник, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, проспект аль-Фараби, 71, 050038, Алматы, Казахстан

Темербулатова Н.Т. – младший научный сотрудник, Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Дубна, Россия

Chuprakov I. – corresponding author, PhD, Senior Researcher, Institute of Nuclear Physics, Ibragimov str., 1, 050032, Almaty, Kazakhstan.

Gledenov Yu.M. – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Joint Institute for Nuclear Research, 141980, Dubna, Russia.

Enkhbold S. – candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia.

Bekbaev A.K. – PhD, Deputy Chief Engineer of the BBP-K Complex, Institute of Nuclear Physics, st. Ibragimova, 1, 050032, Almaty, Kazakhstan.

Mukhametuly B. – PhD, Senior Researcher, Institute of Nuclear Physics, Ibragimova st., 1, 050032, Almaty, Kazakhstan.

Korshikov E.S. – PhD, Leading Researcher, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Avenue, 71, 050038, Almaty, Kazakhstan.

Temerbulatova N.T. – Junior Researcher, Joint Institute for Nuclear Research, 141980, Dubna, Russia

Чупраков И.А. – хат-хабар авторы, PhD, "Ядролық физика институты" РМК аға ғылыми қызметкері, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан

Гледенов Ю.М. – физика-математика ғылымдарының докторы, жетекші ғылыми қызметкер Біріккен ядролық зерттеулер институты, 141980, Дубна, Ресей

Энхболд С. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, ғылыми қызметкер, Біріккен ядролық зерттеулер институты, 141980, Дубна, Ресей

Бекбаев А.К. – PhD, ВВР-К кешені бас инженерінің орынбасары, "Ядролық физика институты" РМК, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан

Мұхаметұлы Б. – PhD, аға ғылыми қызметкер, "Ядролық физика институты" РМК, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан

Коршиков Е.С. – PhD, жетекші ғылыми қызметкер, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Әл-Фараби даңғылы, 71, 050038, Алматы, Қазақстан.

Темербулатова Н.Т. – кіші ғылыми қызметкер, Біріккен ядролық зерттеулер институты, 141980, Дубна, Ресей



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).