

Исследование неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах кислорода и кремния

Н. А. Федоров^{1,2,*}, Т. Ю. Третьякова³, В. М. Быстрицкий¹, Ю. Н. Копач¹, И. Н. Русков^{1,4}, В. Р. Ской¹, Д. Н. Грозданов^{1,4}, Н. И. Замятин¹, Д. Ван^{1,5}, Ф. А. Алиев^{1,6}, К. Храдко^{1,7}, А. Кумар⁸, А. Ганди⁸, М. Г. Сапожников¹, Ю. Н. Рогов¹, Е. А. Разинков¹, С. Дабылова¹

¹Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ). Россия, 141980, Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

³Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобелева (НИИЯФ МГУ)
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

⁴Институт ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук (ИЯИЯЭ БАН)
Болгария, 1784 София, бул. Цариградское шоссе 72

⁵Сианьский Университет Цзяо Тун. Сиань 710049, Китай

⁶Институт геологии и геофизики Национальной Академии наук Азербайджана (ИГГ НАНА)
Азербайджан AZ1143, Баку, Пр. Г. Джавида, 119

⁷Институт химии (ИХ) Академии наук Молдовы. Республика Молдова, MD-2028, Кишинев, ул. Академическая, 3

⁸Бенаресский индуистский университет. Индия, 221005, Варанаси

(Статья поступила 22.03.2018; Подписана в печать 26.03.2018)

Представлены результаты измерения угловых и энергетических распределений гамма-квантов, образующихся в реакциях неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах кислорода и кремния. Измерения проведены с использованием метода меченых нейтронов на пучке портативного нейтронного генератора ИНГ-27. Получены угловые распределения гамма-квантов из состояний 6,13 МэВ (3^-) в ^{16}O и 1,78 МэВ (2^+) в ^{28}Si .

PACS: 25.40.Fq

УДК: 539.172.4

Ключевые слова: неупругое рассеяние нейтронов, угловое распределение гамма-излучения, меченые нейтроны

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью проекта TANGRA (TAGged Neutron and Gamma RAys — меченые нейтроны и гамма-лучи) в ОИЯИ [1, 2] является детальное изучение рассеяния быстрых нейтронов на атомных ядрах с использованием метода меченых нейтронов. Измерение угловых $n-\gamma$ корреляций в реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14,1 МэВ важно с точки зрения изучения механизмов взаимодействия ядра с налетающим нуклоном. В литературе информация о процессах такого типа с участием нейтронов представлена существенно меньше, чем результаты экспериментов по неупругому рассеянию заряженных частиц на атомных ядрах. Для теоретических исследований в области ядерной физики и ядерной астрофизики интересным является сравнение неупругого рассеяния нейтронов и протонов, что позволяет исследовать изоспиновую симметрию нуклон-нуклонных взаимодействий. Интерес к реакциям $(n, n'\gamma)$ на легких и средних по массе элементах продиктован также необходимостью уточнения ранее полученных экспериментальных данных, поскольку подобные реакции имеют широкое практическое применение в геологии, в атомной энергетике, в детектировании скрытых опасных веществ [3].

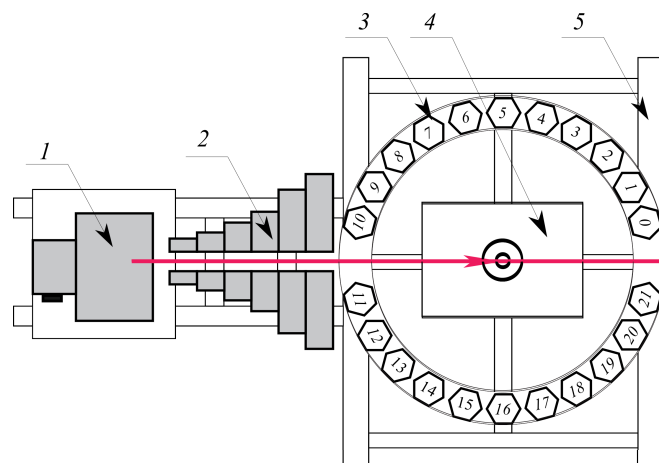


Рис. 1: Схема установки TANGRA. Цифрами обозначены: 1 — нейтронный генератор ИНГ-27, 2 — разборный стальной коллиматор, 3 — массив NaI(Tl) гамма-спектрометров, 4 — стол с облучаемым образцом, 5 — рама. Стрелкой показано направление используемого меченого нейтронного пучка

Метод меченых нейтронов (ММН) основан на регистрации α -частиц с энергией 3,5 МэВ, образующихся в реакции:



и имеющих практически противоположное направление вылета по отношению к направлению вылета нейтрона. При этом энергия нейтрона составляет

*E-mail: na.fedorov@physics.msu.ru

14,1 МэВ. Регистрация α -частиц происходит в совпадении с характеристическим ядерным γ -излучением, возникающим в результате неупругого рассеяния нейтронов на ядрах мишени:

$$A(n, n')A^* \xrightarrow{\gamma} A. \quad (2)$$

Таким образом, фиксируя направление вылета α -частицы, можно восстановить направление вылета нейтрона — «пометить» его. На практике «мечение» нейтрона осуществляется с помощью позиционно-чувствительного α -детектора, встроенного в нейтронный генератор. Знание числа меченых нейтронов, падающих на мишень, числа совпадений $n - \gamma$, размеров мишени, а также эффективности регистрации γ -квантов характеристического ядерного излучения позволяет корректно определить дифференциальные сечения процессов неупругого рассеяния нейтронов на ядрах исследуемых изотопов с возбуждением определенных уровней. Важным преимуществом ММН является возможность мониторинга потока меченых нейтронов с высокой эффективностью, и тем самым существенное снижение вклада фоновых событий в результирующие гамма-спектры.

В предыдущей нашей работе [4] представлены результаты измерений углового распределения γ -излучения в реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14,1 МэВ на ядрах ^{12}C . Использование ММН позволило повысить точность измерений, что имеет принципиальное значение, поскольку имеющиеся в литературе данные существенно различаются между собой. Выбранная геометрия установки позволила впервые провести измерения при вылете γ -квантов под углами менее 10° . В настоящей работе представлены результаты измерения углового распределения γ -квантов в реакции $(n, n'\gamma)$ на ядрах ^{16}O и ^{28}Si .

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема установки TANGRA для исследований реакций рассеяния быстрых нейтронов на атомных ядрах приведена на рис. 1. Источником нейтронов является генератор ИНГ-27, работающий в непрерывном режиме, обеспечивающий ускорение дейтронов до энергий 80–100 кэВ и их фокусировку на тритиевой мишени. Продуктами реакции (2) являются нейтроны с энергией 14,1 МэВ и α -частицы с энергией 3,5 МэВ. Максимальная интенсивность потока нейтронов в 4π -геометрии, создаваемого генератором составляет $5 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$. Альфа-частицы регистрируются встроенным в генератор 64 -пиксельным кремниевым детектором с размерами пикселя $6 \times 6 \text{ мм}^2$, расположенным на расстоянии 100 мм от тритиевой мишени.

Регистрация γ -квантов, образующихся в результате рассеяния нейтронов на образце, осуществляется 22 -мя сцинтилляционными детекторами на основе кристаллов NaI(Tl). Детекторы γ -квантов расположены

с шагом по углу $\approx 15^\circ$. Для защиты ближайших к генератору детекторов от прямого попадания нейтронов используется компактный стальной коллиматор. Сепарация фоновых событий производится по методу времени пролета: известны энергия падающего нейтрона (14,1 МэВ) и расстояния как от тритиевой мишени генератора до облучаемого образца, так и от него до детекторов γ -квантов. Поэтому, для дальнейшей обработки отбираются события, лежащие в узком временном интервале, начало которого задается α -частицей из реакции (2). Это позволяет проводить эффективное разделение γ -квантов и нейтронов, попавших в γ -детектор, по времени пролета. Для сбора и предварительного анализа данных используется компьютер с двумя АЦП ADCM-16 [6].

В качестве мишеней в экспериментах по неупругому рассеянию быстрых нейтронов на кислороде и кремнии использовались пластиковые контейнеры, заполненные исследуемыми веществами (водой и химически чистым порошком SiO_2), размерами $10 \times 10 \times 10 \text{ см}^3$. Выбор размера образца был произведен на основе результатов моделирования [4].

2. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Сигналы, поступающие с α - и γ -детекторов установки TANGRA, оцифровываются с помощью ADCM и записываются на жесткий диск компьютера, после чего происходит их анализ путем построения временных и амплитудных спектров событий с разделением зарегистрированных нейтронов и γ -квантов по времени пролета. На рис. 2 приведены примеры временных спектров событий, зарегистрированных γ -детекторами, расположенными под углами 15° , 90° и 165° относительно нейтронного пучка. В каждом спектре выделяются три пика: пик А, соответствующий нейтронам, рассеянным в коллиматоре, пик В, обусловленный регистрацией характеристического γ -излучения возбужденного ядра, и пик С соответствующий регистрации нейтронов, не взаимодействовавших с образцом, либо испытавших упругое или неупругое рассеяние. Далее, используя энергетическую калибровку γ -детекторов, производится построение энергетических спектров событий, попадающих во временное окно, соответствующее γ -квантам (пик В на рис.2).

В данной конфигурации экспериментальной установки учитывались данные только с одного центрального пикселя α -детектора, что позволяло существенно снизить число фоновых событий и упростить алгоритмы обработки экспериментальных данных. Однако такая методика приводит к снижению набранной статистики и существенно увеличивает время облучения.

Из полученных для каждого анализируемого стрипа энергетических γ -спектров извлекается информация о числе событий, соответствующих излучению γ -квантов при переходе ядра из определенного возбужденного состояния в более низкое энергетическое со-

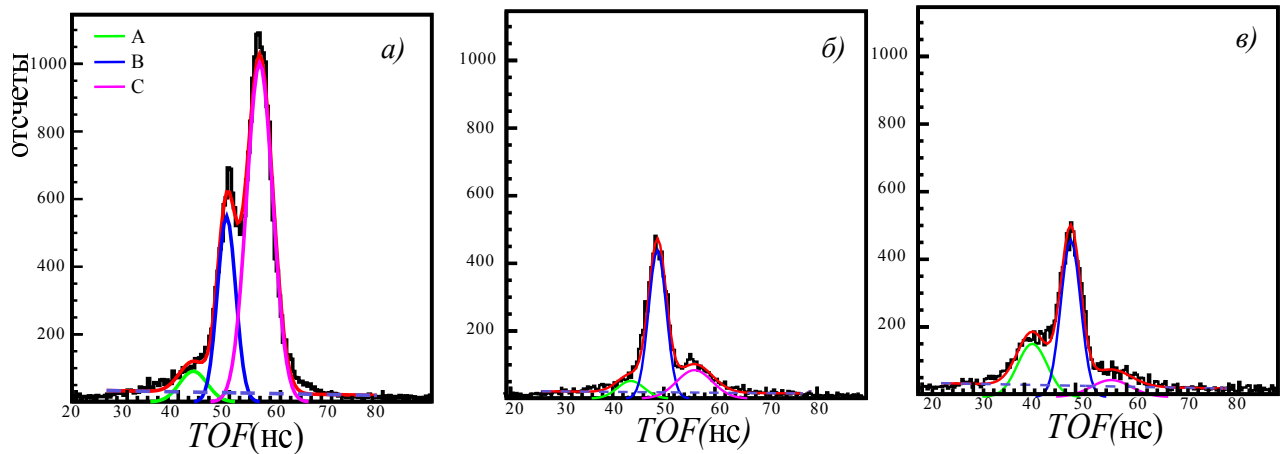


Рис. 2: Времяпролетные (TOF) спектры и их аппроксимации для детекторов под углами 15° (а), 90° (б) и 165° (в). Пик А соответствует нейтронам, рассеянным в коллиматоре, пик В — γ -лучам, испущенные образцом, пик С — нейтронам, не взаимодействовавшим с образцом, либо испытавшими упругое или неупругое рассеяние

стояние. Обычно учитываются только события, лежащие в пределах пика полного поглощения (ППП) энергии γ -кванта в детекторе, либо пика одиночного вылета аннигиляционного γ -кванта с энергией 0.511 МэВ.

Для количественного описания анизотропии углового распределения γ -квантов вводится параметр анизотропии $W(\theta)$, определяемый как отношение событий, зарегистрированных под углом θ , к числу событий, зарегистрированных под углом 90°. Экспериментально полученные угловые распределения γ -квантов аппроксимируются разложением по полиномам Лежандра:

$$W(\theta) = 1 + \sum_{i=2}^{2J} a_i P_i(\cos \theta) \quad (3)$$

где a_i — коэффициенты разложения, J — мультипольность γ -перехода, а индекс суммирования i принимает только четные значения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В реакции неупругого рассеяния нейтронов на ^{12}C фактически возбуждается только одно состояние, распадающееся с испусканием γ -кванта с энергией 4,43 МэВ и мультипольностью 2. Изучению данной реакции посвящено много работ, и данные по угловому распределению γ -квантов получены с хорошей точностью [4]. С ростом числа нуклонов спектры возбужденных состояний ядер усложняются, что отражается на экспериментальных данных. На рис. 3 представлены энергетические спектры γ -квантов в реакции $(n, n'\gamma)$ на мишенях из SiO_2 и воды. В обоих спектрах наиболее ярко выделяется пик при энергии 6,1 МэВ, соответствующий переходу мультипольности $E3$ из состояния, имеющего спин-четность $J^\pi = 3^-$ в основное состояние 0^+ ($3^- \rightarrow 0^+$) в ядре ^{16}O . Структура спектра при E^* ниже 6 МэВ сложнее в ин-

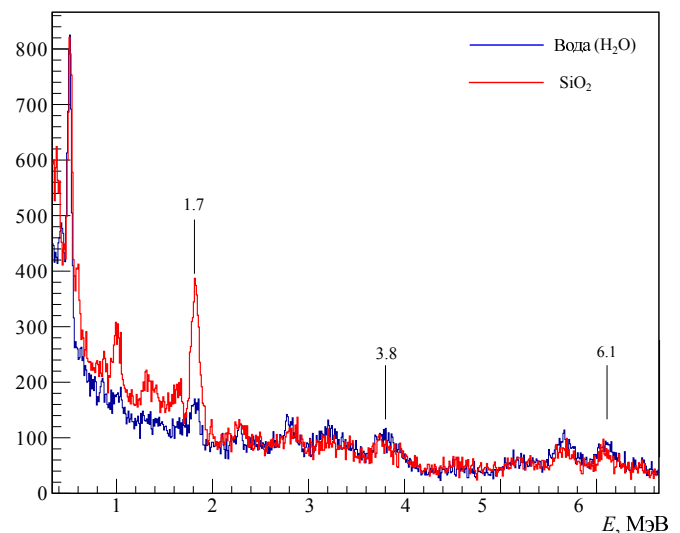


Рис. 3: Энергетические спектры гамма-излучения, испускаемого SiO_2 (красный) и водой (синий) при облучении нейтронами с энергией 14,1 МэВ

терпретации. В случае рассеяния на SiO_2 γ -кванты из реакции $(n, n'\gamma)$ на ядрах кремния приносят существенный вклад в фотопик при энергии 1,7 МэВ, которая также соответствует переходу из состояния $2^-(8.87 \text{ МэВ})$ в $1^-(7.12 \text{ МэВ})$ в ядре ^{16}O . Пики в спектрах при 2.7 и 3.8 МэВ возможно соответствуют γ -переходам $2^-(8.87 \text{ МэВ}) \rightarrow 3^-(6.13 \text{ МэВ})$ и $2^+(9.84 \text{ МэВ}) \rightarrow 0^+(6.05 \text{ МэВ})$. Однако, пик при энергии 3.8 МэВ может быть также сформирован за счет девозбуждения ядра ^{13}C , образующегося в реакции $^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}$ [8]. Определенный вклад в структуру спектра в данном диапазоне энергий дают также аннигиляционные γ -кванты, возникающие за счет рождения электрон-позитронных пар в веществе мишени.

Таблица I: Коэффициенты разложения по полиномам Лежандра для углового распределения γ -квантов в реакции $(n, n'\gamma)$ на ядрах ^{16}O . Значения a_i получены аппроксимацией данных по угловому распределению γ -излучения из работ [7, 8]

Эксперимент	a_2	a_4	a_6
Kozlowski (1965) [7]	0.2 ± 0.3	-0.3 ± 0.5	-0.7 ± 0.5
Morgan (1964) [7]	0.34 ± 0.04	0.01 ± 0.06	-0.04 ± 0.06
McDonald (1966) [8]	0.22 ± 0.08	-0.05 ± 0.10	-0.32 ± 0.08
TANGRA	0.39 ± 0.03	0.13 ± 0.04	-0.28 ± 0.05

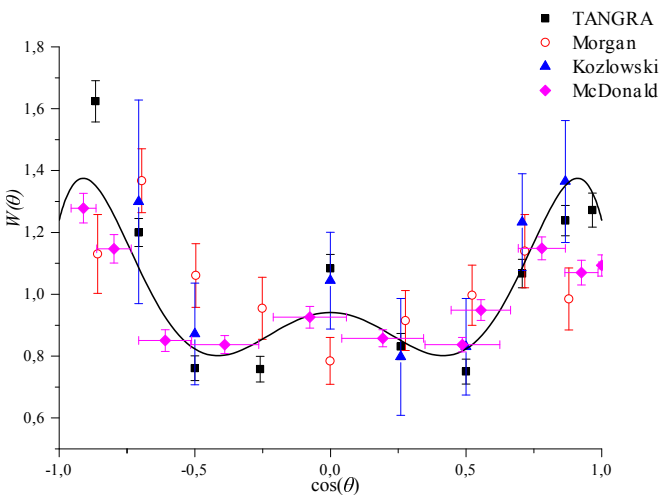


Рис. 4: Экспериментальное угловое распределение γ -квантов с энергией $E_\gamma = 6.13$ МэВ, образующихся при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах ^{16}O . Линия — аппроксимация наших результатов

В результате анализа событий, соответствующих пику полного поглощения γ -квантов с энергией 6.13 МэВ была получена зависимость параметра анизотропии W от угла θ . Экспериментальные значения и аналитическая аппроксимация по формуле (3) показаны на рис. 4. Коэффициенты разложения по полиномам Лежандра a_i приведены в табл. I в сравнении с коэффициентами, полученными нами при аппроксимации экспериментальных результатов работы [8] и данных, приведенных в базе данных ЦДФЭ НИИЯФ МГУ [7]. Следует отметить, что по сравнению с количеством экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов на углероде, данные по угловому распределению γ -излучения в рассеянии нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах ^{16}O чрезвычайно бедны. Данные нашего эксперимента находятся в соответствии с результатами предшествующих измерений, но отличаются существенно меньшей погрешностью. Особый интерес представляет вклад многочленов высокого порядка, поскольку поведение анизотропии важно не только с точки зрения моделирования и практического применения, но и для теоретического описания неупругого рассеяния нейтронов. В данном случае высокая мультипольность перехода приводит к более сложной угло-

вой зависимости, которая пока качественно не воспроизведена в теоретических подходах.

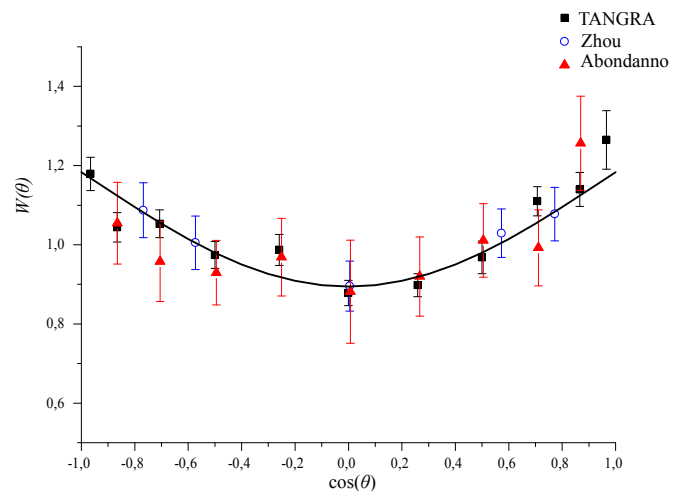


Рис. 5: Экспериментальное угловое распределение γ -квантов с энергией $E_\gamma = 1.779$ МэВ, образующихся при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах ^{28}Si . Линия — аппроксимация наших результатов

При неупругом рассеянии нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах ^{28}Si происходит возбуждение большого числа состояний, которые могут распадаться путем испускания γ -кванта. В работе [9] представлены результаты эксперимента по рассеянию нейтронов с энергией 14.9 МэВ на натуральном кремнии и подробно рассмотрена структура спектра образующихся при этом γ -квантов. Из 50 идентифицированных γ -переходов, согласно [9], пять образуются в реакции $^{28}\text{Si}(n, n')^{28}\text{Si}^*$, наиболее интенсивным является переход из первого возбужденного состояния $2^+ E^* = 1.778$ МэВ. Для γ -квантов данного перехода были определены параметры углового распределения при полиномах Лежандра $P_0(\cos \theta)$ и $P_2(\cos \theta)$ (табл. II).

Полученные в нашем эксперименте данные по рассеянию нейтронов с энергией 14.1 МэВ на образце из SiO_2 позволяют выделить γ -излучение для перехода из первого возбужденного состояния (1.778 МэВ, 2^+) в основное состояние. Экспериментальные значения для углового распределения γ -квантов и аналитическая аппроксимация по формуле (3) показаны на рис. 5. Коэффициенты разложения по полиномам Ле-

жандра a_i приведены в табл. II в сравнении с коэффициентами из работ [9, 10]. Результаты аппроксимации полученного углового распределения γ -излучения согласуются с данными, полученными в предыдущих экспериментах, в пределах ошибок. Следует отметить, что действительно вклад компоненты, соответствующей четвертой степени многочленов Лежандра, является незначимым. Для его уточнения планируется проведение дополнительных исследований.

Таблица II: Коэффициенты разложения по полиномам Лежандра для углового распределения γ -квантов в реакции $(n, n'\gamma)$ на ядрах ^{28}Si

Эксперимент	a_2	a_4
Zhou [9]	0.21 ± 0.02	-
Abbondanno [10]	0.20 ± 0.09	0.11 ± 0.14
TANGRA	0.19 ± 0.02	0.02 ± 0.03

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На установке TANGRA с использованием метода меченых нейтронов на пучке нейтронного генератора

ИНГ-27 проведено исследование реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах кислорода и кремния. Существенным преимуществом эксперимента является широкий диапазон углов и, как следствие, новые данные при углах вылета γ -квантов по отношению к направлению падающего на мишень нейтрона, меньших чем 10° .

С высокой точностью получено угловое распределение γ -квантов из возбужденного состояния $6.13(3^-)$ МэВ в ^{16}O . При этом впервые экспериментально получены параметры анизотропии γ -излучения в реакции $(n, n'\gamma)$ для энергии нейтронов 14.1 МэВ.

Получено угловое распределение γ -квантов из первого возбужденного состояния $1.78(2^+)$ МэВ в ^{28}Si . Значения коэффициентов разложения функции анизотропии по полиномам Лежандра находятся в соответствии с результатами предыдущих измерений.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 16-52-45056).

- [1] Ruskov I.N., Kopatch Yu.N., Bystritsky V.M., Skoy V.R., Shvetsov V.N., Hamsch F.J., Oberstedt S., Capote Noy R., Sedyshev P.V. et al. Phys. Procedia. 2015. **64**. P. 163.
- [2] Быстрицкий В.М., Валкович В., Грозданов Д.Н., Зонтиков А.О., Иванов И.Ж., Копач Ю.Н., Крылов А.Р., Рогов Ю.Н., Русков И.Н., Сапожников М.Г. и др. Письма в ЭЧАЯ. 2015. **12**. P. 486. (Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. **12**. P. 325.)
- [3] Valković V. 14 MeV Neutrons. Physics and Applications. Boca Raton, USA. CRC Press, 2016.
- [4] Быстрицкий В.М., Грозданов Д.Н., Зонтиков А.О., Копач Ю.Н., Рогов Ю.Н., Русков И.Н., Садовский А.Б., Ской В.Р., Бармаков Ю.Н., Боголюбов Е.П., Рыжков В.И., Юрков Д.И. и др. Письма в ЭЧАЯ. 2016. **13**. P. 793. (Bystritsky V.M., Grozdanov D.N., Zontikov A.O., Kopach Y.N., Rogov Y.N., Ruskov I.N., Sadovsky A.B., Skoy V.R., Barmakov Y.N., Bogolyubov E.P., Ryzhkov V.I., Yurkov D.I. et al. Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. **13**. P. 504.)
- [5] Ruskov I.N., Kopatch Yu.N., Bystritsky V.M., Skoy V.R., Shvetsov V.N., Hamsch F., Oberstedt S., Noy R.C., Grozdanov D.N., Zontikov A.O. et al. EPJ Web of Conferences. 2017. **146**. 03024.
- [6] ADCM — An universal Digital Pulse Processing system for nuclear physics experiments: <http://afi.jinr.ru/ADCM16-LTC>.
- [7] База данных «ЦДФЭ НИИЯФ МГУ» (SINP MSU CDFE Data Base), <http://cdfe.sinp.msu.ru/>.
- [8] McDonald W.J., Robson J.M., Malkolm R. Nucl. Phys. A. 1966. **75**. P. 353.
- [9] Hong-Yu Zhou, Fu-Guo Deng, Wei Cheng, Feng-Shou Zhang, Qiang Zhao, Jun Su, Li-Ming Dong, Qing Zhu, Guo-Ying Fan. Nuclear Instruments and Methods A. 2011. **648**. P. 192.
- [10] Abbondanno U., Giacomich R., Lagonegro M., Pauli G. J. Nucl. Energy. 1973. **27**. P. 227.

Studying of 14.1 MeV neutrons inelastic scattering on light nuclei

N. A. Fedorov^{1,2,a}, T. Yu. Tretyakova^{1,3}, D. N. Grozdanov^{1,4}, V. M. Bystritskiy¹, Yu. N. Kopach¹, I. N. Ruskov^{1,4}, V. R. Skoy¹, N. I. Zamyatin¹, D. Wang^{1,5}, F. A. Aliev^{1,6}, C. Hramco^{1,7}, A. Gandhi⁸, A. Kumar⁸, S. Dabylova¹

¹Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie 6, Dubna 141980, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

³Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow 119991, Russia

⁴*Institute of Nuclear Research and Nuclear Energy of the Bulgarian Academy of Sciences. Sofia, Bulgaria*

⁵*Xi'an Jiao Tong University. 710049 Xi'an, China*

⁶*Institute of Geology and Geophysics of Azerbaijan National Academy of Sciences. Baku, AZ1143 Azerbaijan*

⁷*Institute of Chemistry of the Academy of Sciences of Moldova Chisinau, Republic of Moldova*

⁸*Banaras Hindu University, Varanasi-221005, U.P. India*

E-mail: ^ana.fedorov@physics.msu.ru

The characteristic gamma radiation from the interaction of 14.1 MeV neutrons with a SiO₂ and H₂O sample is investigated with Tagged Neutron Method (TNM). The anisotropies of gamma-ray emission of 1.779 MeV from silicon and 6.13 MeV from oxygen were measured at 11 azimuth angles with a step of $\angle 15^\circ$. The present results are in good agreement with some recent experimental data.

PACS: 25.40.Fq

Keywords: neutron inelastic scattering, gamma-rays angular distribution, tagged neutron.

Received 22 March 2018.

Сведения об авторах

1. Федоров Никита Александрович —инженер, аспирант; тел.: (496) 216-31-13, e-mail: na.fedorov@physics.msu.ru.
2. Третьякова Татьяна Юрьевна —канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-56-36, e-mail:tretyakova@sinp.msu.ru.
3. Грозданов Димитър Николов —мл. науч. сотрудник; тел.: (496) 216-31-13, e-mail:dimitar@nf.jinr.ru.
4. Быстрицкий Вячеслав Михайлович —доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник; тел.: (496) 216-37-96, e-mail:bystvm@jinr.ru.
5. Копач Юрий Николаевич —канд. физ.-мат. наук, нач. сектора; тел.: (496) 216-37-96, e-mail:bystvm@jinr.ru.
6. Русков Иван Николов —канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (496) 216-27-85, e-mail:ruskoiv@nf.jinr.ru.
7. Ской Вадим Рудольфович —канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (496) 216-33-88, e-mail:skoy@nf.jinr.ru.
8. Замятин Николай Иванович —канд. техн. наук, нач. сектора; тел.: (496) 216-51-87, e-mail:nzamiatin@mail.ru.
9. Ван Дунмин —младший научный сотрудник; тел.: (496) 216-51-87, e-mail:nzamiatin@mail.ru.
10. Алиев Фуад Ахмед оглы —инженер; тел.: (496) 216-31-13, e-mail:fuad.aliyev107@gmail.com.
11. Храмо Константин —инженер; тел.: (496) 216-37-56, e-mail:costea.edinets@mail.ru.
12. Ганди Аман —мл. науч. сотрудник; тел.:+91 (995) 391-75-35, e-mail:gandhiaman653@gmail.com.
13. Кумар Аджай —PhD, доцент; тел.:+91 (953) 209-88-00, e-mail:ajaytyagi@bhu.ac.in.
14. Сапожников Михаил Григорьевич —доктор физ.-мат. наук, нач. группы; тел.: (496) 216-30-27, e-mail:sapozhnikov@jinr.ru.
15. Рогов Юрий Николаевич —науч. сотрудник; тел.: (496) 216-30-27, e-mail:Yury.Rogov@cern.ch.
16. Разинков Егор Александрович —инженер; тел.: (496) 216-59-84, e-mail:razinkovea@jinr.ru.
17. Дабылова Салтанат —инженер; тел.: (496) 216-21-87, e-mail: pearl_04_94@mail.ru.