

УДК 539.171.4

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДОВ И УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ γ -КВАНТОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 14.1 МэВ С ЯДРАМИ НАТРИЯ И ХЛОРА

© 2021 г. С. Б. Дабылова^{1,2,*}, Ю. Н. Копач¹, Н. А. Федоров^{1,3}, Д. Н. Грозданов^{1,4}, И. Н. Русков⁴, В. Р. Ской¹, К. Храмко^{1,5}, Т. Ю. Третьякова^{1,3,6}, С. К. Сахиев², Р. Б. Маржохов¹, Е. П. Боголюбов⁷, В. И. Зверев⁷, Ю. Н. Бармаков⁷

¹Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

⁴Институт ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук, София, Болгария

⁵Институт химии Академии наук Молдовы, Кишинев, Республика Молдова

⁶Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Научно-исследовательский институт имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

⁷Федеральное государственное унитарное предприятие

“Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова”, Москва, Россия

*E-mail: dabylova_saltanat@mail.ru

Поступила в редакцию 24.05.2021 г.

После доработки 01.06.2021 г.

Принята к публикации 28.06.2021 г.

Эксперимент по изучению реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах ^{23}Na и ^{35}Cl выполнен в рамках проекта TANGRA (Лаборатория нейтронной физики имени И.М. Франка, ОИЯИ) с использованием метода меченых нейтронов. Измерены энергии и выходы γ -квантов для видимых в эксперименте переходов, получены коэффициенты углового распределения γ -квантов для наиболее интенсивных γ -переходов. Проведено сравнение с другими экспериментальными данными, имеющимися в литературе.

DOI: 10.31857/S0367676521100124

ВВЕДЕНИЕ

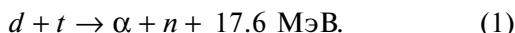
Изучение реакций неупругого рассеяния быстрых нейтронов на атомных ядрах имеет большое значение как с точки зрения фундаментальной физики, так и с точки зрения многочисленных практических применений. Реакции с участием нейтронов являются уникальным источником информации для описания процессов, идущих по сильному взаимодействию. Процессы неупругого рассеяния используются для исследования характеристик возбужденных состояний ядер-мишеней [1]. С практической точки зрения, широкое применение реакции ($n, n'\gamma$) влечет за собой необходимость расширения и уточнения существующих экспериментальных данных по данному процессу. В последнее время исследования реакций неупругого рассеяния быстрых нейтронов значительно активизировались в связи с новыми перспективами ядерной

энергетики, связанными с разработкой реакторов на быстрых нейтронах.

Наш эксперимент посвящен изучению γ -излучения в реакциях неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах натрия и хлора. Натрий является важным элементом в проектировании IV поколения реакторов, поскольку может быть использован в качестве теплоносителя. Соответственно, детальная информация о свойствах изотопов Na имеет решающее значение при оценке физики и безопасности многих реакторных систем. Ранее в работе [2] с использованием детекторов на основе NaI(Tl) было проведено исследование характеристик γ -квантов в реакции $^{23}\text{Na}(n, n'\gamma)$, в частности, получены угловые распределения γ -квантов для четырех наиболее интенсивных γ -линий в спектре ^{23}Na . Что касается изотопов хлора, то, несмотря на большое число

экспериментальных данных по сечению реакции $^{35}\text{Cl}(n, n')^{35}\text{Cl}$ при энергии нейтронов 2–15 МэВ [3–5], нам не удалось найти информации об угловых распределениях испускаемых в этой реакции γ -квантов. В данном эксперименте мы ставили целью уточнение существующих данных по выходам γ -квантов и измерение угловой анизотропии γ -излучения в реакции неупругого рассеяния нейтронов на изотопах ^{23}Na и ^{35}Cl .

Настоящее исследование является частью научной программы международного проекта TANGRA (TAGged Neutrons and Gamma RAys), базирующегося в Лаборатории нейтронной физики имени И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований (ИЯИ ОИЯИ, Дубна). Основной целью проекта является изучение реакций неупругого взаимодействия быстрых нейтронов с атомными ядрами с использованием метода меченых нейтронов (ММН) [6]. В эксперименте используется пучок нейтронов с энергией 14.1 МэВ, образующихся в реакции



Продукты реакции разлетаются под углом, близким к 180° , тем самым фиксация угла вылета α -частицы определяет направление вылета нейтрона. На практике “мечение” нейтрона осуществляется с помощью позиционно-чувствительного многопиксельного α -детектора, встроенного в нейтронный генератор ИНГ-27 [7, 8]. В нашем эксперименте регистрация α -частиц происходит при совпадении с γ -квантами, возникающими в результате неупругих реакций нейтронов с ядрами облучаемого образца.

Более точный, благодаря регистрации α -частиц, учет числа нейтронов, взаимодействующих с мишенью, и, соответственно, учет числа совпадений n - γ позволяют надежно определить дифференциальные сечения неупругих реакций нейтронов с ядрами исследуемых изотопов, сопровождающихся испусканием γ -квантов. Важными преимуществами ММН являются как осуществление мониторинга потока меченых нейтронов, падающих на исследуемый образец, так и возможность высокоэффективного подавления вклада фоновых событий в результирующие γ -спектры.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В рамках проекта TANGRA создано несколько многофункциональных конфигураций экспериментальных установок, в основе которых лежит использование метода меченых нейтронов. В основе эксперимента лежит использование компактного генератора ИНГ-27 меченых нейтронов с энергией 14.1 МэВ. Для исследования характеристического γ -излучения созданы различные конфигурации детектирующих систем: линейка детекторов в кольцевой геометрии (“Ромашка” [9] и

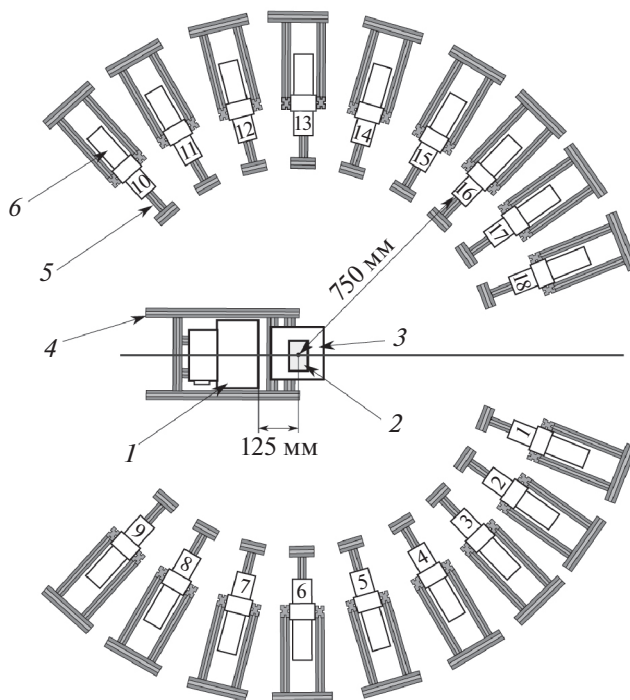


Рис. 1. Схема экспериментальной установки “Ромашка”: 1 – нейтронный генератор ИНГ-27, 2 – мишень, 3 – держатель мишени, 4 – алюминиевая рама установки, 5 – подставки для детекторов γ -излучения, 6 – детекторы γ -излучения, пронумерованные от 1 до 18.

“Ромаша” [10, 11]) для измерения углового распределения γ -излучения, и детектирующая система на основе HPGe [12, 13] для определения выходов γ -квантов. Для исследования реакций неупругого рассеяния нейтронов на ^{23}Na и ^{35}Cl использованы детектирующие системы “Ромаша” и “HPGe”.

Источником меченых нейтронов в нашем эксперименте служит компактный нейтронный генератор ИНГ-27 производства ФГУП “ВНИИА”. Работа генератора основана на использовании реакции (1), дейтроны ускоряются до энергий 80–100 кэВ и фокусируются на тритиевой мишени. Генератор работает в непрерывном режиме. Для регистрации α -частиц в нейтронный генератор ИНГ-27 встроен 64-канальный кремниевый детектор, разделенный на 8 стрипов как по горизонтали, так и по вертикали, благодаря чему выделяются 64 пучка меченых нейтронов. Максимальная интенсивность результирующего потока нейтронов в 4π -геометрии составляет $5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$.

Детектирующая система “Ромаша” (рис. 1) состоит из 18 сцинтилляционных γ -детекторов на основе кристаллов ВГО (диаметр 76 мм, длина 65 мм). Детекторы расположены в горизонтальной плоскости по окружности радиусом 750 мм с шагом по углу 14° . В данной конфигурации от-

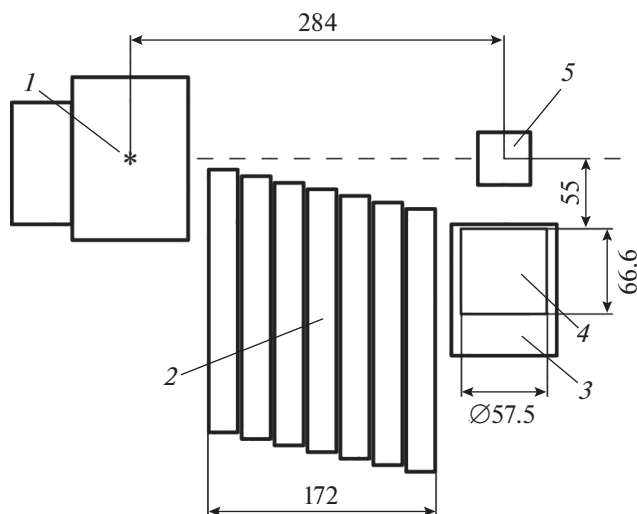


Рис. 2. Схема экспериментальной установки с HPGe: 1 – нейтронный генератор ИИНГ-27, 2 – свинцовая защита, 3 – HPGe γ -детектор, 4 – кристалл HPGe, 5 – образец. Размеры указаны в мм.

существует дополнительная коллимация нейтронного пучка, расстояние от источника нейтронов до образца составляет 125 мм.

Установка “HPGe” (рис. 2) представляет собой γ -детектор на основе кристалла из сверхчистого германия (HPGe) диаметром 57.5 мм и толщиной 66.6 мм. Детектор расположен таким образом, чтобы исключить попадание прямых меченых нейтронов непосредственно в детектор. Дополнительно с целью уменьшения фона и защиты детектора от повреждения быстрыми нейтронами используется набор свинцовых пластин. Расстояние от детектора до центра образца составляет 55 мм.

В качестве образца-мишени был использован порошкообразный хлорид натрия (NaCl), помещенный в прямоугольный алюминиевый контейнер размером $6 \times 6 \times 14$ см³. Размеры образца были определены в результате моделирования эксперимента в программном пакете GEANT4 (GEmetry AND Tracking). Моделирование эксперимента с целью оценки поглощения и рассеяния γ -квантов и нейтронов в мишени показало, что выбранные размеры образца являются оптимальными и искажение, вносимое образцом в наблюдаемую анизотропию излучения γ -квантов, не превышает 20% для всех используемых меченых пучков [14].

Образец располагался на легкой алюминиевой подставке. Фоновая составляющая в γ -спектрах, обусловленная взаимодействием нейтронов с подставкой и другими конструкционными материалами, была определена в результате дополнительно измерения без образца.

Калибровка детекторов выполнена с помощью стандартных источников γ -излучения. В ходе измерений с использованием детекторов BGO, у которых световыход и, соответственно, энергетическая калибровка не так стабильны и зависят от температуры, загрузки и других внешних факторов, проводилась дополнительная калибровка в реальном времени с использованием известных фоновых линий, регистрируемых при измерении с образцом.

Для сбора и предварительного анализа данных в детектирующей системе “Ромаша” используется компьютер с оцифровщиком на основе двух 16-канальных плат ADCM-16 [15]. Частота дискретизации ADCM составляет 100 МГц. В конфигурации “HPGe” в качестве оцифровщика использовалась система ЦРС, имеющая частоту дискретизации 200 МГц.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Измерения выходов γ -излучения были проведены с использованием детектора из сверхчистого германия (HPGe). Испускаемые образцом γ -кванты идентифицировались путем сравнения γ -спектров в окне совпадений с мечеными нейтронами, где присутствовали линии, возникающие в исследуемой реакции на ²³Na и ³⁵Cl, с γ -спектрами вне окна совпадений, содержащими фоновые линии от взаимодействия нейтронов с окружающими материалами.

Параметры угловой анизотропии γ -квантов были получены с использованием детекторной системой “Ромашка” на основе сцинтилляторов BGO. Энергетическое разрешение детекторов BGO недостаточно для эффективного разделения пиков полного поглощения γ -квантов близких энергий, поэтому угловые распределения были определены только для наиболее сильных γ -переходов. Для каждой величины угла к полученным в эксперименте энергетическим спектрам с помощью метода наименьших квадратов были подогнаны параметры функции, включающей подложку от случайных совпадений, вклад от взаимодействия рассеянных нейтронов с ближайшим окружением образца и набор гауссианов, соответствующий наблюдаемым пикам. Вероятность испускания γ -квантов определенной энергии для данного угла пропорциональна площади соответствующего аппроксимированного пика. При этом с помощью моделирования в среде GEANT4 [18] была проведена корректировка с учетом поправок на поглощение γ -квантов в образце, а также получены эффективные телесные углы для каждого детектора.

Для описания анизотропии углового распределения γ -квантов используется параметр анизотропии $W(\theta)$, который есть отношение собы-

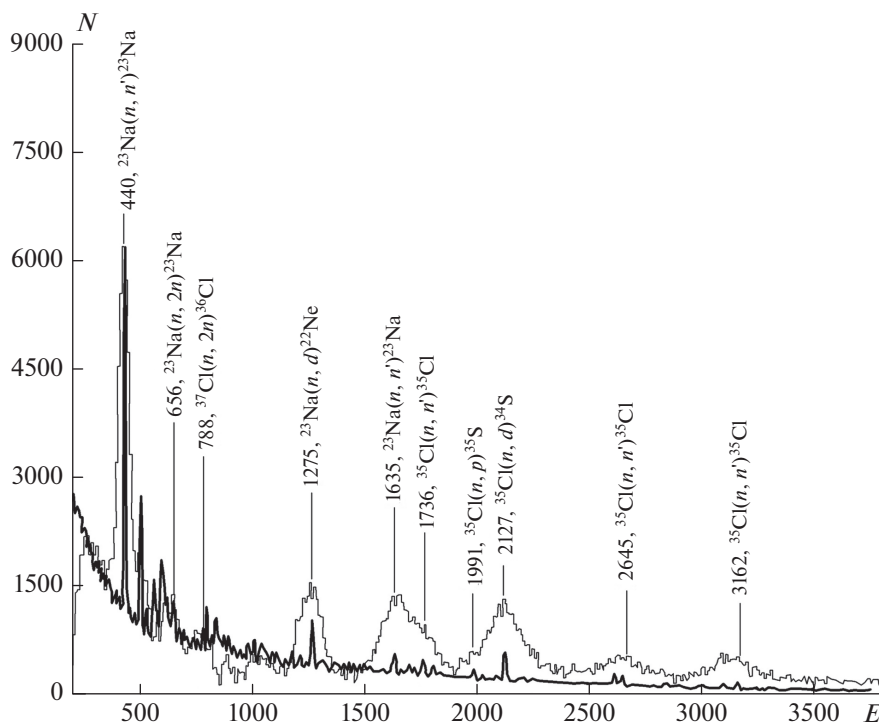


Рис. 3. Спектры γ -излучения, полученные при облучении образца NaCl нейтронами с энергией 14.1 МэВ. Тонкой линией показан спектр, измеренный с помощью сцинтилляционного детектора BGO, жирной – с детектором HPGe. Энергии выявленных γ -переходов указаны согласно ENSDF [16].

тий под углом θ к усредненному по всем углам числу зарегистрированных событий. Количественно анизотропия выражается через коэффициенты разложения по полиномам Лежандра:

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

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

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 приведены спектры γ -квантов, образующихся при взаимодействии нейтронов с энергией 14.1 МэВ с ядрами ^{23}Na и ^{35}Cl , полученные с использованием двух детектирующих систем, указаны значения энергии γ -квантов для наиболее интенсивных идентифицированных нами переходов. Всего в эксперименте с использованием HPGe-детектора были выделены и идентифицированы 9 γ -переходов, возникающих в реакциях $(n, X\gamma)$, где $X = n', p, d$ или α , на ядрах ^{23}Na и 17 переходов, возникающих в аналогичных реакциях на ядрах ^{35}Cl . Список выделенных γ -линий с указанием реакции, в ходе которой они были испущены, энергии соответствующих γ -квантов, а также характеристики начального и конечного со-

стояния ядра приведены в табл. 1 для ^{23}Na и в табл. 2 для ^{35}Cl . При идентификации переходов были использованы данные из базы Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF) [16]. В таблицах представлено сравнение полученных экспериментальных значений выходов γ -переходов в сравнении с данными компиляции [19]. Для наших результатов в табл. 1 и 2 приведены статистические погрешности, соответствующие одному стандартному отклонению. При анализе данных была проведена коррекция, учитывающая геометрию установки и процессы поглощения γ -квантов в веществе мишени. Неизбежные расхождения параметров реального эксперимента и его численного моделирования приводят также к систематическим погрешностям. Расхождения наших результатов с экспериментальными данными компиляции [19] могут быть вызваны, в том числе, величиной систематических погрешностей как в наших измерениях, так и в работах других авторов. Следует также отметить отсутствие экспериментальных данных для некоторых переходов. Также в эксперименте разрешение нашей детектирующей системы не позволило нам разделить линий с энергией γ -квантов 938.5 и 1001.1 кэВ для ^{23}Na и ряд линий для хлора. В отличие от натрия, являющегося моноизотопом ^{23}Na , стабильный хлор представлен двумя изотопами:

Таблица 1. Энергии γ -переходов E_γ (кэВ), наблюдаемых при облучении нейтронами с энергией 14.1 МэВ ядер ^{23}Na . Указаны реакции образования γ -квантов, а также энергии возбуждения E (кэВ), спины и четности начального (J^π)ⁱ и конечного (J^π)^f состояний соответствующего ядра. Полученные на установке TANGRA выходы Y_γ сравниваются данными компиляции [19] и с расчетами в TALYS 1.9. Звездочкой “*” отмечены γ -линии, которые не удалось разделить в данном эксперименте. Жирным шрифтом выделены переходы, для которых определены угловые распределения

E_γ	Реакция	$E, (J^\pi)^i \rightarrow E, (J^\pi)^f$	Y_γ %		
			TANGRA	TALYS	[19]
166.7	$^{23}\text{Na}(n, \alpha)^{20}\text{F}$	823(4 ⁺) \rightarrow 656(3 ⁺)	8.7 \pm 1.4	6.8	
439.9	$^{23}\text{Na}(n, n')^{23}\text{Na}$	440(5/2 ⁺) \rightarrow 0(3/2 ⁺)	100	100	100
627.5	$^{23}\text{Na}(n, n')^{23}\text{Na}$	2704(9/2 ⁺) \rightarrow 2076(7/2 ⁺)	5.3 \pm 0.8	7.4	4.7 \pm 0.8
656.0	$^{23}\text{Na}(n, \alpha)^{20}\text{F}$	656(3 ⁺) \rightarrow 0(2 ⁺)	9.3 \pm 0.9	15.3	10.2 \pm 0.9
983.5*	$^{23}\text{Na}(n, \alpha)^{20}\text{F}$	983(1 ⁻) \rightarrow 0(2 ⁺)	4.3 \pm 1	6.5	
1001.07*	$^{23}\text{Na}(n, \alpha)^{20}\text{F}$	1824(5 ⁺) \rightarrow 823(4 ⁺)			
1274.5	$^{23}\text{Na}(n, d)^{22}\text{Ne}$	1275(2 ⁺) \rightarrow 0(0 ⁺)	30.9 \pm 1	77.7	41.8 \pm 2.7
1636.0	$^{23}\text{Na}(n, n')^{23}\text{Na}$	2076(7/2 ⁺) \rightarrow 440(5/2 ⁺)	17.2 \pm 1	37.8	32 \pm 3.4
2239.8	$^{23}\text{Na}(n, n')^{23}\text{Na}$	2639(1/2 ⁻) \rightarrow 0(3/2 ⁺)	2.6 \pm 1.3	3.5	

Таблица 2. Энергии γ -переходов E_γ (кэВ), наблюдаемых при облучении нейтронами с энергией 14.1 МэВ ядер ^{35}Cl . Обозначения см. в табл. 1

E_γ	Реакция	$E, (J^\pi)^i \rightarrow E, (J^\pi)^f$	Y_γ %		
			TANGRA	TALYS	[19]
536	$^{37}\text{Cl}(n, n')^{37}\text{Cl}$	4546(11/2 ⁻) \rightarrow 4010(9/2 ⁻)	9.4 \pm 1.2	2.89	
788.4	$^{37}\text{Cl}(n, 2n)^{36}\text{Cl}$	788(3 ⁺) \rightarrow 0(2 ⁺)	21.9 \pm 1.4	22.71	
906.4	$^{37}\text{Cl}(n, n')^{37}\text{Cl}$	4010(9/2 ⁻) \rightarrow 3103(7/2 ⁻)	16 \pm 3	5.83	
1164.8*	$^{37}\text{Cl}(n, 2n)^{36}\text{Cl}$	1164.8(1 ⁺) \rightarrow 0(2 ⁺)	26 \pm 3	19.97	40 \pm 9
1169.0*	$^{37}\text{Cl}(n, n')^{37}\text{Cl}$	4273(7/2 ⁻) \rightarrow 3103(7/2 ⁻)			
1176.6*	$^{35}\text{Cl}(n, d)^{34}\text{S}$	3304(2 ⁺) \rightarrow 2128(2 ⁺)			
1185.0*	$^{35}\text{Cl}(n, n')^{35}\text{Cl}$	4347(9/2 ⁻) \rightarrow 3163(7/2 ⁻)			
1219.3	$^{35}\text{Cl}(n, n')^{35}\text{Cl}$	1219.3(1/2 ⁺) \rightarrow 0(3/2 ⁺)	11.2 \pm 1.3	7.54	
1322.8	$^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{32}\text{P}$	1322(2 ⁺) \rightarrow 0(1 ⁺)	7.1 \pm 1.3	4.85	18 \pm 4
1763*	$^{35}\text{Cl}(n, n')^{35}\text{Cl}$	1763(5/2 ⁺) \rightarrow 0(3/2 ⁺)	44 \pm 5	24.33	46 \pm 16
1766.5*	$^{35}\text{Cl}(n, n')^{35}\text{Cl}$	4769(7/2) \rightarrow 3002(5/2 ⁺)			
1772.0*	$^{23}\text{Na}(n, n')^{23}\text{Na}$	3848(5/2 ⁻) \rightarrow 2076(7/2 ⁺)			
1991.2	$^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$	1991(7/2 ⁻) \rightarrow 0(3/2 ⁺)	23 \pm 2	9.70	
2127.5	$^{35}\text{Cl}(n, d)^{34}\text{S}$	2127(2 ⁺) \rightarrow 0(0 ⁺)	100	100	100
2645.7	$^{35}\text{Cl}(n, n')^{35}\text{Cl}$	2646(7/2 ⁺) \rightarrow 0(3/2 ⁺)	15 \pm 2	15.41	
3103.5	$^{37}\text{Cl}(n, n')^{37}\text{Cl}$	3103(7/2 ⁻) \rightarrow 0(3/2 ⁺)	23 \pm 2	17.88	
3162	$^{35}\text{Cl}(n, n')^{35}\text{Cl}$	3162(7/2 ⁺) \rightarrow 0(3/2 ⁺)	23 \pm 2	14.38	31 \pm 6

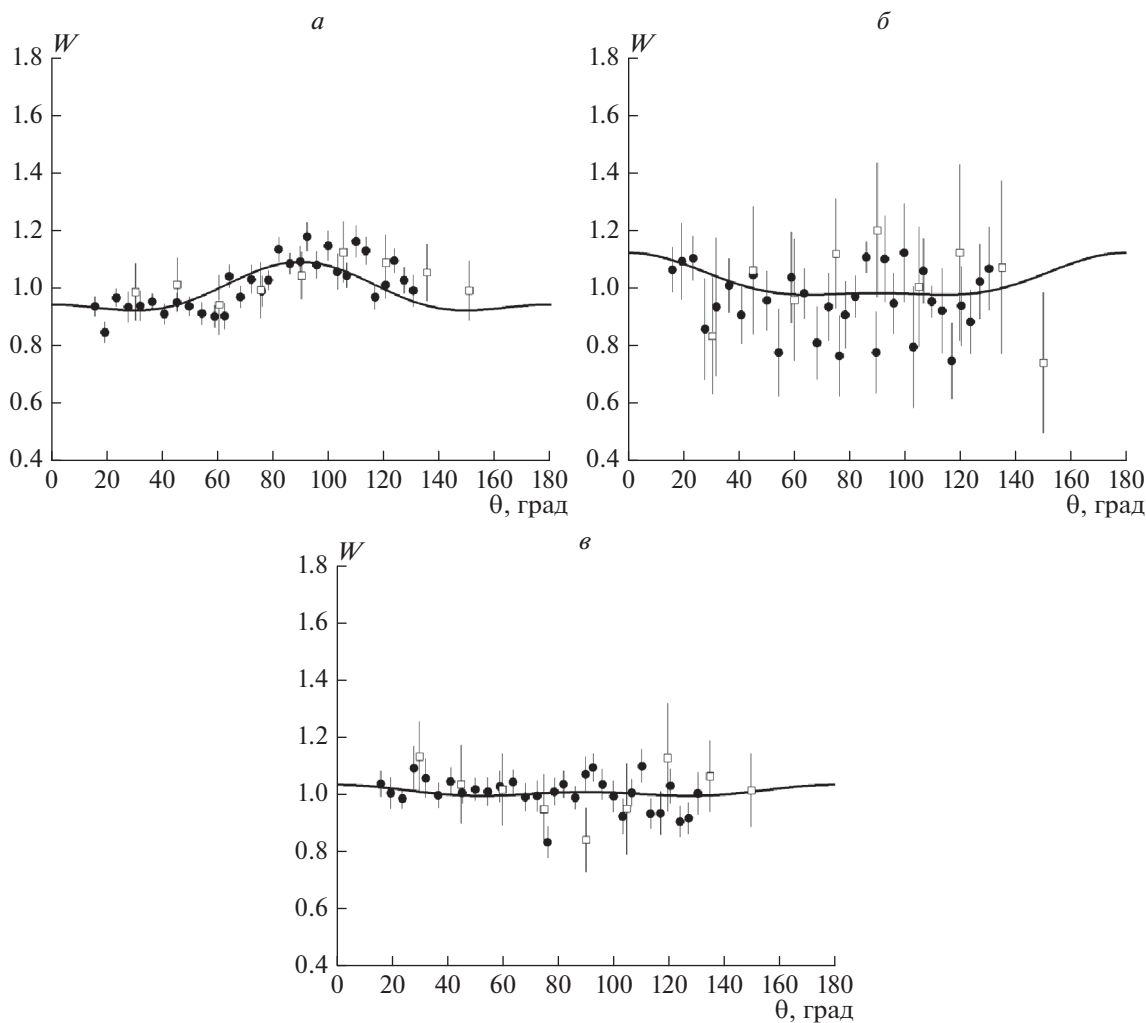


Рис. 4. Угловые распределения γ -квантов для переходов в реакции $^{23}\text{Na}(n, n'\gamma)^{23}\text{Na}$: $E_\gamma = 439.9$ (а), а также γ -квантов $E_\gamma = 656.0$ кэВ из реакции $^{23}\text{Na}(n, \alpha)^{20}\text{F}$ (б) и $E_\gamma = 1274.5$ кэВ из реакции $^{23}\text{Na}(n, d)^{22}\text{Ne}$ (в). На рис. прямоугольники – данные из работы [2]. Сплошная линия соответствует аппроксимации данных полиномами Лежандра по формуле (2).

^{35}Cl (75.78%) и ^{37}Cl (24.22%). Соответственно, в спектре присутствуют пики, образующиеся в результате реакций взаимодействия нейтронов с ^{37}Cl , что также приводит к наличию групп линий, которые невозможно разделить в нашем эксперименте.

В таблицах 1 и 2 также представлены результаты модельных расчетов с использованием программы TALYS 1.9 [17]. Программный код TALYS широко используется для моделирования нейтрон-ядерных реакций, значимым преимуществом этой программы является ее универсальность: она включает современные описания основных механизмов реакций и охватывает широкие диапазоны энергий налетающих частиц (до 200 МэВ) и массовых чисел ядер-мишеней. Можно отметить удовлетворительное соответствие между экспериментальными данными и модельными оценками для переходов, возникающих в реакции $(n, n'\gamma)$ на ядрах ^{23}Na и ^{35}Cl .

Для других типов реакций и тем более для групп трудно разделимых линий результаты моделирования значительно отличаются как от наших результатов, так и от результатов других авторов. Подобные расхождения, как и явный недостаток экспериментальных данных, свидетельствуют о необходимости дальнейшего изучения неупругого взаимодействия нейтронов с данными изотопами.

Угловые распределения γ -квантов для наиболее интенсивных линий в спектре ядра ^{23}Na с энергиями γ -квантов $E_\gamma = 439.9, 656.0$ и 1274.5 кэВ, относящихся к реакциям типа $(n, X\gamma)$, представлены на рис. 4. Угловые распределения γ -квантов для переходов $E_\gamma = 2127.5$ кэВ из реакции $^{35}\text{Cl}(n, d)^{34}\text{S}$ и $E_\gamma = 2645.7$ кэВ из реакции $^{35}\text{Cl}(n, n'\gamma)^{35}\text{Cl}$, представлены на рис. 5.

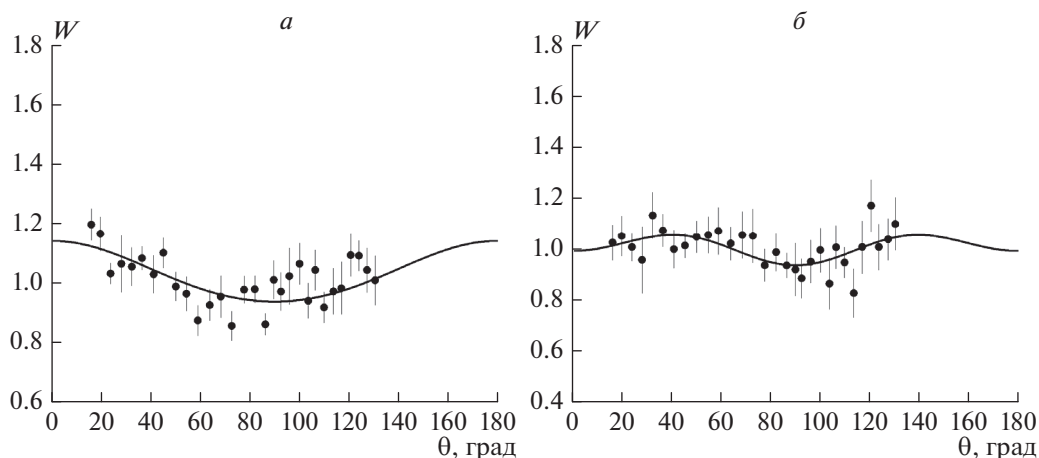


Рис. 5. Угловые распределения γ -квантов для переходов $E_\gamma = 2127.5$ кэВ из реакции $^{35}\text{Cl}(n, d)^{34}\text{S}$ (а) и $E_\gamma = 2645.7$ кэВ из реакции $^{35}\text{Cl}(n, n'\gamma)^{35}\text{Cl}$ (б). Сплошная линия соответствует аппроксимации данных полиномами Лежандра по формуле (3).

Измерения угловых распределений были выполнены на установке “Ромаша” с кольцевой геометрией детекторов ВГО (см. рис. 1). Для уменьшения статистической ошибки проведено усреднение данных, полученных парой детекторов, стоящих под одним и тем же углом рассеяния, но с разных сторон от образца. Сплошная линия соответствует аппроксимации данных полиномами Лежандра по формуле (2).

Полученные параметры угловых корреляции для ^{23}Na представлены в табл. 3 в сравнении с ре-

зультатами [2]. Значения угловых коэффициентов в целом соответствуют полученным ранее данным в случае реакции неупругого рассеяния нейтронов, для других же типов реакций результаты расходятся в большей степени, что говорит о сложности описания данных процессов. Параметры угловых корреляции для наиболее сильных γ -переходов в спектре возбужденных состояний ^{35}Cl , а также ^{35}S и ^{34}S , представлены в табл. 4. Нам не удалось найти более ранних экспериментальных данных для сравнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проекта TANGRA с использованием метода меченых нейтронов получены данные по характеристикам γ -излучения в реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах ^{23}Na и ^{35}Cl . Определены энергии видимых γ -переходов, измерены выходы γ -квантов для переходов, возникающих при облучении натрия и хлора нейтронами с энергией 14.1 МэВ. Для наиболее интенсивных линий определены параметры угловой анизотропии вылета γ -квантов относительно направления нейтронного пучка. Для γ -квантов, образующихся в реакции взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами хлора, угловая анизотропия измерена впервые.

Полученные данные в целом согласуются с известными литературными данными. Экспериментальные данные по реакциям $(n, n'\gamma)$ на изотопах ^{23}Na и ^{35}Cl находятся в хорошем соответствии между собой и с модельными расчетами с использованием программного кода TALYS 1.9. Для реакций с вылетом других частиц (протонов, дейтронов и α -частиц) наблюдаются существенные расхождения как с модельными расчетами, так и

Таблица 3. Коэффициенты разложения по полиномам Лежандра для углового распределения γ -квантов, испускаемых при взаимодействии нейтронов с энергией 14.1 МэВ с ядрами ^{23}Na . Пояснения см. в тексте

E_γ , кэВ	a_2	a_4
439.9	-0.128 ± 0.02 -0.04^*	0.07 ± 0.02 0.01^*
656.0	0.07 ± 0.04 -0.22^*	0.05 ± 0.04 -0.02^*
1274.5	0.008 ± 0.02 0.14^*	0.02 ± 0.03 -0.16^*

* Данные из работы [2].

Таблица 4. Коэффициенты разложения по полиномам Лежандра для углового распределения γ -квантов, испускаемых при взаимодействии нейтронов с энергией 14.1 МэВ с ядрами ^{35}Cl . Пояснения см. в тексте

E_γ , кэВ	a_2	a_4
2127.5	0.131 ± 0.02	0.009 ± 0.03
2645.7	0.07 ± 0.03	-0.08 ± 0.04

в экспериментальных данных между собой. Проведенное сравнение указывает на необходимость как дальнейшего экспериментального изучения неупругих процессов, возникающих при рассеянии быстрых нейтронов на изотопах натрия и хлора, так и уточнения параметров модельного описания исследуемых процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hauser W., Feshbach H. // Phys. Rev. 1952. V. 87. P. 366.
2. Abbondanno U., Giacomich R., Lagonegro M., Pauli G. // J. Nucl. Energy. 1973. V. 27. P. 227.
3. Bendahan J., Loveman R., Gozani T. // Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A. 1994. V. 353. P. 205.
4. Dvorak H.R., Little R.N. // Phys. Rev. 1953. V. 90. P. 618.
5. Yamamoto T., Hino Y., Itagaki Y. et al. // J. Nucl. Sci. Tech. 1978. V. 15. No. 11. P. 797.
6. Быстрицкий В.М., Валкович В., Грозданов Д.Н. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12. С. 486; Bystritsky V.M., Valković V., Grozdanov D.N. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12. P. 325.
7. <http://test.vniia.ru/ng/element.html>.
8. Alexakhin V.Yu., Bystritsky V.M., Zamyatin N.I. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2015. V. 785. P. 9.
9. Грозданов Д.Н., Федоров Н.А., Быстрицкий В.М. и др. // ЯФ. 2018. Т. 81. С. 548; Grozdanov D.N., Fedorov N.A., Bystritsky V.M. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2018. V. 81. P. 588.
10. Fedorov N.A., Grozdanov D.N., Bystritsky V.M. et al. // EPJ Web Conf. 2018. V. 177. Art. No. 02002.
11. Федоров Н.А., Третьякова Т.Ю., Быстрицкий В.М. и др. // ЯФ. 2019. Т. 82. № 4. С. 297; Fedorov N.A., Tretyakova T.Yu., Bystritsky V.M. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2019. V. 82. No. 4. P. 343.
12. Грозданов Д.Н., Федоров Н.А., Копач Ю.Н. и др. // ЯФ. 2020. Т. 83. № 3. С. 200; Grozdanov D.N., Fedorov N.A., Kopatch Yu.N. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2020. V. 83. No. 3. P. 384.
13. Федоров Н.А., Грозданов Д.Н., Копач Ю.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 4. С. 480. Fedorov N.A., Grozdanov D.N., Kopatch Yu.N. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 4. P. 367.
14. Dabylova S., Kopatch Yu.N., Sakhiyev S.K. et al. // Euras. J. Phys. Funct. Mater. 2020. V. 4. No. 3. P. 226.
15. <http://afi.jinr.ru/ADCM16-LTC>.
16. <https://www.nndc.bnl.gov/ensdf>.
17. Koning A.J., Rochman D., Sublet J. et al. // Nucl. Data Sheets. 2019. V. 155. P. 1.
18. <https://geant4.web.cern.ch>.
19. Simakov S., Pavlik A., Vonach H., Hlavac S. INDC(CPP)-0413. Vienna: IAEA Nuclear Data Section, 1998. 62 p.

Measurement of yields and angular distributions of γ -quanta from the interaction of 14.1 MeV neutrons with sodium and chlorine nuclei

S. B. Dabylova^{a, b, *}, Yu. N. Kopach^a, N. A. Fedorov^{a, c}, D. N. Grozdanov^{a, d}, I. N. Ruskov^d, V. R. Skoy^a, C. Hramco^{a, e}, T. Yu. Tretyakova^{a, c, f}, S. K. Sakhiyev^b, R. B. Marzhokhov^a, E. P. Bogolyubov^g, V. I. Zverev^g, Yu. N. Barmakov^g

^aJoint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

^bGumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

^cLomonosov Moscow State University, Department of Physics, Moscow, Russia

^dInstitute for Nuclear Research and Nuclear Energy of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

^eInstitute of Chemistry of Moldova Academy of Science, Kishinev, Moldova

^fLomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, Russia

^gDukhov All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

*e-mail: dabylova_saltanat@mail.ru

The TANGRA setup was used to study the 14.1 MeV neutrons inelastic scattering on ^{23}Na and ^{35}Cl nuclei. In this work, the energies of visible γ -transitions are determined, the yields of γ -quanta are obtained, and the angular distributions of γ -quanta for ^{23}Na and ^{35}Cl are measured. The results obtained are in good agreement with the data of other published experimental works.