

## ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДОВ И УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ $\gamma$ -КВАНТОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 14.1 МэВ С ЯДРАМИ ХРОМА

© 2020 г. Д. Н. Грозданов<sup>1),2)\*</sup>, Н. А. Федоров<sup>1),3)</sup>, Ю. Н. Копач<sup>1)</sup>,  
**В. М. Быстрицкий**<sup>1)</sup>, Т. Ю. Третьякова<sup>1),4)</sup>, И. Н. Русков<sup>2)</sup>, В. Р. Ской<sup>1)</sup>,  
 С. Дабылова<sup>1),5)</sup>, Ф. А. Алиев<sup>1),6)</sup>, К. Храмко<sup>1),7)</sup>, Н. А. Гундорин<sup>1)</sup>, И. Д. Дашков<sup>3)</sup>,  
 Е. П. Боголюбов<sup>8)</sup>, Д. И. Юрков<sup>8)</sup>, В. И. Зверев<sup>8)</sup>, А. Ганди<sup>9)</sup>, А. Кумар<sup>9)</sup>

Поступила в редакцию 25.12.2019 г.; после доработки 25.12.2019 г.; принята к публикации 25.12.2019 г.

При использовании метода меченых нейтронов на установке TANGRA (TAGged Neutrons and Gamma RAys) в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований (ЛНФ ОИЯИ) на стандартном нейтронном генераторе ИНГ-27 проведено исследование реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах хрома. Определены энергии видимых  $\gamma$ -переходов, образующихся в различных реакциях нейтронов с ядрами хрома, и их парциальные сечения. Приведен анализ результатов измерения углового распределения  $\gamma$ -квантов для  $^{52}\text{Cr}$  и сравнение с результатами других опубликованных экспериментальных работ.

DOI: 10.31857/S0044002720030095

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При исследовании процессов с использованием быстрых нейтронов крайне важен учет их неупругого рассеяния. Поскольку в неупругом рассеянии энергетические потери существенно выше, чем в упругом, а угловые распределения продуктов рассеяния значительно различаются, точные данные о неупругом рассеянии быстрых нейтронов, а также сопутствующем ему  $\gamma$ -излучении востребованы для многих технических задач, связанных с радиационной стойкостью материалов, с вопросами дозиметрии и радиационной защиты.

Хром, наряду с железом и никелем, является важным компонентом нержавеющей стали, широко используемой в качестве конструкционного материала в самых различных областях и, в первую очередь, в атомной энергетике. В настоящей работе представлены экспериментальные результаты по изучению  $\gamma$ -излучения, возникающего в неупругом рассеянии монохроматических нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах хрома, в первую очередь на изотопе  $^{52}\text{Cr}$  в силу его высокой распространенности (83.8%).

Благодаря компактности источников нейтронов с энергией 14 МэВ, неупругое рассеяние быстрых нейтронов получило широкое практическое применение [1]. Помимо прикладных задач, информация о реакциях типа  $(n, X\gamma)$ , происходящих при энергии нейтронов 14.1 МэВ на легких и средних по массе ядрах, необходима для фундаментальных исследований тестирования теоретических моделей и для уточнения лежащих в основе модельных расчетов параметризаций [2].

В ЛНФ ОИЯИ в рамках международной коллаборации TANGRA была создана установка для изучения неупругого взаимодействия нейтронов с энергией 14.1 МэВ с атомными ядрами, использующая метод меченых нейтронов (ММН) [3, 4]. Суть данного подхода заключается в следующем: при бомбардировке тритиевой мишени потоком дейтро-

<sup>1)</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

<sup>2)</sup>Институт ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук, София, Болгария.

<sup>3)</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия.

<sup>4)</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия.

<sup>5)</sup>Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан.

<sup>6)</sup>Институт геологии и геофизики Национальной Академии наук Азербайджана, Баку, Азербайджан.

<sup>7)</sup>Институт химии Академии наук Молдовы, Кишинев, Республика Молдова.

<sup>8)</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия.

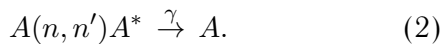
<sup>9)</sup>Бенаресский индуистский университет, Варанаси, Индия.

\*E-mail: dimitar@nf.jinr.ru

нов с энергией порядка 80 кэВ в ходе реакции

$$d(t, \alpha)n \quad (1)$$

образуются быстрые моноэнергетические нейтроны с энергией 14.1 МэВ и  $\alpha$ -частицы с энергией 3.5 МэВ, испускаемые практически в противоположных направлениях. Регистрация  $\alpha$ -частиц происходит в совпадении с характеристическим  $\gamma$ -излучением, возникающим в результате неупругих реакций нейтронов с ядрами мишени, как например:



Таким образом, фиксируя направление вылета  $\alpha$ -частицы, можно определить направление вылета нейтрона. На практике “мечение” нейтрона осуществляется с помощью позиционно-чувствительного  $\alpha$ -детектора, встроенного в нейтронный генератор [5].

Информация о количестве нейтронов, падающих на образец, получаемая с помощью регистрации  $\alpha$ -частиц, сопутствующих образованию нейтронов в реакции (1), числе совпадений  $n$ - $\gamma$ , размерах мишени, а также эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов позволяет корректно определить дифференциальные сечения неупругих реакций нейтронов с ядрами исследуемых изотопов, сопровождающихся испусканием  $\gamma$ -квантов определенных энергий.

Важными преимуществами ММН являются возможность определять число испущенных нейтронов с высокой точностью, а также существенное снижение вклада фоновых событий в получаемые  $\gamma$ -спектры. Основываясь на опыте предыдущих экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов на легких ядрах [6–8], поставленных в рамках проекта TANGRA, в настоящей работе были выполнены измерения выходов и угловых распределений  $\gamma$ -квантов в реакциях типа  $(n, X\gamma)$ , где  $X = n', p, 2n$ , на ядрах хрома.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В проекте “TANGRA” создано несколько многофункциональных конфигураций экспериментальной установки с целью изучения различных характеристик ядерных реакций с нейтронами энергии 14.1 МэВ. Источником нейтронов является портативный генератор меченых нейтронов ИНГ-27, для регистрации  $\gamma$ -излучения используются детекторы  $\gamma$ -квантов различных типов, для записи и предварительной обработки сигналов используется система сбора и анализа данных (DAQ); в зависимости от цели эксперимента в состав установки также могут входить коллиматор и профилометр пучка быстрых нейтронов. Было разработано три системы детектирования

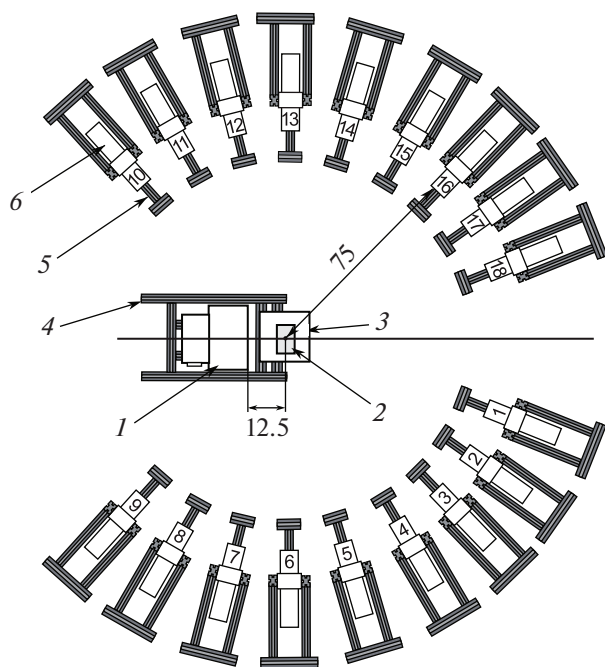
$\gamma$ -квантов: “Ромашка” на основе детекторов NaI [9], “Ромаша” с применением детекторов из кристаллов германата висмута  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO) с возможностью расположения их в кольцевой геометрии [6] либо вариант с использованием детектора из сверхчистого германия (HPGe). Изучение реакции неупругого рассеяния нейтронов на Cr проводилось с использованием детектирующей системы “Ромаша” и конфигурации с детектором HPGe.

Портативный нейтронный генератор ИНГ-27 производства ФГУП “ВНИИА” имеет встроенный 64-канальный кремниевый  $\alpha$ -детектор, разделенный на восемь стрипов как в горизонтальном, так и вертикальном направлении, благодаря чему формируется 64 пучка меченых нейтронов с энергией 14.1 МэВ. В проведенных измерениях из-за особенности геометрии образца были использованы только четыре центральных стрипа по горизонтали и восемь стрипов по вертикали (всего 32 пучка). Нейтронная трубка в ее основной модификации создает поток нейтронов, максимальная интенсивность которого составляет  $5 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$  в  $4\pi$ -геометрии.

Установка проекта TANGRA на основе спектрометра “Ромаша” (рис. 1) состоит из 18 сцинтилляционных  $\gamma$ -детекторов на основе кристаллов BGO диаметром 76 мм и толщиной 65 мм. Детекторы  $\gamma$ -квантов расположены в горизонтальной плоскости по окружности радиусом 750 мм и шагом по углу  $14^\circ$ . В данной конфигурации отсутствует дополнительная пассивная коллимация нейтронного пучка, падающего на мишень, что позволяет сократить расстояние от источника нейтронов до исследуемого образца до 125 мм.

Для получения энергетических спектров высокого разрешения использовался  $\gamma$ -детектор на основе HPGe диаметром 57.5 мм и толщиной 66.6 мм (рис. 2). Детектор располагался на минимально возможном расстоянии от образца, что исключало попадание прямых меченых нейтронов в детектор. Для уменьшения фона от прямых нейтронов и защиты детектора от повреждения быстрыми нейтронами использовался свинцовый коллиматор.

В качестве образца был применен порошокобразный оксид хрома (III) ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) естественного изотопного состава, помещенный в прямоугольный алюминиевый контейнер размером  $6 \times 6 \times 14 \text{ см}^3$ . Высота контейнера (14 см) была выбрана для захвата восьми меченых пучков нейтронов по вертикали. Так как детекторы  $\gamma$ -квантов располагались в горизонтальной плоскости, соответствующие размеры контейнера были оптимизированы с целью минимизации поглощения  $\gamma$ -квантов в образце. В программном пакете GEANT4 (GEometry ANd

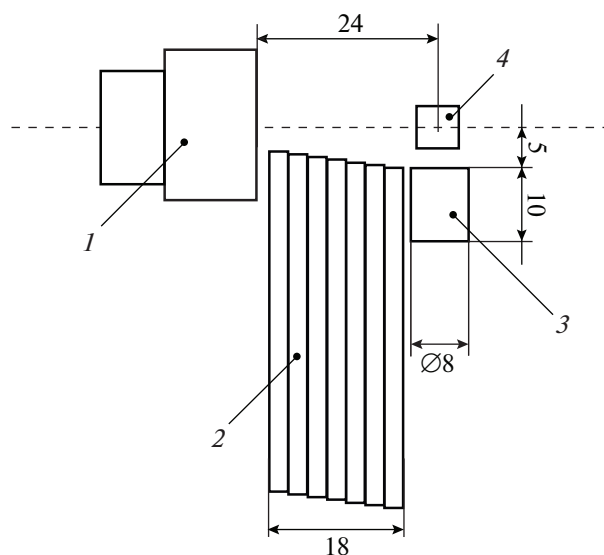


**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки “Ромашка”: 1 — нейтронный генератор ИНГ-27, 2 — мишень, 3 — держатель мишени, 4 — алюминиевая рама установки, 5 — подставки для детекторов  $\gamma$ -излучения, 6 — детекторы  $\gamma$ -излучения, пронумерованные от 1 до 18. Расстояния даны в см.

Tracking) было проведено моделирование эксперимента с целью оценки поглощения и рассеяния  $\gamma$ -квантов и нейтронов в мишени, показавшее, что для всех используемых меченых пучков искажение наблюдаемой анизотропии излучения  $\gamma$ -квантов в случае выбранных размеров контейнера не превышает 20%. Образец располагался на легкой алюминиевой подставке. Для определения фоновой составляющей в  $\gamma$ -спектрах, возникающей в результате взаимодействия нейтронов с подставкой и другими конструкционными материалами установки, проводилось отдельное измерение без образца.

Все детекторы были прокалиброваны с помощью стандартных источников  $\gamma$ -излучения. Для сцинтилляционных детекторов ВГО, у которых световой выход и, соответственно, энергетическая калибровка не очень стабильны и зависят от температуры, загрузки и других внешних факторов, применялась дополнительная калибровка в реальном времени с использованием известных фоновых линий, регистрируемых при измерении с образцом.

Для сбора и предварительного анализа данных использовался компьютер с оцифровщиком ADCM-32 на основе двух 16-канальных плат ADCM-16 [10].

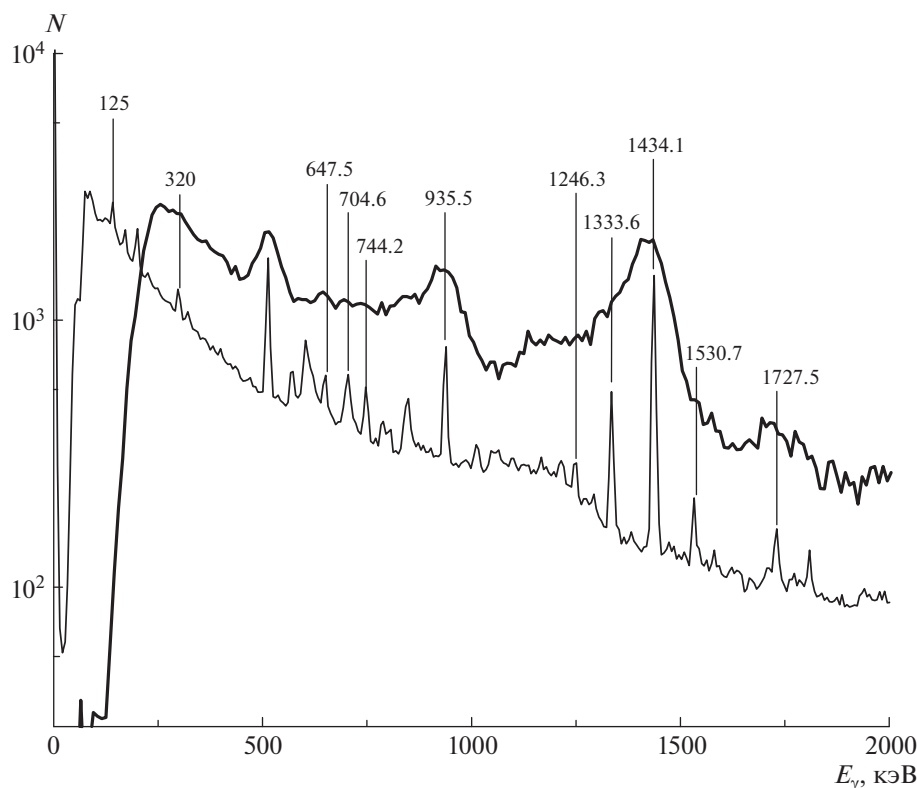


**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки с HPGe: 1 — нейтронный генератор ИНГ-27, 2 — свинцовая защита, 3 — HPGe  $\gamma$ -детектор, 4 — образец. Расстояния даны в см.

### 3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Экспериментальные спектры  $\gamma$ -квантов, полученные в совпадении с мечеными нейтронами с использованием детектора HPGe и одного из детекторов ВГО, приведены на рис. 3. В эксперименте с HPGe-детектором проводилось определение энергий  $\gamma$ -переходов, возникающих при взаимодействии нейтронов с энергией 14.1 МэВ с образцом, а также парциальных сечений (вероятностей наблюдения) этих переходов. Испускаемые образцом  $\gamma$ -кванты идентифицировались путем сравнения  $\gamma$ -спектров в окне совпадений с мечеными нейтронами, где присутствовали как линии, возникающие в исследуемой реакции на хrome, так и фоновые линии, а вне этого окна — содержащие только фоновые линии. Для анализа идентифицированных линий хрома измеренный энергетический спектр разбивался на участки, которые были аппроксимированы функцией, состоящей из суммы плавной подложки и функций Гаусса, соответствующих каждому из присутствующих на участке пиков. Выходы отдельных  $\gamma$ -линий определялись из площадей под соответствующими гауссианами с учетом эффективности  $\gamma$ -детектора и вероятности поглощения  $\gamma$ -квантов в образце. Поправочные коэффициенты были рассчитаны с помощью программного пакета GEANT4.

Определение параметров угловых распределений  $\gamma$ -квантов относительно направления падающего пучка нейтронов проводилось в эксперименте с детекторной системой “Ромашка” на основе сцинтилляторов ВГО. Поскольку энергетическое



**Рис. 3.** Спектры  $\gamma$ -излучения, полученные при облучении образца Сг нейтронами с энергией 14.1 МэВ. Кривые: жирная — спектр, измеренный с помощью сцинтилляционного детектора ВГО; тонкая — с детектором HPGe.

разрешение детекторов ВГО не позволяет эффективно разделять пики полного поглощения  $\gamma$ -квантов близких энергий, угловые распределения были определены только для наиболее сильных  $\gamma$ -переходов. Измеренные энергетические спектры для каждого угла аппроксимировались с помощью метода наименьших квадратов функцией, содержащей подложку от случайных совпадений, вклад от взаимодействия нейтронов с детекторами ВГО и набор гауссианов в соответствии с наблюдаемыми пиками. Относительные вероятности испускания  $\gamma$ -квантов заданной энергии для данного угла определялись из площади под соответствующим гауссианом. Необходимые поправки на поглощение  $\gamma$ -квантов в образце, а также эффективные телесные углы для каждого детектора были получены в результате моделирования в GEANT4.

Для количественного описания анизотропии углового распределения  $\gamma$ -квантов вводится параметр анизотропии  $W(\theta)$ , определяемый следующим образом:

$$\frac{d\sigma_\gamma}{d\Omega} = \frac{\sigma_\gamma}{4\pi} W(\theta). \quad (3)$$

Полученные угловые распределения  $\gamma$ -квантов обычно аппроксимируются разложением по поли-

номам Лежандра:

$$W(\theta) = 1 + \sum_{i=2}^{2J} a_i P_i(\cos \theta), \quad (4)$$

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

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектры  $\gamma$ -квантов, образующихся при взаимодействии нейтронов с энергией 14.1 МэВ с ядрами Сг, приведены на рис. 3 с указанием значений энергии наиболее сильных идентифицированных нами  $\gamma$ -переходов. В эксперименте с использованием HPGe-детектора были выделены десять  $\gamma$ -переходов, соответствующих реакциям типа  $(n, X\gamma)$ , на ядрах наиболее распространенного изотопа хрома  $^{52}\text{Cr}$ . Список выделенных  $\gamma$ -линий с указанием реакции, в ходе которой они были испущены, приведен в табл. 1. В таблице также приведены энергии  $\gamma$ -квантов и характеристики начального и конечного состояния ядра для соответствующих переходов из базы ядерных данных Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF) [11].

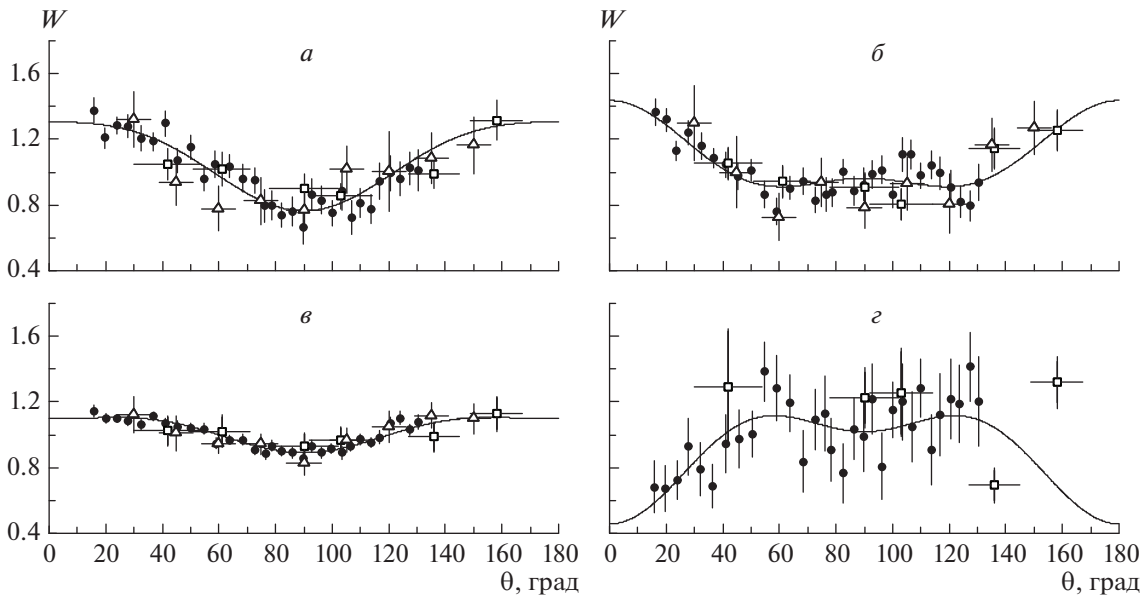


Рис. 4. Угловые распределения  $\gamma$ -квантов для переходов в  $^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$   $E_\gamma = 935.5$  кэВ (а), 1333.7 кэВ (б), 1434.1 кэВ (в) и 1530.7 кэВ (г). Треугольники — данные из работы [12], квадраты — данные из работы [14]; сплошная кривая — аппроксимация данных полиномами Лежандра по формуле (4).

В табл. 1 приведены определенные в эксперименте парциальные сечения для соответствующих  $\gamma$ -линий в сравнении с данными [12] ( $E_n = 14.2$  МэВ), [13] ( $E_n = 14.8$  МэВ) и [14] ( $E_n = 14.6$  МэВ). Приведенные в табл. 1 статистические погрешности для полученных в данном эксперименте парциальных сечений соответствуют одному стандартному отклонению. Систематические погрешности обусловлены неизбежными расхождениями геометрических и спектрометрических параметров реальной установки и ее модели, использованной для расчета поправок при анализе данных. Расхождение с результатами других экспериментов может быть связано, в частности, с наличием систематических погрешностей как в нашей работе, так и в этих работах. Энергетическое разрешение нашего эксперимента не позволяет разделить линии с  $E_\gamma = 124.45$  и  $125.08$  кэВ, образующиеся в реакции  $^{52}\text{Cr}(n, p)^{52}\text{V}$ , а также линии с  $E_\gamma = 744.233$  и  $749.07$  кэВ, соответствующие реакциям  $^{52}\text{Cr}(n, n)^{52}\text{Cr}$  и  $^{52}\text{Cr}(n, 2n)^{52}\text{Cr}$ .

Для сравнения с полученными парциальными сечениями в табл. 1 также приведены результаты модельных расчетов, выполненных нами с использованием программы TALYS 1.9 [15]. Ранее в [2] было выполнено подробное сравнение результатов расчетов по коду TALYS 0.64 (2004 г.) и экспериментальных данных по неупругому рассеянию нейтронов на изотопе  $^{52}\text{Cr}$  в широком диапазоне энергий  $E_n < 18$  МэВ. Было отмечено хорошее совпадение модельных расчетов и экспериментальных данных при энергиях нейтронов  $E_n <$

$< 4$  МэВ и увеличение расхождений при описании результатов при  $E_n$  выше 10 МэВ. Вслед за результатами [2] сравнение данных нашего эксперимента с модельными расчетами также демонстрирует систематическую недооценку сечений рождения  $\gamma$ -квантов для большинства  $\gamma$ -переходов. Однако в целом расчеты с использованием кода TALYS 1.9 хорошо описывают полученные сечения рождения  $\gamma$ -квантов в реакции  $^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$ . Важно отметить, что расхождение между оценками и экспериментальными данными для наиболее интенсивных переходов ( $E_\gamma = 935.5, 1333.6$  и  $1434.1$  кэВ), дающих основной вклад в полное сечение рождения  $\gamma$ -квантов, не превышает 18%. Неудовлетворительное описание отдельных переходов может быть связано с недостаточно точными данными по коэффициентам ветвления в используемых при расчетах базах данных по дискретным ядерным уровням [2], что лишний раз свидетельствует о необходимости уточнения имеющейся экспериментальной информации.

Угловые распределения  $\gamma$ -квантов, полученные для наиболее интенсивных линий с  $E_\gamma = 935.5$  кэВ ( $4_1^+ \xrightarrow{E2} 2_1^+$ ), 1333.6 кэВ ( $4_2^+ \xrightarrow{E2} 2_1^+$ ), 1434.1 кэВ ( $2_1^+ \xrightarrow{E2} 0_{g.s.}^+$ ) и 1530.7 кэВ ( $2_2^+ \xrightarrow{M1+E2} 2_1^+$ ), относящихся к реакции  $^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$ , представлены на рис. 4. Измерения были выполнены на установке “Ромаша” с кольцевой геометрией детекторов ВГО. Для уменьшения статистической ошибки проведено усреднение данных, полученных парой детекторов, стоящих под одним и тем же

**Таблица 1.** Энергии  $\gamma$ -переходов  $E_\gamma$ , наблюдаемых при облучении нейтронами ядер Cr в сравнении с данными ENSDF [11] (указаны: реакция образования перехода, энергия возбуждения  $E^*$ , спин и четность  $J^\pi$  начального ( $i$ ) и конечного ( $f$ ) состояний; парциальные сечения со статистической ошибкой приведены в сравнении с расчетами с использованием TALYS 1.9 и экспериментальными результатами работ [12–14]; жирным шрифтом выделены переходы, для которых определены угловые распределения)

$E_\gamma$ , кэВ (настоящая работа)	$E_\gamma$ , кэВ [11]	Реакция	$E_i^*$ , кэВ $J_i^\pi$	$E_f^*$ , кэВ $J_f^\pi$	$\sigma$ , мбн				
					настоящая работа	TALYS	[12]	[13]	[14]
126 ± 3	124.45	$^{52}\text{Cr}(n, p)^{52}\text{V}$	141.61, 1 <sup>+</sup>	17.155, 2 <sup>+</sup> , 3 <sup>+</sup>	28 ± 2	7.6			
	125.08	$^{52}\text{Cr}(n, p)^{52}\text{V}$	147.84, 4 <sup>+</sup>	22.76, 4, 5 <sup>+</sup>		14.4			
321 ± 3	320.1	$^{52}\text{Cr}(n, d)^{51}\text{V}$	320.1, 5/2 <sup>+</sup>	0.0, 7/2 <sup>-</sup>	25 ± 3	10.3			14 ± 1
648 ± 3	647.47	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	3415.32, 4 <sup>+</sup>	2767.77, 4 <sup>+</sup>	77 ± 3	12.2			70 ± 4
747 ± 3	744.23	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	3113.86, 6 <sup>+</sup>	2369.63, 4 <sup>+</sup>	92 ± 3	63.5		128 ± 21	71 ± 4
	749.07	$^{52}\text{Cr}(n, 2n)^{51}\text{Cr}$	749.1, 3/2 <sup>+</sup>	0.0, 7/2 <sup>+</sup>		45.5			42 ± 1
<b>937 ± 3</b>	935.54	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	2369.63, 4 <sup>+</sup>	1434.09, 2 <sup>+</sup>	254 ± 4	236.9	221 ± 31	211 ± 26	237 ± 9
1249 ± 3	1246.28	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	3615.92, 5 <sup>+</sup>	2369.63, 4 <sup>+</sup>	46 ± 3	21.87			39 ± 4
<b>1335 ± 3</b>	1333.65	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	2767.77, 4 <sup>+</sup>	1434.09, 2 <sup>+</sup>	200 ± 4	163.1	239 ± 36	173 ± 29	205 ± 8
<b>1436 ± 3</b>	1434.07	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	1434.09, 2 <sup>+</sup>	0.0, 0 <sup>+</sup>	785 ± 6	761.5	757 ± 56	738 ± 51	783 ± 30
<b>1533 ± 3</b>	1530.67	$^{52}\text{Cr}(n, 2n)^{51}\text{Cr}$	2964.79, 2 <sup>+</sup>	1434.09, 2 <sup>+</sup>	54 ± 5	32.9		74 ± 23	40 ± 3
1728 ± 3	1727.53	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	3161.74, 2 <sup>+</sup>	1434.09, 2 <sup>+</sup>	39 ± 3	18.9			26 ± 4
2040 ± 5	2038	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	3472.25, 3 <sup>+</sup>	1434.09, 2 <sup>+</sup>	18 ± 3	11.8			
2339 ± 5	2337.44	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	3771.72, 2 <sup>+</sup>	1434.09, 2 <sup>+</sup>	14 ± 3	20.1			

**Таблица 2.** Коэффициенты разложения по полиномам Лежандра для углового распределения  $\gamma$ -квантов, испускаемых в реакции  $^{52}\text{Cr}(n, n'\gamma)^{52}\text{Cr}$

$E_\gamma$ , кэВ	$a_2$			$a_4$		
	Настоящая работа	[12]	[14]	Настоящая работа	[12]	[14]
935.5	0.365 ± 0.029	0.379	0.31 ± 0.09	-0.084 ± 0.043	0.153	0.12 ± 0.12
1333.7	0.125 ± 0.030	0.476	0.31 ± 0.09	0.144 ± 0.044	0.249	0.04 ± 0.12
1434.1	0.158 ± 0.013	0.173	0.12 ± 0.08	-0.042 ± 0.018	-0.077	0.04 ± 0.11
1530.7	-0.001 ± 0.092		0.04 ± 0.15	-0.07 ± 0.14		0.74 ± 0.18

углом рассеяния. Сплошная линия соответствует аппроксимации данных полиномами Лежандра по формуле (4). Полученные параметры угловых корреляций представлены в табл. 2 в сравнении с результатами [12] при  $E_n = 14.2$  МэВ и работы [14] ( $E_n = 14.6$  МэВ). Следует отметить, что

в проведенном эксперименте удалось уменьшить неопределенность в получении коэффициентов углового распределения. Значения коэффициентов  $a_2$  для всех  $\gamma$ -линий, кроме 1333.6 кэВ, находятся в хорошем соответствии между собой. Существенная неопределенность в значениях  $a_4$ , полученных

в работе [14], не позволяет обсуждать степень расхождения результатов вплоть до определения знака данного коэффициента.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На установке TANGRA с использованием метода меченых нейтронов на пучке стандартного портавного нейтронного генератора ИНГ-27 проведено исследование реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах хрома.

Было идентифицировано девять  $\gamma$ -переходов, соответствующих реакции неупругого рассеяния нейтронов на  $^{52}\text{Cr}$ , а также несколько переходов, связанных с реакциями  $^{52}\text{Cr}(n, p)^{52}\text{V}$ ,  $^{52}\text{Cr}(n, d)^{51}\text{V}$  и  $^{52}\text{Cr}(n, 2n)^{51}\text{Cr}$ . Сравнение полученных парциальных сечений образования  $\gamma$ -квантов для наблюдаемых переходов с данными других экспериментов и модельными расчетами по коду TALYS 1.9 показало хорошее соответствие между собой как экспериментальных, так и расчетных сечений для наиболее интенсивных переходов с  $E_\gamma = 935.5$ , 1333.6 и 1434.1 кэВ при некотором занижении сечений в модельных расчетах. Более явные расхождения полученных результатов для остальных линий свидетельствуют о необходимости уточнения экспериментальных данных по дискретным  $\gamma$ -линиям, используемым в базах данных.

Для наиболее интенсивных линий с  $E_\gamma = 935.5$ , 1333.6, 1434.1 и 1530.7 кэВ, относящихся к реакции  $^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$ , определены параметры угловой анизотропии вылета  $\gamma$ -квантов относительно направления нейтронного пучка. Полученные значения параметров в целом согласуются с известными литературными данными, однако для некоторых линий наблюдаются существенные различия преимущественно в определении коэффициента  $a_4$ . Следует отметить, что использованная нами методика эксперимента позволила повысить точность определения параметров угловой анизотропии  $\gamma$ -квантов и существенно уменьшить неопределенность значений данного коэффициента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Valković, *14 MeV Neutrons. Physics and Applications* (Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2016).
2. L. C. Mihailescu, C. Borcea, A. J. Koning, and A. J. M. Plompen, *Nucl. Phys. A* **786**, 1 (2007).
3. В. М. Быстрицкий, В. Валкович, Д. Н. Грозданов, А. О. Зонтиков, И. Ж. Иванов, Ю. Н. Копач, А. Р. Крылов, Ю. Н. Рогов, И. Н. Русков, М. Г. Сапожников, В. Р. Ской, В. Н. Швецов, *Письма в ЭЧАЯ* **12**, 486 (2015) [*Phys. Part. Nucl. Lett.* **12**, 325 (2015)].
4. I. N. Ruskov, Yu. N. Kopatch, V. M. Bystritsky, V. R. Skoy, V. N. Shvetsov, F. J. Hamsch, S. Oberstedt, R. Capote Noy, P. V. Sedyshev, D. N. Grozdanov, I. Zh. Ivanov, V. Yu. Aleksakhin, E. P. Bogolubov, Yu. N. Barmakov, S. V. Khabarov, A. V. Krasnoperov, A. R. Krylov, *et al.*, *Phys. Proc.* **64**, 163 (2015).
5. V. Yu. Alexakhin, V. M. Bystritsky, N. I. Zamyatin, E. V. Zubarev, A. V. Krasnoperov, V. L. Rapatsky, Yu. N. Rogov, A. B. Sadovsky, A. V. Salamatin, R. A. Salmin, M. G. Sapozhnikov, V. M. Slepnev, S. V. Khabarov, E. A. Razinkov, O. G. Tarasov, and G. M. Nikitin, *Nucl. Instrum. Methods A* **785**, 9 (2015).
6. Д. Н. Грозданов, Н. А. Федоров, В. М. Быстрицкий, Ю. Н. Копач, И. Н. Русков, В. Р. Ской, Т. Ю. Третьякова, Н. И. Замятин, Д. Ван, Ф. А. Алиев, К. Храмко, А. Ганди, А. Кумар, С. Дабылова, Е. П. Боголюбов, Ю. Н. Бармаков, *ЯФ* **81**, 548 (2018) [*Phys. At. Nucl.* **81**, 588 (2018)].
7. N. A. Fedorov, D. N. Grozdanov, V. M. Bystritsky, Yu. N. Kopach, I. N. Ruskov, V. R. Skoy, T. Yu. Tretyakova, N. I. Zamyatin, D. Wang, F. A. Aliev, C. Hramco, A. Gandhi, A. Kumar, S. Dabylova, E. P. Bogolubov, and Yu. N. Barmakov, *EPJ Web Conf.* **177**, 02002 (2018).
8. Н. А. Федоров, Т. Ю. Третьякова, В. М. Быстрицкий, Ю. Н. Копач, И. Н. Русков, В. Р. Ской, Д. Н. Грозданов, Н. И. Замятин, В. Дунмин, Ф. А. Алиев, К. Храмко, А. Кумар, А. Ганди, С. Дабылова, Д. И. Юрков, Ю. Н. Бармаков, *ЯФ* **82**, 297 (2019) [*Phys. At. Nucl.* **82**, 343 (2019)].
9. В. М. Быстрицкий, Д. Н. Грозданов, А. О. Зонтиков, Ю. Н. Копач, Ю. Н. Рогов, И. Н. Русков, А. Б. Садовский, В. Р. Ской, Ю. Н. Бармаков, Е. П. Боголюбов, В. И. Рыжков, Д. И. Юрков, *Письма в ЭЧАЯ* **13**, 793 (2016) [*Phys. Part. Nucl. Lett.* **13**, 504 (2016)].
10. <http://afi.jinr.ru/ADCM16- LTC>
11. Y. Dong and H. Junde, *Nucl. Data Sheets* **128**, 185 (2015).
12. U. Abbondanno, R. Giacomich, M. Lagonegro, and G. Pauli, *J. Nucl. Energy* **27**, 227 (1973).
13. T. Yamamoto, Y. Hino, S. Itagaki, and K. Sugiyama, *J. Nucl. Sci. Technol.* **15**, 797 (1978).
14. P. Obložinský, S. Hlaváč, G. Maino, and A. Mengoni, *Nuovo Cimento A* **105**, 965 (1992).
15. A. J. Koning, D. Rochman, J.-Ch. Sublet, N. Dzy-siuk, M. Fleming, and S. van der Marck, *Nucl. Data Sheets* **155**, 1 (2019).

# MEASUREMENT OF YIELDS AND ANGULAR DISTRIBUTIONS OF $\gamma$ QUANTA FROM THE INTERACTION OF 14.1-MeV NEUTRONS WITH CHROMIUM

D. N. Grozdanov<sup>1),2)</sup>, N. A. Fedorov<sup>1),3)</sup>, Yu. N. Kopatch<sup>1)</sup>, **V. M. Bystritsky<sup>1)</sup>**,  
T. Yu. Tretyakova<sup>1),4)</sup>, I. N. Ruskov<sup>2)</sup>, V. R. Skoy<sup>1)</sup>, S. Dabylova<sup>1),5)</sup>, F. A. Aliev<sup>1),6)</sup>,  
K. Hramco<sup>1),7)</sup>, N. A. Gundorin<sup>1)</sup>, I. D. Dashkov<sup>3)</sup>, E. P. Bogolyubov<sup>8)</sup>, D. I. Yurkov<sup>8)</sup>,  
V. I. Zverev<sup>8)</sup>, A. Gandhi<sup>9)</sup>, A. Kumar<sup>9)</sup>

<sup>1)</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

<sup>2)</sup>Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

<sup>3)</sup>Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>4)</sup>Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>5)</sup>L. N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

<sup>6)</sup>Institute of Geology and Geophysics Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

<sup>7)</sup>Institute of Chemistry of Moldova Academy of Sciences, Chisinau, Republic of Moldova

<sup>8)</sup>Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

<sup>9)</sup>Banaras Hindu University, Varanasi, India

Using the tagged neutron method at the TANGRA (TAGged Neutrons and Gamma RAYs) facility at Frank Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research (JINR) based on the ING-27 standard neutron generator, a study of the 14.1-MeV inelastic neutron scattering reaction on chromium nuclei was carried out. The energies of visible gamma transitions formed in various reactions of neutrons with chromium nuclei and their partial cross sections are determined. The analysis of the results of  $\gamma$ -quanta angular distribution measuring for  $^{52}\text{Cr}$  and a comparison with the results of other published experimental works are presented.