

## Изучение взаимодействия нейтронов с энергией 14 МэВ с ядрами С, Mg, Cr

И. Д. Дашков<sup>1,\*</sup>, Н. А. Федоров<sup>1,2,†</sup>, Д. Н. Грозданов<sup>2,3</sup>, Ю. Н. Копач<sup>2</sup>, И. Н. Русков<sup>3</sup>, В. Р. Ской<sup>2</sup>, Т. Ю. Третьякова<sup>4,2</sup>, Ф. А. Алиев<sup>2,5</sup>, С. Дабылова<sup>2,6</sup>, Н. А. Гундорин<sup>2</sup>, К. Храмко<sup>2,7</sup>, коллаборация TANGRA

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей ядерной физики  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>2</sup>Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований. Россия, 141980, Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

<sup>3</sup>Институт ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук. Болгария, 1784, София, бул. Цариградское шоссе, д. 72

<sup>4</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>5</sup>Институт геологии и геофизики Национальной Академии наук Азербайджана. Азербайджан, AZ1143, Баку, Пр. Г.Джавида, д. 119

<sup>6</sup>Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева. Казахстан, 010008, Нур-Султан, ул. Сатпаева, д. 2

<sup>7</sup>Институт химии Академии наук Молдовы. Республика Молдова, MD-2028, Кишинев, ул. Академическая, д. 3  
(Статья поступила 25.03.2020; подписана в печать 26.03.2020)

Данная работа посвящена исследованию ядерных реакций  $n+^{12}\text{C}$ ,  $n+^{24}\text{Mg}$ ,  $n+^{52}\text{Cr}$  при энергии нейтрона 14.1 МэВ. Были выполнены расчеты характеристик этих реакций с помощью программного кода TALYS с целью определения перспектив его дальнейшего использования для интерпретации данных, получаемых в эксперименте TANGRA. Экспериментальная установка TANGRA (TAGged Neutron and Gamma RAys) создана и используется в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований для измерения угловых и энергетических распределений  $\gamma$ -квантов, излучаемых атомными ядрами в реакциях типа  $(n, x\gamma)$ . Обсуждаются результаты расчета с использованием TALYS и их сравнение с имеющимися экспериментальными данными.

PACS: 25.40.Fq

УДК: 539.172.4

Ключевые слова: неупругое рассеяние нейтронов,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{52}\text{Cr}$ .

## ВВЕДЕНИЕ

Реакции под действием быстрых нейтронов, в частности, с энергией около 14 МэВ, имеют широкое практическое применение. Исследование механизма этих реакций дает возможность улучшить наши знания о структуре атомных ядер. Значительно возросший в последние годы интерес к данным процессам связан также с разработкой реакторов на быстрых нейтронах [1]. Для расчета конструктивных элементов такого рода промышленных установок требуется максимально точные базы экспериментальных данных и программы, позволяющие моделировать реакции взаимодействия быстрых нейтронов с соответствующими атомными ядрами.

Одним из проектов, который изучает взаимодействие быстрых нейтронов с энергией 14.1 МэВ с различными атомными ядрами, является проект TANGRA [3], реализуемый в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований (ЛНФ ОИЯИ). Эксперименталь-

ная установка, используемая в этом проекте, позволяет измерять угловые и энергетические распределения  $\gamma$ -квантов, испускаемых образцом-мишенью в реакциях типа  $(n, x\gamma)$ .

Важной задачей проекта TANGRA является модельное описание данных по сечениям испускания  $\gamma$ -квантов и их угловых распределений. В силу того, что программа TALYS 1.9 [2] весьма универсальна и включает в себя множество различных моделей (оптическая модель, DWBA (борновское приближение с искаженными волнами), модель связанных каналов для прямых реакций, модель Хаузера-Фешбаха, учет флуктуации ширины для сложных реакций, несколько моделей плотности ядерных уровней), ее использование в качестве отправной точки для вычисления измеряемых в проекте характеристик представляется весьма перспективным.

В данной работе проводится сравнение расчетных характеристик нейтрон-ядерных реакций с полученными экспериментально для ядер  $^{12}\text{C}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{52}\text{Cr}$ , которое позволит оценить динамику расхождения модельных расчетов с экспериментальными данными по мере продвижения от легких ядер к тяжелым, и оценить перспективы использования TALYS 1.9 для интерпретации данных, получаемых в проекте TANGRA.

\*E-mail: [daschkov.id15@physics.msu.ru](mailto:daschkov.id15@physics.msu.ru)

†E-mail: [na.fedorov@physics.msu.ru](mailto:na.fedorov@physics.msu.ru)

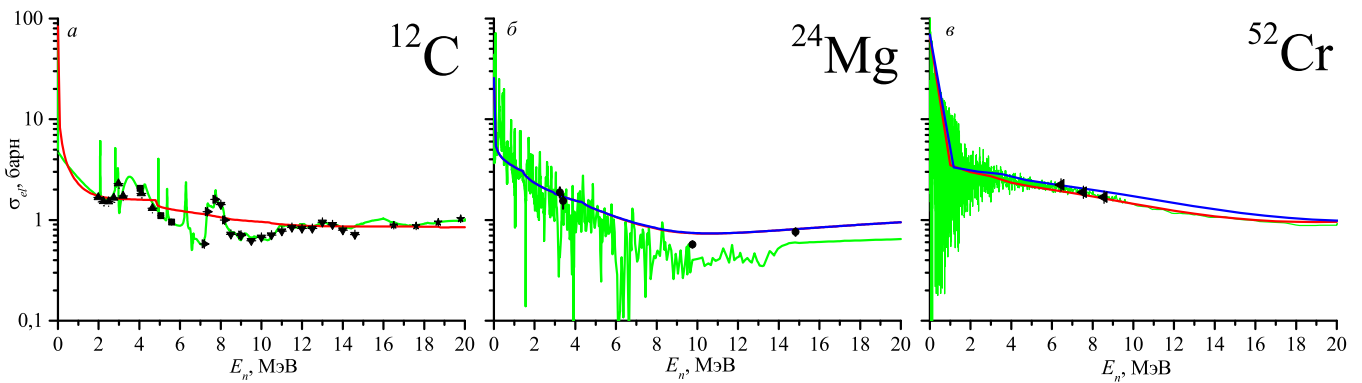


Рис. 1: Энергетическая зависимость сечения упругого рассеяния нейтронов  $\sigma_{el}$ : *a* — для  $^{12}\text{C}$  (экспериментальные данные: ■ — [5], ► — [6], ▲ — [7], ▼ — [8], ★ — [9]), *б* — для  $^{24}\text{Mg}$  (● — [10]), *в* — для  $^{52}\text{Cr}$  (◄ — [11]). Зеленая линия — оценка ENDF/B-VIII.0 [12]. Красная линия — расчет в TALYS 1.9 с использованием параметров по умолчанию, синяя линия — с использованием «лучших параметров».

## 1. УСТАНОВКА TANGRA

Установка TANGRA включает в себя портативный генератор меченых нейтронов с энергией 14.1 МэВ ИНГ-27, одну из трёх систем детектирования (Romashka, Romasha, HPGe) и систему сбора и анализа данных (DAQ) [3].

Одним из преимуществ установки является реализация в ней метода меченых нейтронов (ММН). Его суть заключается в следующем: при бомбардировке обогащенной тритием мишени потоком дейтронов в ходе реакции  $d(t, ^4\text{He})n$  образуются быстрые моноэнергетические нейтроны с энергией близкой к 14.1 МэВ, и  $\alpha$ -частицы с энергией около 3.5 МэВ. Они разлетаются из точки рождения под углом, близким к  $180^\circ$ . 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 ИНГ-27. Регистрация  $\alpha$ -частиц происходит в совпадении с характеристическим  $\gamma$ -излучением, возникающим в результате снятия возбуждения с ядер-продуктов реакции. Использование  $\alpha - \gamma$  совпадений с последующим анализом их временных распределений позволяет выделить события, соответствующие реакциям в образце, и таким образом существенно снизить вклад фоновых событий в результирующие  $\gamma$ -спектры.

## 2. СЕЧЕНИЕ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ

### 2.1. Упругое рассеяние

Упругое рассеяние нейтронов — процесс, в ходе которого не меняется внутренняя энергия ядра-мишени. Он может осуществляться посредством двух различных механизмов. В первом случае образуется составное ядро, во втором случае рассеяние происходит

без образования составного ядра на ядерном потенциале. Для теоретического описания прямого процесса успешно применяется оптическая модель, позволяющая варьировать параметры оптического потенциала индивидуально под каждое ядро. При этом возможно использование глобальной параметризации оптического потенциала от  $A$  и  $Z$  [4]. Для большого числа ядер во входных данных программы TALYS определены так называемые «лучшие параметры», полученные при подгонке экспериментальных данных по конкретным изотопам.

На рис. 1 представлены сечения упругого рассеяния нейтрона  $\sigma_{el}$  для ядер  $^{12}\text{C}$ ,  $^{24}\text{Mg}$  и  $^{52}\text{Cr}$  в зависимости от энергии налетающей частицы  $E_n$ . В целом, результат расчета с использованием TALYS 1.9 близок к экспериментально измеренным зависимостям [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11] или оценке, принятой в базе данных ENDF/B-VIII.0 [12] для всех рассматриваемых ядер. Однако, расчет не воспроизводит тонкую энергетическую зависимость сечений.

На рис. 2 представлены угловые распределения сечения упругого рассеяния  $(d\sigma/d\Omega)_{el}$  нейтронов с энергией около 14.1 МэВ. Для рассеяния на  $^{12}\text{C}$  расчеты с использованием TALYS 1.9 при  $E_n = 14.1$  МэВ практически совпадают с экспериментальными данными [8, 13] для углов меньше  $90^\circ$ . В то же время модельные расчеты заметно недооценивают значения сечения при рассеянии назад. В случае  $^{24}\text{Mg}$  модельная оценка хорошо описывает экспериментальные данные [10] для углов  $\theta < 120^\circ$ , но при больших значениях  $\theta$  лежит ниже эксперимента. Для  $^{52}\text{Cr}$  не удалось найти экспериментальных данных, для энергии нейтронов близкой к 14 МэВ, поэтому для данного изотопа был произведен расчет при энергии 18.5 МэВ, соответствующей эксперименту [14] (рис. 2, в), наблюдается хорошее соответствие между экспериментальными данными и модельными оценками для этого ядра. Из сравнения результатов для трех представленных изотопов видно, что согласие расчетов с экспериментом

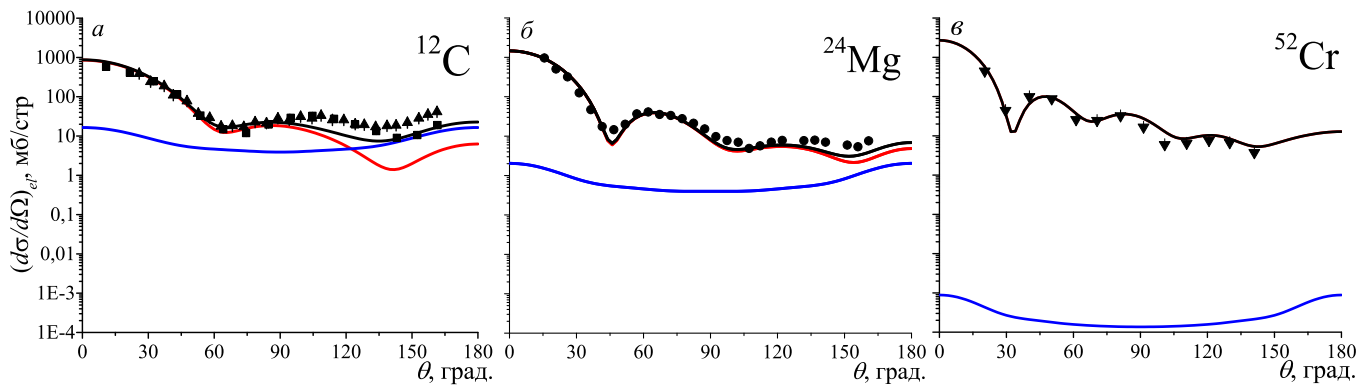


Рис. 2: Угловое распределение упруго рассеянных нейтронов  $(d\sigma/d\Omega)_{el}$ , рассчитанные в TALYS 1.9: *a* — для  $^{12}\text{C}$  (экспериментальные данные:  $\blacksquare$  — [8] ( $E_n = 14$  МэВ),  $\blacktriangle$  — [13] (14.43 МэВ)), *б* — для  $^{24}\text{Mg}$  ( $\bullet$  — [10] (14.8 МэВ)), *в* — для  $^{52}\text{Cr}$  ( $\blacktriangledown$  — [14] (18.5 МэВ)). Синяя линия — вклад процессов через составное ядро, красная линия — вклад прямых процессов, черная линия — итоговое распределение.

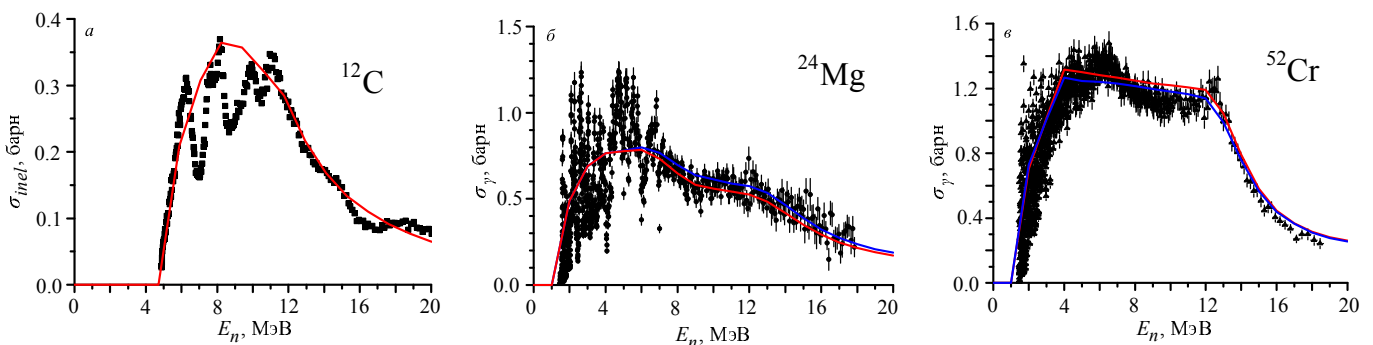


Рис. 3: Зависимости  $\sigma_{inel}$  и  $\sigma_\gamma$  от  $E_n$ , при условии, что конечное ядро оказывается на первом возбужденном уровне: *a* —  $\sigma_{inel}$  для  $^{12}\text{C}$  (экспериментальные данные:  $\blacksquare$  — [15]), *б* —  $\sigma_\gamma$  для  $^{24}\text{Mg}$  ( $\bullet$  — [16]), *в* —  $\sigma_\gamma$  для  $^{52}\text{Cr}$  ( $\blacktriangle$  — [1]). Красная линия — результат расчета в TALYS 1.9 с использованием параметров по умолчанию, синяя линия — с использованием «лучших параметров»

улучшается с ростом  $A$ , при этом следует отметить снижение вклада компаунд-процессов.

### 2.2. Неупругое рассеяние

При неупругом рассеянии всегда изменяется внутренняя энергия ядра-мишени. Для описания данного процесса может быть использована как концепция составного ядра, так и механизм прямой реакции, для описания которого в качестве отправной точки также используется оптическая модель. На рис. 3, *a* показано сечение неупругого рассеяния нейтронов  $\sigma_{inel}$  на  $^{12}\text{C}$  в зависимости от энергии налетающей частицы  $E_n$ , при условии, что конечное ядро оказывается на первом возбужденном уровне  $J^\pi = 2^+$  с энергией 4.439 МэВ. На рис. 3, *б* и 3, *в* показано сечение гамма-перехода с первого возбужденного уровня  $J^\pi = 2^+$  в  $^{24}\text{Mg}$  с энергией 1.369 МэВ и в  $^{52}\text{Cr}$  с энергией 1.434 МэВ. Результаты расчета в основном совпадают с экспериментальными данными [1, 15, 16] в пределах погрешно-

стей, при этом тонкая структура сечений по-прежнему не воспроизводится.

На рис. 4 представлена угловая зависимость дифференциального сечения неупругого рассеяния  $(d\sigma/d\Omega)_{inel}$  нейтронов на первое возбужденное состояние изотопов  $^{12}\text{C}$ ,  $^{24}\text{Mg}$  и  $^{52}\text{Cr}$ , а также вклады прямых и компаунд-процессов. Видно, что расчет в целом близок к экспериментально измеренным значениям сечений. Наибольшие расхождения между расчетными зависимостями и экспериментом наблюдаются в случае  $^{12}\text{C}$ . Для углов, отличных от  $90^\circ$ , результат расчета занижает сечение в несколько раз.

### 2.3. Сечения гамма-переходов

В эксперименте TANGRA получено значение сечения рождения  $\gamma$ -квантов для линии 4.44 МэВ:  $130 \pm 15$  мб. Модельные расчеты для этой характеристики дают оценку равную 164 мб, что больше экспериментального результата примерно на 26%. TALYS 1.9 завышает сечение этого процесса из-за того, что мо-

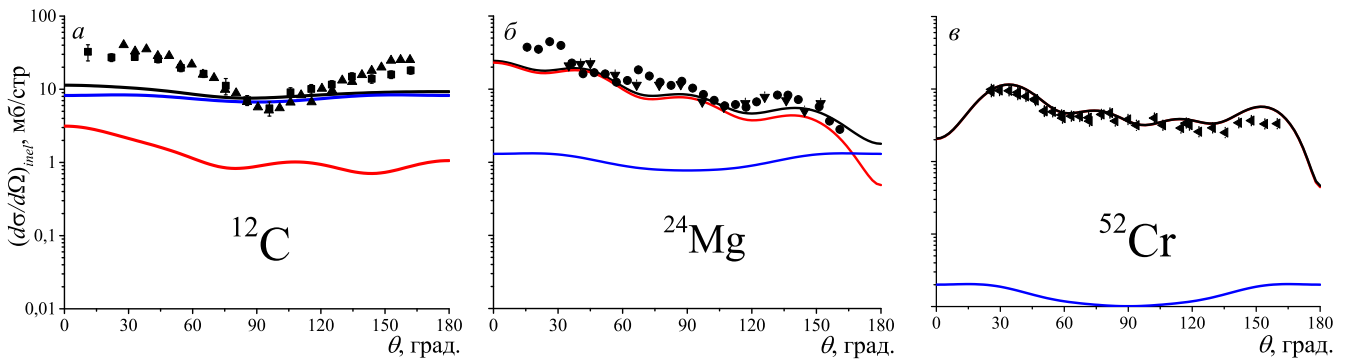


Рис. 4: Угловое распределение неупруго рассеянных нейтронов  $(d\sigma/d\Omega)_{inel}$ , рассчитанные в TALYS 1.9: а — для  $^{12}\text{C}$  (экспериментальные данные: ■ — [8] ( $E_n = 14$  МэВ), ▲ — [13] (14.43 МэВ)), б — для  $^{24}\text{Mg}$  (▼ — [17] (14.1 МэВ), ● — [10] (14.8 МэВ)), в — для  $^{52}\text{Cr}$  (◀ — [18] (14.1 МэВ)). Синяя линия соответствует вкладу процессов через составное ядро, красная линия — вклад прямых процессов, черная линия - итоговое распределение.

Таблица 1: Энергии  $\gamma$ -переходов, наблюдаемых при облучении нейтронами с энергией 14.1 МэВ ядер магния в эксперименте TANGRA [19]. Указаны реакции образования  $\gamma$ -линий, а также спины и четности начального  $(J^\pi)^i$  и конечного  $(J^\pi)^f$  состояний соответствующего ядра. Парциальные сечения приведены в сравнении с расчетами с использованием TALYS 1.9 и экспериментальными результатами работ [19] и [20].

$E_\gamma$ , кэВ	Реакция	$(J^\pi)^i \rightarrow (J^\pi)^f$	$\sigma_\gamma$ , мб		
			[19]	TALYS	[20]
350.7	$^{24}\text{Mg}(n, \alpha)^{21}\text{Ne}$	$5/2_1^+ \rightarrow 3/2_{gs}^+$	$185 \pm 2$	123	$77 \pm 13$
440.0	$^{24}\text{Mg}(n, d)^{23}\text{Na}$	$5/2_1^+ \rightarrow 3/2_{gs}^+$	$26 \pm 2$	34	$31 \pm 8$
472.2	$^{24}\text{Mg}(n, p)^{24}\text{Na}$	$1_1^+ \rightarrow 4_{gs}^+$		153	$126 \pm 20$
1368.6	$^{24}\text{Mg}(n, n')^{24}\text{Mg}$	$2_1^+ \rightarrow 0_{gs}^+$	412	411	$412 \pm 62$
1809.0	$^{26}\text{Mg}(n, n')^{26}\text{Mg}$	$2_1^+ \rightarrow 0_{gs}^+$			$82 \pm 13$
2754.0	$^{24}\text{Mg}(n, n')^{24}\text{Mg}$	$4_1^+ \rightarrow 2_1^+$	$55 \pm 3$	82	$55 \pm 11$
3735.2	$^{24}\text{Mg}(n, \alpha)^{21}\text{Ne}$	$5/2_2^+ \rightarrow 3/2_{gs}^+$	$19 \pm 3$	9	
3866.1	$^{24}\text{Mg}(n, n')^{24}\text{Mg}$	$3_1^+ \rightarrow 2_1^+$	$25 \pm 3$	34	$33 \pm 5$
4237.9	$^{24}\text{Mg}(n, n')^{24}\text{Mg}$	$2_2^+ \rightarrow 0_{gs}^+$	$27 \pm 4$	25	$36 \pm 8$
4642.2	$^{24}\text{Mg}(n, n')^{24}\text{Mg}$	$4_2^+ \rightarrow 2_1^+$	$23 \pm 3$	23	$20 \pm 4$
6246.8	$^{24}\text{Mg}(n, n')^{24}\text{Mg}$	$3_1^- \rightarrow 2_1^+$	$13 \pm 3$	21	$24 \pm 4$

дель, заложенная в TALYS, не учитывает снятие возбуждения уровней  $^{12}\text{C}$  выше первого другими процессами кроме испускания  $\gamma$ -кванта. Экспериментальные данные указывают на то, что второй и третий возбужденные уровни  $^{12}\text{C}$  с вероятностью, близкой к 100% испускают  $\alpha$ -частицы. Таким образом, TALYS завышает сечение возбуждения первого уровня в спектре  $^{12}\text{C}$ .

Для более тяжелых ядер, таких как  $^{24}\text{Mg}$  и  $^{52}\text{Cr}$ , число наблюдаемых  $\gamma$ -переходов заметно больше. Так, спектр возбужденных состояний  $^{24}\text{Mg}$  в области низких энергий существенно богаче и реакция взаимодействия быстрого нейтрона с ядром  $^{24}\text{Mg}$  имеет большое число неупругих каналов.

В табл. 1 представлено сравнение результатов расчетов, выполненных в TALYS 1.9, и данных экспериментальных работ [19], [20] для сечений испускания  $\gamma$ -квантов в реакциях, происходящих при облучении нейтронами с энергией 14.1 МэВ ядер Mg. В целом

расчет близок к значениям, полученным в эксперименте TANGRA [19] (здесь и далее для результатов нашего эксперимента указаны только статистические погрешности). Исключения составляют сечения для переходов с энергиями  $E_\gamma = 3735.2$  кэВ (расчет меньше в 2.1 раза) и  $E_\gamma = 6246.8$  кэВ (расчет больше в 1.6 раза).

В табл. 2 приведены результаты модельных расчетов, выполненные с использованием TALYS 1.9, и экспериментальные данные для сечений  $\gamma$ -переходов в спектрах конечных ядер, возникающих при облучении нейтронами ядер хрома. Сравнение данных TANGRA [21] с модельными расчетами демонстрирует систематическую недооценку сечений рождения  $\gamma$ -квантов для большинства  $\gamma$ -переходов. Однако, в целом расчеты в TALYS 1.9 удовлетворительно описывают полученные сечения испускания  $\gamma$ -квантов. Важно отметить, что расхождение между оценками и эксперименталь-

Таблица 2: Энергии  $\gamma$ -переходов, наблюдаемых при облучении нейтронами с энергией 14.1 МэВ ядер Cr в эксперименте TANGRA [21]. Указаны реакции образования  $\gamma$ -линий, а также спины и четности начального ( $J^\pi$ )<sup>i</sup> и конечного ( $J^\pi$ )<sup>f</sup> состояний соответствующего ядра. Парциальные сечения приведены в сравнении с расчетами с использованием TALYS 1.9 и экспериментальными результатами работ [21], [22], [23], [24].

$E_\gamma$ , кэВ [21]	$E_\gamma$ , кэВ [12]	Реакция	$\sigma_\gamma$ , мб				
			[21]	TALYS 1.9	[22]	[23]	[24]
126 ± 3	124.45	$^{52}\text{Cr}(n, p)^{52}\text{V}$	28 ± 2	7.6			
	125.08	$^{52}\text{Cr}(n, p)^{52}\text{V}$		14.4			
321 ± 3	320.1	$^{52}\text{Cr}(n, d)^{51}\text{V}$	25 ± 3	10.3			14 ± 1
648 ± 3	647.47	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	77 ± 3	12.2			70 ± 4
747 ± 3	744.23	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	92 ± 3	63.5		128 ± 21	71 ± 4
	749.07	$^{52}\text{Cr}(n, 2n)^{51}\text{Cr}$		45, 5			42 ± 1
937 ± 3	935.54	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	254 ± 4	236.9	221 ± 31	211 ± 26	237 ± 9
1249 ± 3	1246.28	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	46 ± 3	21.87			48 ± 8
1335 ± 3	1333.65	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	200 ± 4	163.1	239 ± 36	173 ± 29	205 ± 8
1436 ± 3	1434.07	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	785 ± 6	761.5	757 ± 56	738 ± 51	783 ± 30
1533 ± 3	1530.67	$^{52}\text{Cr}(n, 2n)^{51}\text{Cr}$	54 ± 5	32.9		74 ± 23	
1728 ± 3	1727.53	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	39 ± 3	18.9			26 ± 4
2040 ± 5	2038	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	18 ± 3	11.8			
2339 ± 5	2337.44	$^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$	14 ± 3	20.1			

ными 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%. Заметное различие сечений отдельных переходов может быть связано с недостаточно точными данными по коэффициентам ветвления в используемых при расчетах базах данных по дискретным ядерным уровням.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

TALYS 1.9 — это комплексная программа для расчета ядерных реакций, имеющая большое количество настраиваемых параметров. Для рассмотренных в работе ядер сечения, полученные с помощью TALYS 1.9 для

реакций, происходящих при столкновении ядер мишени с нейтронами с энергией 14.1 МэВ, оказываются близкими к экспериментальным данным. При этом согласие расчета и экспериментальных данных улучшается с ростом массового числа, что, по-видимому связано с параметризацией оптической модели в TALYS. Нам не удалось с помощью TALYS 1.9 воспроизвести угловое распределение неупруго рассеянных нейтронов для возбужденного состояния  $4.44$  МэВ  $^{12}\text{C}$ . Также в TALYS отсутствует возможность рассчитывать угловые распределения  $\gamma$ -квантов, излучаемых возбужденным ядром после испускания нуклона, поэтому для дальнейшего применения программного кода TALYS в рамках проекта TANGRA планируется его модификация.

[1] Mihailescu L. C., Borcea C., Koning A. J., Plompen A. J. M. // Nucl. Phys. A. 2007. **786**. P. 1.  
 [2] Aleksakhin V. Yu., Bystritskij V. M., Zamyatin N. I. // Nucl. Instrum. Methods A. 2015. **785**. P. 9.  
 [3] Ruskov I. N., Kopatch Y. N., Bystritsky V. M. et al. // Physics Procedia 2015. **64**. P. 163.  
 [4] Koning A. J., Delaroche J. P. // Nucl. Phys. A. 2003. **713**. P. 231.  
 [5] Boschung P., Lindow J. T., Shrader E. F. // Nucl. Phys. A. 1971. **161**. P. 593.  
 [6] Velkley D. E., Brandenberger J. D., Glasgow D. W. et al. // Phys. Rev. C. 1973. **7**. P. 1736.

[7] Demaninis F., Granata L., Nardelli G., Pauli, G. // Lettere al Nuovo Cimento. 1973. **8**. P. 259.  
 [8] Haouat G., Lachkar J., Sigaud J. et al. // Nuclear Science and Engineering. 1978. **65**. P. 331.  
 [9] Olsson N., Trostell B., Ramström E. // Nucl. Phys. A. 1989. **496**. P. 505.  
 [10] Haouat G., Lagrange Ch., Patin Y. et al. // Proc. of conf. on Nucl. Data for Sci. and Technol. Springer Netherlands. 1983. P. 796.  
 [11] Kinney W. E., Perey F. G. Oak Ridge National Laboratory Report No 4806. 1974.  
 [12] База ядерных данных ENSDF

- [13] *Glasgow D. W., Purser F. O., Hogue H. et al.* // Nuclear Science and Engineering. 1976. **61**. P. 521.
- [14] *Yamanouti Y., Sugimoto M., Chiba S. et al.* // Proc. of conf. on Nucl. Data for Sci. and Technol. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1992. P. 717.
- [15] *Rogers V. C., Orphan V. J., Hoot C. G., Verbinski V. V.* // Nuclear Science and Engineering. 1975. **58**. P. 298.
- [16] *Olacel A., Borcea C., Dessagne P. et al.* // Phys. Rev. C. 2014. **90**. P. 034603.
- [17] *Clarke R. L., Cross W. G.* // Nucl. Phys. 1964. **53**. P. 177.
- [18] *Schmidt D., Mannhart W.* // Phys. Techn. Bundesanst. Neutronenphysik Reports. 1998. **31**.
- [19] *Федоров Н.А., Грозданов Д.Н., Копач Ю.Н. и др.* // Изв. РАН. Серия физическая. 2020. (принято в печать).
- [20] *Nyberg-Ponnert K., Jonsson B., Bergqvist I.* // Phys. Scr. 1971. **4**. P. 165.
- [21] *Грозданов Д.Н., Федоров Н.А., Копач Ю.Н. и др.* // Ядерная физика. 2020. (принято в печать).
- [22] *Abbondanno U., Giacomich R., Lagonegro M., Pauli G.* // J. Nucl. Energy. 1973. **27**. P. 227.
- [23] *Yamamoto T., Hino Y., Itagaki S., Sugiyama K.* // J. Nucl. Science and Technology. 1978. **15**. P. 797.
- [24] *Oblozinsky P., Hlavac S., Maino G., Mengoni A.* // Il Nuovo Cimento A. 1992. **105**. P. 965.

## The study of the 14 MeV neutrons interaction with nuclei C, Mg, Cr

**I. D. Dashkov<sup>1a</sup>, N. A. Fedorov<sup>1,2b</sup>, D. N. Grozdanov<sup>2,3</sup>, Yu. N. Kopach<sup>2</sup>,  
I. N. Ruskov<sup>3</sup>, V. R. Skoy<sup>2</sup>, T. Yu. Tretyakova<sup>4,2</sup>, F. A. Aliev<sup>2,5</sup>,  
S. Dabylova<sup>2,6</sup>, N. A. Gundorin<sup>2</sup>, C. Hramco<sup>2,7</sup> and TANGRA collaboration**

<sup>1</sup>*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

<sup>2</sup>*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia*

<sup>3</sup>*Institute of Nuclear Research and Nuclear Energy of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia BG-1784, Bulgaria*

<sup>4</sup>*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

<sup>5</sup>*Institute of Geology and Geophysics of Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku AZ1143, Azerbaijan*

<sup>6</sup>*L.N.Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan 010008, Republic of Kazakhstan*

<sup>7</sup>*Institute of Chemistry of the Academy of Sciences of Moldova, Chisinau MD-2028, Republic of Moldova*

This work is dedicated to research of nuclear processes occurring in  $n+^{12}\text{C}$ ,  $n+^{24}\text{Mg}$ ,  $n+^{52}\text{Cr}$  reactions at energy 14.1 MeV. Nuclear reaction simulation code TALYS was used to reproduce the experimental results gained from TANGRA experiments and other sources. The experimental setup TANGRA (Tagged Neutron and Gamma Rays) for studying neutron-induced nuclear reactions is operated by Frank Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research. It provides experimental data on the angular and energy distributions of gamma quanta emitted from various targets. The results from TALYS calculations in comparison with the experimental data are shown and discussed.

PACS: 25.40.Fq.

*Keywords:* neutron scattering,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{52}\text{Cr}$ .

*Received 25 March 2020.*

### Сведения об авторах

1. Дашков Илья Дмитриевич — студент; тел.: (495) 939-56-36, e-mail: daschkov.id15@physics.msu.ru.
2. Федоров Никита Александрович — инженер, аспирант; тел.: (49621) 6-31-13, e-mail: na.fedorov@physics.msu.ru.
3. Грозданов Димитър Николов — мл. науч. сотрудник; тел.: (49621) 6-31-13, e-mail:dimitar@nf.jinr.ru.
4. Копач Юрий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, начальник сектора; тел.: (49621) 6-37-96, e-mail:kopatch@nf.jinr.ru.
5. Русков Иван Николов — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (59297) 9-54-57, e-mail:ivan@inme.bas.bg.
6. Ской Вадим Рудольфович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (49621) 6-33-88, e-mail:skoy@nf.jinr.ru.
7. Третьякова Татьяна Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-56-36, e-mail: tretyakova@sinp.msu.ru.
8. Алиев Фуад Ахмед оглы — инженер; тел.: (49621) 6-31-13, e-mail: fuad.aliyev107@gmail.com.
9. Дабылова Султанат — инженер; тел.: (49621) 6-31-13, e-mail: pearl\_04\_94@mail.ru.
10. Храмо Константин — инженер; тел.: (49621) 6-37-56, e-mail: costea.edinets@mail.ru.
11. Гундорин Николай Алексеевич — ст. науч. сотрудник; тел.: (49621) 6-30-69, e-mail:gundorin@nf.jinr.ru.