

УДК 539.171.4

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 14.1 МэВ, РАССЕЯННЫХ НА ЯДРАХ УГЛЕРОДА

© 2022 г. И. Д. Дашков^{1, 2, *}, Н. А. Федоров¹, Д. Н. Грозданов^{1, 3}, Ю. Н. Копач¹, Т. Ю. Третьякова^{1, 2}, И. Н. Русков^{1, 3}, В. Р. Ской¹, А. Эрболот^{1, 4}, Д. Бериков^{1, 5}, Ю. Н. Бармаков⁶, Е. П. Боголюбов⁶, Д. И. Юрков⁶

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

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

³Институт ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук, София, Болгария

⁴Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области
“Университет “Дубна”, Дубна, Россия

⁵Министерство энергетики Республики Казахстан, Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

⁶Федеральное государственное унитарное предприятие
“Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова”, Москва, Россия

*E-mail: daschkov.id15@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 14.03.2022 г.

После доработки 08.04.2022 г.

Принята к публикации 22.04.2022 г.

В рамках проекта TANGRA выполнены измерения для меченых нейтронов с начальной энергией 14.1 МэВ, рассеянных на углеродном образце. Получены угловые распределения нейтронов для упругого рассеяния и рассеяния на первое возбужденное состояние ^{12}C с энергией 4.44 МэВ. Полученные результаты сравниваются с экспериментальными данными других авторов и модельными расчетами, выполненными в рамках метода связанных каналов с деформированным оптическим потенциалом.

DOI: 10.31857/S0367676522080051

ВВЕДЕНИЕ

В рамках проекта “TANGRA” (TAGged Neutrons and Gamma Rays), базирующегося в Лаборатории нейтронной физики имени И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований (ЛИФ ОИЯИ, Дубна) [1, 2] проводится множество экспериментов по измерению свойств характеристического γ -излучения, возникающего при взаимодействии меченых нейтронов энергии 14.1 МэВ с атомными ядрами. Большая часть работ коллаборации TANGRA включает в себя данные о выходах наблюдаемых γ -переходов или угловых распределений γ -квантов [3, 4], подобное исследование было проведено и для углерода [5]. Данная работа посвящена измерению и модельному описанию углового распределения нейтронов с начальной энергией 14.1 МэВ, рассеянных на образце из углерода.

Естественная смесь изотопов углерода более чем на 98% состоит из ядер ^{12}C , поэтому процесс рассеяния нейтронов практически полностью

определяется свойствами именно этого изотопа. Структура ^{12}C представляет собой особый интерес для описания астрофизических процессов. Это связано, в том числе, с существованием состояния Хойла [6], второго возбужденного уровня ядра с энергией 7.65 МэВ. Все возбужденные состояния ^{12}C , которые находятся по энергии выше первого ($E_1 = 4.44$ МэВ), лежат выше энергии отделения α -частицы и имеют крайне малую вероятность γ -распада, поэтому для эффективного исследования этих состояний важно регистрировать пробные частицы, рассеянные нейтроны, которые сохраняют информацию о состоянии взаимодействовавшего ядра.

Для модельного описания полученных экспериментальных данных использовалась программа TALYS версии 1.9. Основой процесса расчета в TALYS можно назвать оптическую модель ядерных реакций, с ее помощью вычисляются полное сечение взаимодействия и сечение упругого рассеяния. Заданный деформированный оптиче-

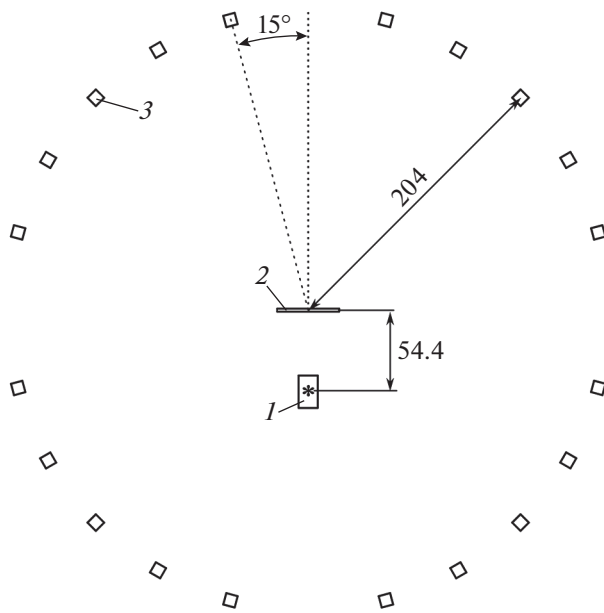
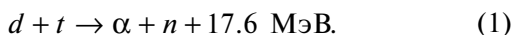


Рис. 1. Схема установки TANGRA для измерения углового распределения нейтронов: 1 — генератор нейтронов ИНГ-27 (звездочкой отмечена тритиевая мишень), 2 — образец из углерода, 3 — детектор нейтронов. Расстояния указаны в см.

ский потенциал также используется для решения обратной задачи рассеяния в приближении прямого механизма ядерной реакции, например, в рамках метода связанных каналов. К полученным сечениям, упомянутым ранее, добавляется вклад процессов, происходящих в рамках модели составного ядра, чтобы получить в сумме сечения, удовлетворяющие оптической модели.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для регистрации рассеянных нейтронов была собрана экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 1. Ее основной особенностью является использование метода меченых нейтронов (ММН) [7]. Источником нейтронов является генератор ИНГ-27 [8], в котором происходит реакция синтеза ускоренных до 80 кэВ дейтронов с ядрами трития.



В результате одного акта реакции возникает нейтрон с энергией 14.1 МэВ и соответствующая ему α -частица с энергией 3.5 МэВ. Вторичное излучение от образца регистрируется в совпадении с α -частицей. ММН не только определяет направление вылета нейтронов, что необходимо для расчета угла рассеяния нейтронов, но и улучшает соотношение сигнал/фон, позволяет использовать времяпролетную методику. Подробнее про реали-

зацию ММН на установках TANGRA можно узнать в работах [3–5].

Детектор α -частиц, встроенный в генератор, состоит из 8 горизонтальных Y-стрипов и 8 вертикальных X-стрипов, пересечения которых образуют пиксели размером $6 \times 6 \text{ мм}^2$. Таким образом формируются 64 разрешенных в пространстве нейтронных пучка. Поток меченых нейтронов оценивается нами в $1.6 \cdot 10^5$ нейтронов/с. Пространственная конфигурация нейтронных пучков, испускаемых генератором, определялась в измерениях, проведенных с использованием профилометра [9]. Разброс энергии нейтронов, учитываемых в эксперименте, определяется геометрическими размерами встроенного α -детектора и равен 0.17 МэВ.

Регистрирующая система кольцевой геометрии (рис. 1) состояла из 20 сцинтилляционных пластиковых детекторов модели SCIONIX V80A300/3M-E1-P-X-NEG объемом $8 \times 8 \times 30 \text{ см}^3$. Расстояние между центрами детекторов и углеродной мишени составило 204 см.

В качестве мишени использовался блок химически чистого углерода естественного изотопного состава (^{12}C (99%), ^{13}C (1%)) объемом $44 \times 44 \times 2 \text{ см}^3$. Большая площадь образца была продиктована желанием использовать все меченые пучки нейтронов при размещении мишени на расстоянии 50 см от генератора. Время измерения составило 22.6 ч. Также было проведено измерение без образца в течение 8 ч.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Были построены время пролетные гистограммы, показывающие зависимость числа зарегистрированных событий N_i от разности времен срабатывания детектора нейтронов t_d и X-стрипа α -детектора t_x для каждой комбинации пикселя α -детектора и детектора нейтронов. Для временной калибровки использовался пик, соответствующий γ -излучению, исходящему от корпуса генератора.

Для упрощения обработки времяпролетных спектров были просуммированы данные для разных Y-стрипов, соответствующие одной комбинации X-стрипа и детектора нейтронов, а также симметричные относительно оси центрального нейтронного пучка пары комбинаций детектора и X-стрипа. Так как нейтронные пучки X-стрипов били в мишень под разными углами, каждый полученный спектр соответствовал своему углу рассеяния нейтронов θ в системе центра масс продуктов реакции, где $9^\circ \leq \theta \leq 171^\circ$.

Для устранения эффектов, не связанных со взаимодействием частиц с облучаемым образцом,

было произведено вычитание нормированных данных, полученных в измерениях без образца. Примеры итоговых времяпролетных гистограмм показаны на рис. 2. На полученных гистограммах наблюдаются пик, соответствующий испусканию γ -квантов от углеродного образца, пик упругого рассеяния нейтронов, хорошо различимый пик неупругого рассеяния на первое возбужденное состояние (2_1^+ , 4.44 МэВ), пики неупругого рассеяния на второе (0_2^+ , 7.65 МэВ) и третье (3_1^- , 9.64 МэВ) возбужденные состояния ^{12}C .

Для пиков упругого рассеяния и рассеяния на первое возбужденное состояние были определены площади, равные числу нейтронов, рассеянных в соответствующем процессе под определенным углом. Полученную зависимость числа нейтронов от угла рассеяния можно назвать угловым распределением. Несмотря на то, что в спектре присутствуют пики более высоких по энергии состояний ^{12}C , точное определение их площадей не может быть произведено для всего диапазона доступных углов, из-за недостаточного числа событий. Данные по рассеянию нейтронов на второе и третье возбужденные состояния ^{12}C были исключены из анализа в данной работе.

МОДЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

Для широкого набора ядер и энергий взаимодействия в TALYS предустановлены параметры моделей, расчет с использованием которых в среднем хорошо описывает наблюдаемые в эксперименте величины. Однако ядро ^{12}C находится на границе применимости используемой в TALYS глобальной систематики параметров оптического потенциала [10], поэтому оптические параметры требуют уточнения.

Для описания неупругого рассеяния нейтронов на ^{12}C по умолчанию в TALYS используется метод борновского приближения с искаженными волнами (DWBA), где подразумевается слабая связь неупругих каналов с основным каналом реакции, каналом упругого рассеяния. Однако более разумным в случае ^{12}C кажется использование метода связанных каналов (CC), в котором каналы рассеяния на основное состояние $0_{g.s.}^+$ и первое возбужденное состояние 2_1^+ оказываются сильно связаны. Этот метод показал себя лучше всего при исследовании рассеяния нейтронов с энергией 15.57 МэВ и более в работе [11] при использовании приближения вращательного возбуждения уровней.

Большое влияние угловое распределение неупруго-рассеянных нейтронов оказывает величина деформации ядра. По умолчанию в TALYS заложена величина квадрупольной деформации

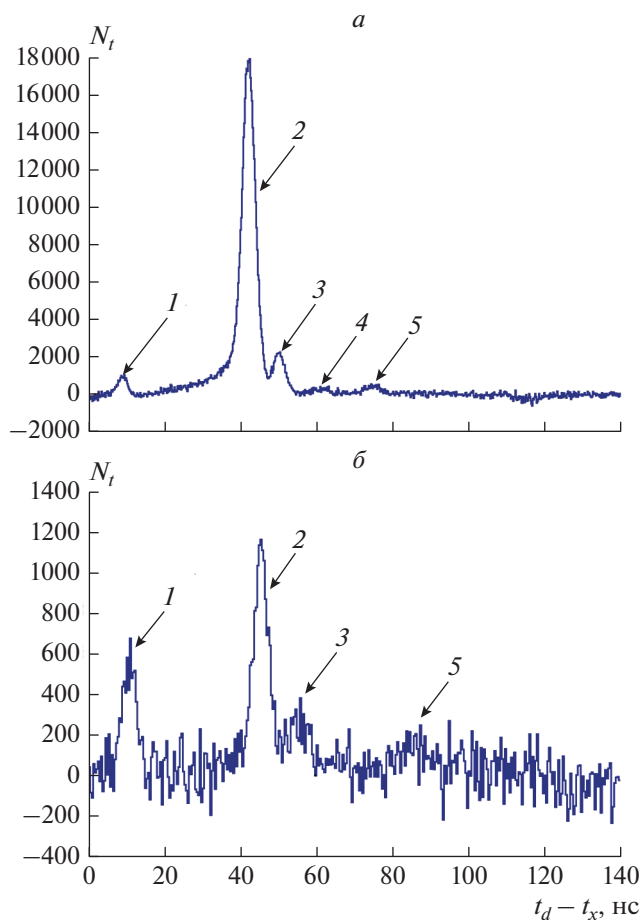


Рис. 2. Времяпролетные спектры, полученные для угла $\theta = 12^\circ$ (а), 93° (б): 1 – пик γ -квантов от образца, 2 – пик упруго рассеянных нейтронов, 3, 4, 5 – пики нейтронов, рассеянных на первое, второе и третье возбужденное состояние ^{12}C , соответственно.

$\beta_2 = 0.4$ для первого возбужденного состояния ядра ^{12}C , при этом знак параметра деформации не учитывается в DWBA. В то же время, оценки той же величины в экспериментах по рассеянию заряженных частиц на ^{12}C указывают на сплюснутую форму ядра [12], и значение β_2 может достигать по величине до -0.76 [13]. Таким образом, остается актуальной задача получения корректного самосогласованного набора параметров моделей, которые подходили бы для описания экспериментального углового распределения рассеянных нейтронов.

Для одновременного определения параметров оптического потенциала и степени квадрупольной деформации в рамках метода связанных каналов с приближением вращательного возбуждения первого уровня ядра ^{12}C была использована библиотека TalysLib, созданная для работы с программой TALYS при решении задач проекта TANGRA [14]. Библиотека способна итерационно-

Таблица 1. Параметры оптического потенциала и квадрупольной деформации β_2 , используемые в расчетах TALYS по умолчанию и после аппроксимации в TalysLib двух наборов экспериментальных данных: из этой работы и работ других авторов [15–17]

Набор	Метод	V_V , МэВ	W_V , МэВ	r_V , фм	a_V , фм	W_D , МэВ	r_D , фм	a_D , фм	V_{SO} , МэВ	W_{SO} , МэВ	r_{SO} , фм	a_{SO} , фм	β_2
По умолчанию	DWBA	49.1	1.26	1.13	0.68	7.65	1.31	0.54	5.39	-0.07	0.90	0.59	0.40
Наши данные	СС (вращ.)	52.1	0.25	1.02	0.56	5.53	1.26	0.36	10.1	-4.76	0.95	0.48	-0.79
Другие данные [15–17]	СС (вращ.)	49.7	0.21	1.11	0.44	5.42	1.20	0.34	6.31	-3.75	1.21	0.59	-0.83

но запускать расчет в TALYS, считывать результаты вычислений и подбирать с помощью пакета MINUIT модельные параметры, наиболее подходящие для описания выбранных экспериментальных данных.

Используя функционал библиотеки, мы аппроксимировали два набора экспериментальных данных по дифференциальным сечениям рассеяния нейтронов на основное состояние $(d\sigma/d\Omega)_{el}$ и первое возбужденное состояние $(d\sigma/d\Omega)_{inel}$ ядра ^{12}C при энергии налетающей частицы около 14.1 МэВ. Первый набор содержал только нормированные угловые распределения, полученные в этой работе, второй набор – только данные из работ других авторов [15–17]. Начальным приближением подбираемых параметров стали параметры оптического потенциала и β_2 , используемые в TALYS 1.9 по умолчанию. В результате аппроксимации для каждого набора была получена своя группа оптических параметров и значение β_2 . Параметры, используемые в TALYS по умолчанию, использованные в расчетах методы, а также подобранные параметры при аппроксимации двух наборов экспериментальных данных указаны в табл. 1, где используется формализм работы [10].

Самыми значительными изменениями, возникшими в подбираемых параметрах после аппроксимации, по сравнению с начальным приближением, стали уменьшение параметра диффузности a для большинства компонент оптического потенциала и увеличение абсолютного значения параметра β_2 . При этом между двумя наборами экспериментальных данных подобранные параметры отличаются незначительно, за исключением параметра, соответствующего спин-орбитальной части потенциала (V_{SO} , W_{SO} , R_{SO} , a_{SO}).

Для численной оценки качества аппроксимации экспериментальных данных использовалась величина χ^2 , деленная на число точек в аппроксимируемом наборе – N . Величина χ^2/N для набора экспериментальных точек из работ [15–17] составила 73.5 при использовании параметров TALYS по умолчанию. После изменения метода описания неупругого рассеяния на СС в приближении вращательного возбуждения уровней и аппрокси-

мации данных этого набора χ^2/N стала равна 2.7, что указывает на лучшее соответствие экспериментальным данным. При использовании в той же процедуре подбора параметров набора с нашими данными $\chi^2/N = 2.2$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для сравнения полученных угловых распределений с дифференциальными сечениями рассеяния нейтронов на ядрах ^{12}C из работ других авторов, наши значения были нормированы на данные из работ [15–17] для углового рассеяния нейтронов в диапазоне углов от 10° до 50° , где число рассеянных нейтронов максимально. Сравнение нормированных угловых распределений, полученных в этой работе, и дифференциальных сечений рассеяния нейтронов из других работ приведено на рис. 3а, рис. 3б. Для наших значений указаны статистические погрешности.

Полученные угловые распределения, в целом, хорошо согласуются с другими экспериментальными данными. Для упругого рассеяния наблюдается меньшая выраженность минимума дифференциального сечения около 70° , наши значения до 52% больше данных [15] в этой области углов. Для неупругого рассеяния наши значения вне области нормировки лежат до 32% ниже по величине дифференциального сечения, что указывает на меньшую, по сравнению с другими работами, вероятность неупругого рассеяния нейтронов на состоянии ^{12}C с энергией 4.44 МэВ.

Экспериментальные данные были использованы для получения значений оптических параметров и β_2 , подходящих выбранному для ^{12}C модельному описанию. Результаты расчета с подобранными в результате аппроксимации наших данных параметрами, в сравнении с расчетом в TALYS по умолчанию, показаны на рис. 3в, рис. 3г. Описание в TALYS дифференциальных сечений рассеяния нейтронов при использовании параметров, заданных по умолчанию, не может считаться удовлетворительным. В этом случае наблюдается серьезная недооценка вероятности неупругого рассеяния нейтронов и вклада в

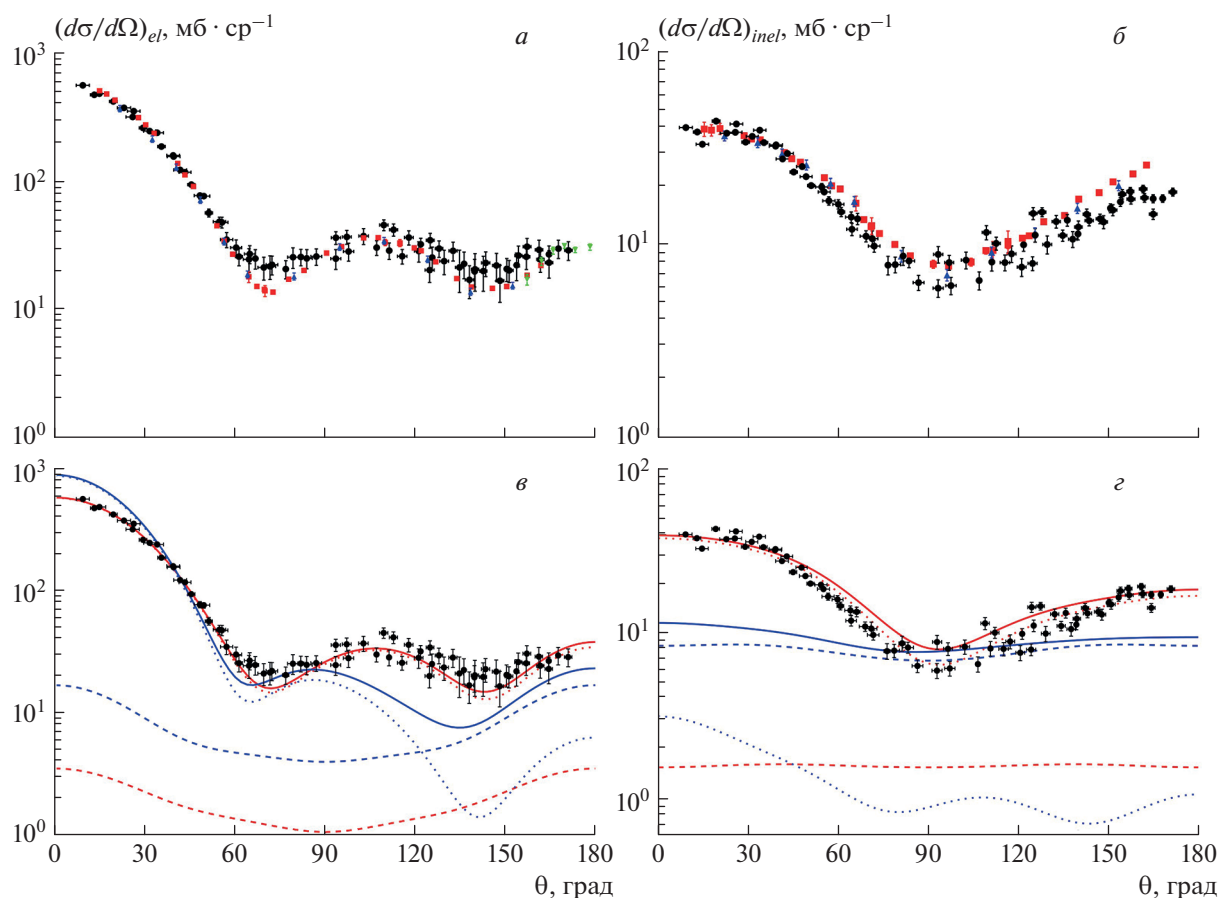


Рис. 3. Полученные угловые распределения рассеянных нейтронов для основного состояния (*a*, *v*) и первого возбужденного состояния ядра ^{12}C (*b*, *z*) в сравнении с дифференциальными сечениями других работ (*a*, *b*) и модельным расчетом TALYS 1.9 во вращательном приближении уровней (*v*, *z*). Экспериментальные данные: черные круги – эта работа, красные квадраты – [15], синие треугольники – [16], зеленые перевернутые треугольники – [17]. Результаты расчета в TALYS: синие линии – с использованием параметров по умолчанию, красные линии – с использованием параметров, полученных при аппроксимации наших данных, сплошная линия – дифференциальное сечение, пунктирная линия – вклад прямых процессов, прерывистая линия – вклад процессов, идущих через составное ядро.

дифференциальные сечения прямых процессов ядерной реакции. При использовании в расчетах метода СС во вращательном приближении возбуждения уровней совместно с подобранными параметрами оптического потенциала и β_2 расчет в пределах погрешностей сходится с экспериментальными данными, при этом вклад прямых процессов в рассеяние нейтронов на ^{12}C становится подавляющим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была продемонстрирована возможность применения установки TANGRA, использующей портативный генератор, для получения углового распределения рассеянных на ^{12}C быстрых нейтронов. Для основного и первого возбужденного состояний были получены угловые распределения, которые хорошо согласуются с эксперимен-

тальными данными других авторов. Планируется дальнейшее исследование более высоких возбужденных состояний ^{12}C в рамках проекта TANGRA.

Модельные расчеты дифференциальных сечений рассеяния с согласованным использованием подходов для описания процессов, идущих через составное ядро, и прямых реакций указывают на подавляющий вклад последних. Получена значительная степень квадрупольной деформации ядра ^{12}C ($\beta_2 < -0.79$) при использовании метода связанных каналов во вращательном приближении возбуждения состояния 2_1^+ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. *Ruskov I.N., Kopatch Yu.N., Bystritsky V.M. et al.* // Phys. Proc. 2015. V. 64. P. 163.
3. *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.
4. *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. 200.
5. *Грозданов Д.Н., Федоров Н.А., Быстрицкий В.М. и др.* // ЯФ. 2018. Т. 81. № 5. С. 548; *Grozdanov D.N., Fedorov N.A., Bystritski V.M. et al.* // Phys. Atom. Nucl. 2018. V. 81. No. 5. P. 588.
6. *Freer. M., Fynbo H.O.U.* // Prog. Part. Nucl. Phys. 2014. V. 78. P. 1.
7. *Valković V.* 14 MeV neutrons. Physics and applications. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC. 2016.
8. http://vniia.ru/production/incl/prospekt_element.pdf.
9. *Zamyatin N.I., Bystritsky V.M., Kopach Y.N.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2018. V. 898. P. 46.
10. *Koning A.J., Delaroche J.P.* // Nucl. Phys. A. 2003. V. 713. P. 231.
11. *Chen Z.M., Baird K., Howell C.R. et al.* // J. Phys. G. 1993. V. 19. P. 877.
12. *Yasue M., Tanabe T., Soga F., Kokame J.* // Nucl. Phys. A. 1983. V. 394. P. 29.
13. *Ray L., Blanpied G.S., Coker W.R. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1978. V. 40. P. 1547.
14. <https://github.com/terawatt93/TalysLib>.
15. *Boerker G., Mannhart W., Siebert B.R.L.* // Proc. Int. Conf. Nucl. Data Sci. Technol. (Julich, 1991). P. 317.
16. *Baba M., Matsuyama S., Fujisawa M. et al.* // Proc. 1989 Sem. Nucl. Data (Tokai-mura, 1989). P. 383.
17. *Bonazzola G.C., Bressani T., Chiavassa E. et al.* // Lett. Nuovo Cimento. 1972. V. 3. P. 99.

Measuring the angular distribution of 14.1 MeV neutrons scattered by carbon nuclei

**I. D. Dashkov^{a, b, *}, N. A. Fedorov^a, D. N. Grozdanov^{a, c}, Yu. N. Kopach^a,
T. Yu. Tretyakova^{a, b}, I. N. Ruskov^{a, c}, V. R. Skoy^a, A. Erbolot^{a, d}, D. Berikov^{a, e},
Yu. N. Barmakov^f, E. P. Bogolyubov^f, D. I. Yurkov^f**

^a *Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

^b *Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, Russia*

^c *Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*

^d *Dubna State University, Dubna, Russia*

^e *The Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan*

^f *Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia*

*e-mail: daschkov.id15@physics.msu.ru

Within the framework of the TANGRA project, measurements were carried out for tagged neutrons with initial energy of 14.1 MeV, scattered on a carbon sample. The angular distributions of neutrons for elastic scattering and scattering to the first excited state of ¹²C with an energy of 4.44 MeV are obtained. The obtained results have been compared with the experimental data of other authors and model calculations performed within the framework of the coupled channels method with a deformed optical potential.