

Особенности обработки эксперимента по рассеянию меченых нейтронов энергии 14.1 МэВ на углероде

Н. Ю. Милованов^{1,*}, И. Д. Дашков^{2,†}, Н. А. Федоров², Д. Н. Грозданов^{2,3}, Ю. Н. Копач²,
И. Н. Русков³, В. Р. Ской², Т. Ю. Третьякова^{1,2,4}, А. Эрболот^{2,5}, С. Дабылова^{2,6}

Коллаборация TANGRA

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

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

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

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

⁵Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской
области «Университет "Дубна"». Россия, 141980, Дубна, ул. Университетская, д. 19

⁶Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева. Казахстан, 010008, Астана, ул. Сатпаева, д. 2.
(Поступила в редакцию 20.05.2022; подписана в печать 19.06.2022)

Измерены угловые распределения рассеянных нейтронов в реакции $n+^{12}\text{C}$ при начальной энергии нейтрона 14.1 МэВ для случаев упругого рассеяния и неупругого рассеяния на первый возбужденный уровень ($J^P = 2^+$, $E_1 = 4.44$ МэВ) ядра ^{12}C . Эксперимент был произведен в рамках проекта TANGRA (TAGged Neutrons and Gamma RAys), базирующегося в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований. Для регистрации нейтронов использовались 20 пластиковых детекторов, рассеянные нейтроны разных энергий разделялись методом времени пролета. Собранные данные были поправлены с помощью Монте-Карло симуляции эксперимента для учета многократного рассеяния в образце и конечного размера детекторов. Полученное угловое распределение нормировалось на экспериментальные данные других авторов, чтобы получить абсолютную величину, дифференциальное сечение рассеяния.

PACS: 25.40.Dn, 25.40.Fq УДК: 539.172.4

Ключевые слова: упругое рассеяние нейтронов, неупругое рассеяние нейтронов, ^{12}C , дифференциальное сечение рассеяния, меченые нейтроны.

ВВЕДЕНИЕ

Реакции под действием быстрых нейтронов являются важным источником информации, требуемой для теоретических исследований в физике атомного ядра. Данные реакции используются не только в фундаментальных исследованиях. Компактные нейтронные генераторы сделали более доступным применение реакций с быстрыми нейтронами в элементном и изотопном анализе, а также в дозметровых установках. Для перечисленных областей точность измеренных значений различных характеристик ядерных реакций, таких как интегральные и дифференциальные сечения различных процессов взаимодействия атомных ядер с нейтронами, является критически важным фактором. Например, описание формы углового распределения рассеянных ядер нейтронов может сильно зависеть от применяемых модельных предположений о структуре ядра в различных возбужденных состояниях [1, 2]. По-

этому уточнение и дополнение ранее полученных данных, в том числе угловых распределений рассеянных на атомных ядрах нейтронов, остается актуальной задачей ядерной физики.

Настоящая работа была проведена в рамках проекта TANGRA (TAGged Neutrons and Gamma RAys) [3] Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне. Главной задачей проекта TANGRA является изучение ядерных реакций под действием быстрых нейтронов. Установки проекта предполагают использование различных детектирующих систем. Ранее на установке TANGRA были изучены угловые распределения γ -квантов [4–6], после чего решено было исследовать распределения рассеянных на атомных ядрах нейтронов. Описанный в настоящей работе эксперимент имел несколько целей. Помимо непосредственно изучения угловых распределений рассеянных нейтронов с начальной энергией $T_n = 14.1$ МэВ стояли задачи модернизации методики обработки экспериментальных данных и тестирования экспериментальной установки.

Выбор углерода как объекта исследования был продиктован несколькими факторами. Углерод являет-

* milovanov.ni18@physics.msu.ru

† daschkov.id15@physics.msu.ru

ся одним из самых распространенных элементов во Вселенной. Повсеместность этого элемента приводит к большому спросу на данные об этом атомном ядре. В естественной изотопной смеси углерода до 99% по количеству составляют ядра ^{12}C [7]. Легкие атомные ядра часто имеют возбужденные состояния, разнесенные по энергии более чем на 1 МэВ, так у ядра ^{12}C первое, второе и третье возбужденные состояния имеют энергии: $E_1 = 4.44$ МэВ, $E_2 = 7.65$ МэВ и $E_3 = 9.64$ МэВ, соответственно. Это свойство легких ядер делает удобным изучение первого, второго и третьего состояний ядра ^{12}C с помощью метода времени пролета.

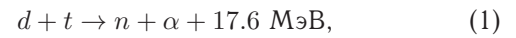
Высокий спрос на данные о взаимодействии нейтронов с ядром ^{12}C привел к накоплению большого набора измерений величины $d\sigma/d\Omega$ — дифференциального сечения рассеяния нейтронов на ядре ^{12}C . При энергии $T_n = 14.1$ МэВ с наибольшей вероятностью происходит упругое рассеяние нейтрона — (n, n_0) или рассеяние на первое возбужденное состояние ядра ^{12}C — (n, n_1) . Именно для каналов (n, n_0) и (n, n_1) было накоплено наибольшее количество экспериментальных данных. На рис. 1, приведены данные некоторых экспериментов [8–16] по измерению дифференциальных сечений рассеяния нейтронов на ядре ^{12}C для каналов (n, n_0) , (n, n_1) и начальной энергии нейтрона $14 \text{ МэВ} \leq T_n \leq 14.2 \text{ МэВ}$ в зависимости от угла рассеяния нейтронов в системе центра масс — θ_{cm} .

Данные разных авторов удовлетворительно согласуются между собой, однако имеют также расхождение разной степени для разных диапазонов углов рассеяния. В области малых углов, $\theta_{cm} \leq 50^\circ$, все эксперименты согласуются друг с другом в пределах ошибок значений, кроме значений из работы [8], они превышают остальные значения примерно в 1.3 раза. Максимальное расхождение значений дифференциального сечения упругого рассеяния нейтронов в области первого локального минимума, $60^\circ \leq \theta_{cm} \leq 75^\circ$, достигается для работ [15, 16], отношение значений превышает значение 1.5. Для области больших углов, $\theta_{cm} \geq 150^\circ$, наибольшее расхождение наблюдается для работ [9, 12] и не превышает 14%. Расхождения того же порядка наблюдаются для неупругого рассеяния нейтронов в областях малых и больших углов, $\theta_{cm} \leq 60^\circ$ и $\theta_{cm} \geq 150^\circ$. Из рассмотренных экспериментальных результатов следует, что современные данные для дифференциального сечения рассеяния нейтронов на ядре ^{12}C могут существенно отличаться друг от друга.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве источника нейтронов в установке использовался портативный генератор нейтронов ИНГ-27 [17] с максимальной интенсивностью $5 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$, разработанный во ВНИИА им. Н. Л. Духова (г. Москва). С выработкой ресурса интенсивность генерации нейтронов в полный телесный угол падала, и во время описывае-

мого эксперимента с углеродным образцом она составляла порядка $5 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$. В генераторе используется реакция взаимодействия дейтерия с тритием,



ускоренные до энергии от 80 кэВ до 100 кэВ дейтроны бомбардируют обогащенную тритием мишень. В результате реакции образуются нейтроны с энергией $T_n \approx 14.1$ МэВ вместе с α -частицами с энергией $T \approx 3.5$ МэВ.

В генераторе ИНГ-27 встроен кремниевый детектор для регистрации α -частиц, возникающих в реакции (1). Позиционно-чувствительный α -детектор представляет собой квадратную матрицу 8×8 пикселей с длиной стороны равной 55 мм. Траектория нейтрона достраивается из данных о направлении вылета α -частицы, которое, в свою очередь, определяется из известного положения тритиевой мишени и положения реагирующего пикселя α -детектора. Таким образом, регистрация α -частицы позволяет определить направление и время вылета нейтрона, соответствующего α -частице. Испущенные нейтроны взаимодействуют с исследуемым образцом, порождая вторичные частицы, которые затем регистрируются детекторной системой в совпадении с α -частицей. Выше описанная процедура называется методом меченых нейтронов (ММН) [18]. ММН позволяет определять направление вылета нейтрона и время его пролета. Кинетическая энергия меченого нейтрона T_n зависит от угла вылета нейтрона относительно направления движения дейтронов θ_{dn} [19]. Расстояние между центром тритиевой мишени и α -детектором, встроенным в генератор, составляет 100 ± 2 мм. Таким образом, в лабораторной системе координат в диапазоне углов $71^\circ \leq \theta_{nd} \leq 109^\circ$ излучаются нейтроны с энергиями в диапазоне $13.9 \text{ МэВ} \leq T_n \leq 14.3 \text{ МэВ}$. Можно считать, что каждому из 64 пикселей α -детектора генератора соответствует свой пучок меченых нейтронов с энергией, близкой к 14.1 МэВ.

Для генератора ИНГ-27 были произведены измерения пространственного распределения нейтронных пучков с помощью нейтронного профилометра. Профилометр имел размеры $120 \text{ мм} \times 120 \text{ мм}$ и состоял из $64 \times 64 = 4096$ чувствительных пикселей, передающих информацию о координатах нейтрона, зарегистрированного устройством. В результате измерений с профилометром были получены центры распределений нейтронных пучков, испускаемых генератором, на поверхности профилометра на расстояниях 9.6 см и 16.6 см от области рождения нейтронов, тритиевой мишени генератора. Считалось, что форма каждого меченого пучка в пространстве описывается двумерной функцией гаусса с шириной, линейно растущей при удалении от источника нейтронов. В этом предположении были определены положения и ширины нейтронных пучков на поверхности углеродной мишени. Расположение нейтронных пучков в пространстве определяет направление начального импульса рассеивающегося

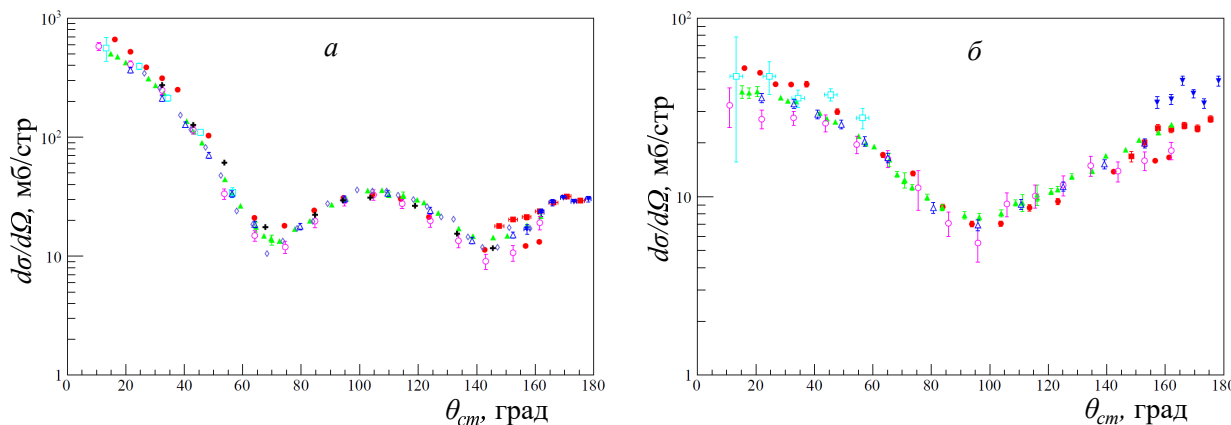


Рис. 1. Дифференциальные сечения рассеяния нейтронов с энергией $14 \text{ МэВ} \leq T_n \leq 14.2 \text{ МэВ}$ на ядре ^{12}C в зависимости от угла рассеяния θ_{cm} , измеренные другими авторами на углеродных образцах с естественным изотопным составом. *a* — рассеянные по каналу (n, n_0) , *b* — рассеянные по каналу (n, n_1) . Данные: \bullet — [8], \blacksquare — [9], \blacktriangle — [10], \blacktriangledown — [11], \circ — [12], \square — [13], \triangle — [14], \diamond — [15], $+$ — [16]

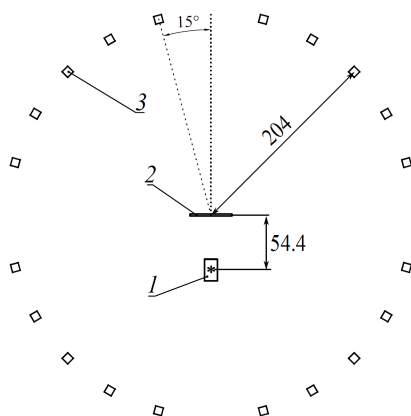


Рис. 2. Схема экспериментальной установки TANGRA, вид сверху. 1 — генератор ИНГ-27, 2 — облучаемый образец из углерода, 3 — один из двадцати детекторов. Звездочкой обозначено положение тритиевой мишени генератора ИНГ-27. Расстояния указаны в сантиметрах

нейтрона. Определение положения пучков генератора необходимо для расчета корректных углов рассеяния нейтронов для каждой комбинации нейтронного пучка и пластикового детектора.

В установке проекта TANGRA могут быть использованы различные детекторные системы в зависимости от типа исследуемых частиц. Конфигурация использованной экспериментальной установки изображена на рис. 2. Для измерения углового распределения рассеянных на образце нейтронов использовалась система из 20 пластиковых детекторов модели V80A300/3M-E1-P-X-NEG, состоящих из сцинтилляционного материала EJ-200, с размерами $8 \times 8 \times 30$ см. Детекторы располагались по кругу от изучаемого образца на расстоянии 2 м с шагом 15° по углу. Исследуемым образцом

являлся графитовый блок с размерами $44 \times 44 \times 2$ см, подвешенный в пластиковом кожухе в 54.4 см от тритиевой мишени генератора. Измерения с образцом производились в течение 22.6 часов, аналогичные измерения без графитового блока для оценки фона длились 8 часов.

2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

2.1. Определение количества зарегистрированных нейтронов

Чтобы повысить статистику измеренных значений, вместо 64 независимых начальных пучков нейтронов во время обработки данных рассматривались их суммы по 8 штук, все пиксели α -детектора были объединены в вертикальные стрипы (x), где стрип — это полоса из восьми пикселей, следующих друг за другом по вертикали и имеющих одну и ту же горизонтальную координату x . Таким образом, в обработке рассматривались не комбинации детекторов нейтронов (d) и пикселей α -детектора, а комбинации детекторов и стрипов ($d - x$). Для каждой комбинации $d - x$ была получена зависимость количества регистрируемых событий от разницы во времени t_{dx} между срабатыванием детектора нейтронов и срабатыванием стрипа α -детектора — времяпролетная гистограмма. Кроме того, при обработке данных были объединены события, приходившие из двух зеркально-симметричных комбинации $d - x$, таких, что углы рассеяния нейтрона θ_{cm} для обеих комбинаций имеют близкие значения.

Для исключения из обработки фоновых событий, не соответствующих рассеянию меченых нейтронов на ядрах вещества графитового образца, было произведено вычитание статистики гистограмм, полученных в измерениях без образца. Предварительно перед вычита-

нием статистика вычитаемых гистограмм умножалась на коэффициент пропорциональности между набранной статистикой при измерении с образцом и измерении без образца, влияние образца на вероятность возникновения вторичных частиц в окружении установки считалось незначительным. Примеры времяпролетных гистограмм, демонстрирующих результат процедуры вычитания фоновой статистики, для двух разных углов рассеяния в лабораторной системе координат θ_{lab} приведены на рис. 3. Всего было получено 80 подобных гистограмм для каждой пары зеркально-симметричных комбинации $d - x$.

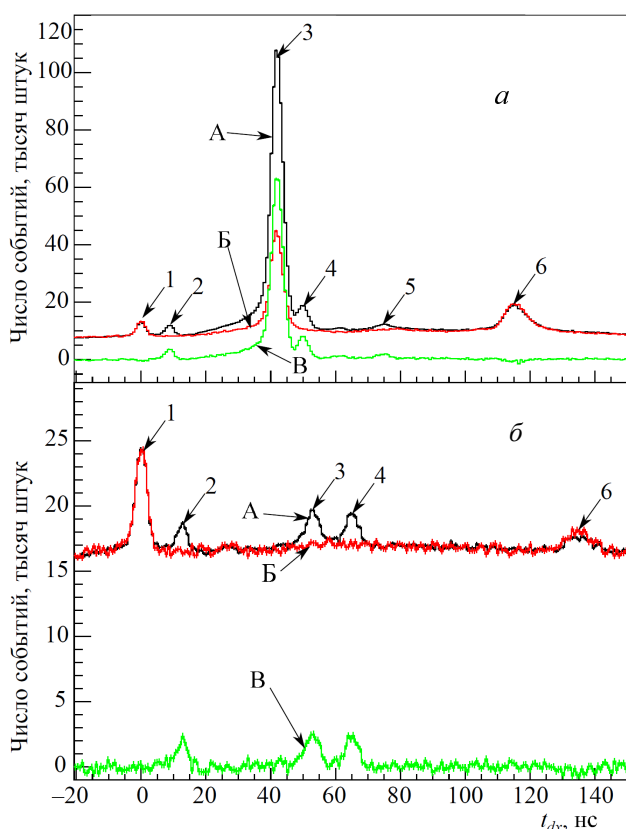


Рис. 3. Времяпролетные гистограммы, полученные в эксперименте TANGRA по рассеянию нейтронов на графитовом образце. *a* — для угла рассеяния нейтрона $\theta_{lab} = 36^\circ$, *b* — для угла рассеяния нейтрона $\theta_{lab} = 171^\circ$. А — гистограммы, полученные при измерении с графитовым образцом, Б — гистограммы, полученные при измерении фона без образца, В — итоговые гистограммы, полученные после процедуры вычитания. 1 — пик γ -квантов, исходящих от конструктивных элементов генератора, 2 — пик γ -квантов, испускаемых образцом, 3 — пик нейтронов, рассеянных по каналу (n, n_0) , 4 — пик нейтронов, рассеянных по каналу (n, n_1) , 5 — пик нейтронов, рассеянных по каналу (n, n_3) , 6 — пик γ -квантов, испускаемых одной из стен экспериментального зала

В итоговой гистограмме после вычитания наблюдались пики, события в которых соответствуют регистрации пластиковыми детекторами нейтронов с начальной

энергией 14.1 МэВ, рассеянных на ядрах углеродного образца. Была произведена аппроксимация наблюдаемых пиков для каналов (n, n_0) и (n, n_1) . Неупругое рассеяние было рассмотрено лишь на первом возбужденном состоянии ядра ^{12}C , из-за того, что для более высоких по энергии уровней вероятность возбуждения гораздо ниже, и статистика в наблюдаемых пиках времяпролетной гистограммы оказалось недостаточной для успешной аппроксимации.

Форма аппроксимированных пиков считалась гауссовой. В связи с особенностями обработки сигналов, снимаемых с α -детектора генератора, для описания левого плеча пика упругого рассеяния в некоторых комбинациях детектор-стрип потребовалось ввести асимметричную функцию, распределение Ландау [20], с обратным знаком аргумента — времени t_{dx} . Пик неупругого рассеяния был описан с использованием лишь функции Гаусса. В результате аппроксимации были получены параметры пиков — площади, ширины пиков и положения по времени t_{dx} . Площадь пика в гистограмме пропорциональна количеству нейтронов, рассеянных в соответствующей комбинации начального пучка нейтронов и пластикового детектора.

2.2. Моделирование эксперимента для вычисления поправок

Одновременное использование в эксперименте большого числа нейтронных пучков, конечные размеры детекторов нейтронов, а также значительные размеры мишени привели к возникновению эффектов, искажающих получаемые угловые распределения. В эти эффекты входит многократное рассеяние нейтронов на ядрах образца, различие телесных углов занимаемых каждым детектором относительно рассеивающего центра в мишени. Предполагалось, что поправка на неучтенные эффекты для измеренных данных представима в виде наборов рациональных положительных чисел, где каждое число k_{d-x} соответствует определенной комбинации $d - x$. Применение поправки выражается в домножении полученных из аппроксимаций количеств зарегистрированных частиц для каждой комбинации $d - x$, на k_{d-x} , в результате этой операции получается величина, пропорциональная дифференциальному сечению рассеяния зарегистрированной частицы. Для нахождения наборов значений k_{d-x} и определения угла рассеяния для каждой комбинации $d - x$ была создана программа моделирования эксперимента с использованием программного пакета Geant4 [21]. В модели были воспроизведены основные элементы экспериментальной установки: источник, мишень, детекторы нейтронов. Все элементы модели имели размеры и положения в пространстве, соответствующие реальным прототипам.

Отдельно решалась задача моделирования начальных нейтронных пучков генератора. Источником нейтронов в модели считалась материальная точка, отоб-

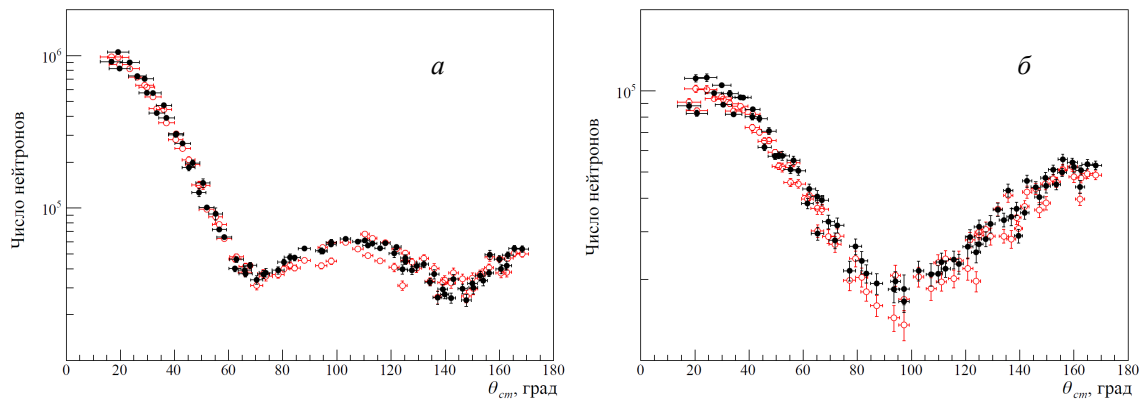


Рис. 4. Угловые распределения рассеянных на углероде нейтронов, полученные в эксперименте TANGRA. *a* — для канала (n, n_0) , *б* — для канала (n, n_1) . Данные: \circ — до применения поправки, \bullet — после применения поправки. Ошибки координат точек являются статистическими

ражающая тритиевую мишень генератора.

Каждый нейтрон принадлежал одному из 64 пучков, исходящих из тритиевой мишени, импульс каждого нейтрона несколько отклонялся от среднего направления пучка, в соответствии с распределением Гаусса, имевшим заданную ширину пучка. Заданные в модели ширины пучков и их распределения в пространстве соответствовали значениям, измеренным профилометром. Корпус генератора и стены экспериментального зала не имели модельной репрезентации, так как их влияние на оцениваемые величины считалось незначительным.

В сконструированной модели эксперимента была произведена симуляция рассеяния нейтронов от источника на углеродной мишени. В результате симуляции было получено по два набора данных для каждого из рассмотренных каналов: (n, n_0) и (n, n_1) . Первый набор соответствовал событиям, однократного рассеяния нейтронов на ядрах образца, второй — всем рассеянными по каналу нейтронам, попавшим в объем определенного пластикового детектора. Из наборов было найдено отношение к статистике регистрации в объеме детектора для каждой комбинации $d-x$, это отношение считалось искомым числом k_{d-x} . Из-за ненулевых величин ширины нейтронного пучка и размеров детекторов нейтронов, для каждой комбинации $d-x$ в симуляции наблюдалось распределение регистрируемых в детекторе нейтронов в зависимости от угла рассеяния. Для каждого такого распределения был определен центроид, средний угол рассеяния в лабораторной системе отсчета — θ_{lab} , а также выборочное стандартное отклонение среднего, которое было принято за погрешность определения угла. В последующем значение угла для суммы зеркально-симметричных комбинаций находилось как среднее арифметических двух θ_{lab} каждой комбинации $d-x$.

Таким образом, каждой комбинации $d-x$ был поставлен во взаимно однозначное соответствие некий усредненный угол рассеяния нейтрона. В результате

симуляции были получены корректные углы рассеяния нейтронов и наборы чисел k_{d-x} для каналов (n, n_0) и (n, n_1) , поправляющие экспериментальные данные на многократное рассеяние в образце и телесные углы детекторов нейтронов. Так как обработка производилась для суммированной статистики пар зеркально-симметричных комбинаций $d-x$, угол и значение коэффициента поправки для каждой пары находился как средние арифметические соответствующих значений для комбинации в паре. Измеренные угловые распределения до и после применения полученных в симуляции поправок изображены на рис. 4.

После применения поправок на многократное рассеяние и телесные углы детекторов наблюдается изменение согласованности экспериментальных точек друг с другом. В целом значения угловых распределений стали ближе к одной кривой, физически характеризующей рассеяние нейтронов на атомном ядре.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На установке TANGRA были получены угловые распределения упруго и неупруго рассеянных нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядре ^{12}C . Для сравнения форм полученных угловых распределений с литературными данными была произведена нормировка на дифференциальное сечение рассеяния нейтронов. Сам процесс нормировки заключался в нахождении коэффициента пропорциональности между интегралами интерполированных данных, полученных в настоящей работе, с интерполированными в области углов от 20° до 50° данными других авторов [10, 14]. Итоговые угловые распределения рассеянных нейтронов в каналах (n, n_0) и (n, n_1) , нормированные для сравнения с соответствующими дифференциальными сечениями других авторов изображены на рис. 5.

Полученные данные хорошо согласуются с результатами других экспериментов [9, 10, 14], показанных

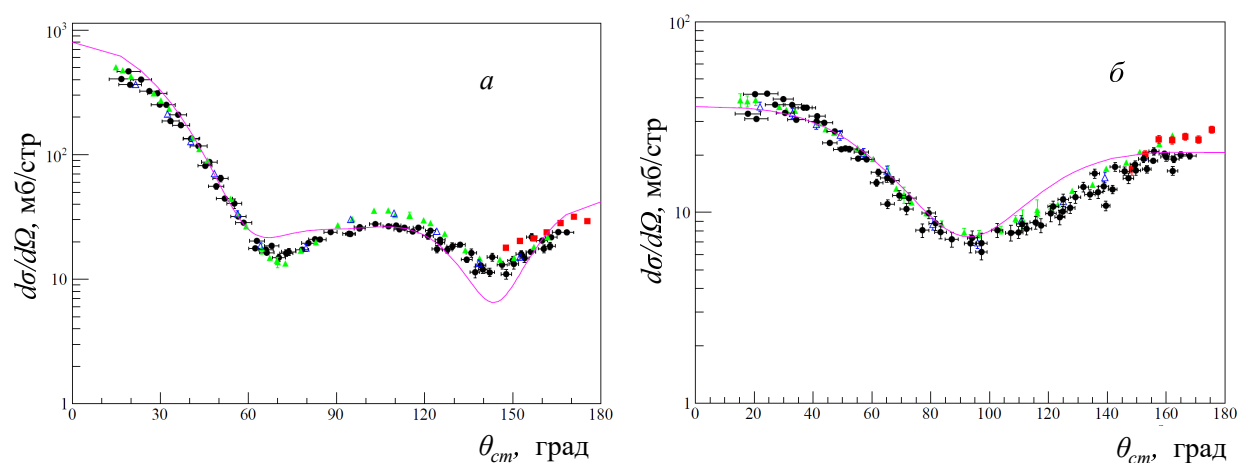


Рис. 5. Дифференциальные сечения рассеянных на углероде нейтронов в зависимости от угла рассеяния θ_{cm} . *а* — для канала (n, n_0) , *б* — для канала (n, n_1) . Данные: ● — настоящая работа, ■ — [9], ▲ — [10], △ — [14], фиолетовая кривая — оценка ENDF/B-VIII.0 [22]. Ошибки координат точек эксперимента TANGRA являются статистическими

на рис. 5. При этом все экспериментальные данные заметно отличаются от оценок дифференциальных сечений соответствующих величин из базы данных [22]. В угловом распределении упруго рассеянных нейтронов значительное расхождение наблюдается в области от 90° до 120° , данные других авторов больше полученных в эксперименте TANGRA значений на величину не более 10 мб/стр. Для канала (n, n_1) полученные значения при $\theta_{cm} > 155^\circ$, примерно на 10 мб/стр меньше результатов других экспериментальных работ. Подобные различия могут быть связаны с отклонением примененных поправок от требуемых значений. Отклонение поправок может объясняться использованием в пакете Geant4 неподходящих данных для симуляции рассеяния нейтрона на ^{12}C , в Geant4 используются оценки углового распределения рассеянных нейтронов из базы данных ENDF, значения которых для ^{12}C заметно отличаются от данных, приведенных в экспериментальных работах. Еще одной причиной возникновения отклонения поправок могут быть ошибки в определении пространственного распределения нейтронных пучков, исходящих от генератора, что связано со сложной геометрической формой реального пучка и непостоянством характеристик нейтронного профилометра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы был выполнен эксперимент по изучению рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на углероде с использованием метода меченых нейтронов, проведенный на установке TANGRA. Был разработан и использован метод поправок на многократное рассеяние в образце с использованием Geant4. Было получено угловое распределение рассеянных нейтронов для реакций упругого рассеяния на ^{12}C и неупругого рассеяния на первый возбужденный уровень ядра ^{12}C .

В будущем планируется проведение модернизированного эксперимента с углеродным образцом в похожей конфигурации. В новом эксперименте будет использоваться новый нейтронный генератор с интенсивностью, примерно на порядок превышающую интенсивность использованного генератора. Увеличение набираемой статистики, кратное увеличению интенсивности, предположительно позволит получить данные для уровней ^{12}C , расположенных выше первого, улучшить разрешение по углу рассеяния, за счет отсутствия необходимости объединения при обработке данных с пикселей генератора.

[1] Chen Z. M., Baird K. Howell C.R. et al. // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. 1993. **19**, N 6. P. 877.
 [2] Дашков И. Д., Федоров Н. А., Грозданов Д. Н. и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. **85**, № 10. С. 1436.
 [3] Ruskov I.N., Kopatch Y.N., Bystritsky V.M. et al. // Physics Procedia. 2015. **64**. P. 163.

[4] Грозданов Д.Н., Федоров Н.А., Быстрицкий В.М. и др. // Ядерная физика. 2018. **81**, № 5. С. 548.
 [5] Грозданов Д.Н., Федоров Н.А., Копач Ю.Н. и др. // Ядерная физика. 2020. **83**, № 3. С. 200.
 [6] Федоров Н.А., Грозданов Д.Н., Копач Ю.Н. и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. **84**, № 4. С. 480.
 [7] Meija J., Coplen T.B., Berglund M. et al. // Pure Appl.

- Chem. 2016. **88**. P. 265.
- [8] *Takahashi A., Ichimura E., Sasaki Y.* et al. OKTAVIAN-Report A-87-03. Osaka University, 1987.
- [9] *Mezzetti E., Minetti B., Pasquarelli A.* // Lettere al Nuovo Cimento. 1978. **22**. Issue 3. P. 91.
- [10] *Börker G., Mannhart W., Siebert B.R.L.* // Nuclear Data for Science and Technology. Springer Berlin, 1992. P. 317.
- [11] *Bonazzola G.C., Bressani T., Chiavassa E.* et al. // Lett. Nuovo Cimento. 1972. **3**. P. 99.
- [12] *Haouat G., Lachkar J., Sigaud J.* et al. // Nuclear science and engineering. 1978. **65**.
- [13] *Hata K., Shirato S., Ando Y.* // Japanese report to NEANDC No.155. 1990.
- [14] *Baba M., Matsuyama S., Fujisawa M.* et al. // Proceedings of the 1989 seminar on nuclear data No.JAERI-M-90-025. Japan Atomic Energy Research Institute, 1990.
- [15] *Dave J.H., Gould C.R.* // Phys. Rev. C. 1983. **28**. P. 2212.
- [16] *Drosg M., Lisowski P.W., Drake D.M.* et al. Los Alamos Scientific Laboratory Reports No.11367-MS. Los Alamos National Laboratory, 1988.
- [17] http://www.vniia.ru/production/incl/prospekt_element.pdf
- [18] *Valković V.* 14 MeV Neutrons. Physics and applications. CRC Press, 2016.
- [19] *Немец О.Ф., Гофман Ю.В.* Справочник по ядерной физике. Научная думка, 1975. С. 279.
- [20] *Kölbig K.S., Schorr B.* // Computer Physics Communications. 1984. **31**. Issue 1. P. 97.
- [21] *Allison J., Amako K., Apostolakis J.* et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2016. **835**. P. 186.
- [22] *Chadwick M.B., Obložinský P., Herman M.* et al. // Nuclear Data Sheets. 2006. **107**. P. 2931.

Peculiarities of processing the experiment on the scattering of 14.1 MeV tagged neutrons on carbon

N. Yu. Milovanov^{1a}, I. D. Dashkov^{2b}, N. A. Fedorov², D. N. Grozdanov^{2,3}, Yu. N. Kopach², I. N. Ruskov³, V. R. Skoy², T. Yu. Tretyakova^{1,2,4}, A. Erbolot^{2,5}, S. Dabylova^{2,6}, and TANGRA collaboration

¹*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia*

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

⁴*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

⁵*Dubna State University, Dubna 141980, Russia*

⁶*L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana 010008, Republic of Kazakhstan*

E-mail: ^amilovanov.ni18@physics.msu.ru, ^bdaschkov.id15@physics.msu.ru

The angular distributions of scattered neutrons in the $n+^{12}\text{C}$ reaction are measured at an initial neutron energy of 14.1 MeV for the cases of elastic scattering and inelastic scattering to the first excited state ($J^P = 2^+$, $E_1 = 4.44$ MeV) of ^{12}C nucleus. The experiment was carried out within the framework of the TANGRA (TAGged Neutrons and GAMMA RAYS) project, based at the Frank Laboratory of Neutron Physics of Joint Institute for Nuclear Research. To register neutrons, 20 plastic detectors were used, scattered neutrons of different energies were separated by the time-of-flight technique. The collected data were corrected using a Monte Carlo simulation of the experiment to take into account multiple scattering in the sample and the finite size of the detectors. The resulting angular distribution was normalized to the experimental data of other authors to obtain the absolute values, the differential scattering cross section.

PACS: 25.40.Dn, 25.40.Fq.

Keywords: elastic neutron scattering, inelastic neutron scattering, ^{12}C , differential cross section, tagged neutrons.

Received 20 May 2022.

Сведения об авторах

1. Милованов Никита Юрьевич — студент; тел.: (495) 939-56-36, e-mail: nikitam110401@gmail.com.
2. Дашков Илья Дмитриевич — инженер; тел.: (496) 216-27-85, e-mail: daschkov.id15@physics.msu.ru.
3. Федоров Никита Александрович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (496) 216-31-13, e-mail: na.fedorov@physics.msu.ru.
4. Грозданов Димитър Николов — науч. сотрудник; тел.: (496) 216-27-85, e-mail: dimitar@nf.jinr.ru.
5. Копач Юрий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, нач. сектора; тел.: (496) 216-24-59, e-mail: kopatch@nf.jinr.ru.
6. Русков Иван Николов — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: +359 (2) 979-54-57, e-mail: ivan@inme.bas.bg.
7. Ской Вадим Рудольфович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (496) 216-33-88, e-mail: skoy@nf.jinr.ru.
8. Третьякова Татьяна Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (495) 939-56-36, e-mail: tretyakova@sinp.msu.ru.
9. Аскар Эрболот — лаборант; тел.: (496) 216-31-13, e-mail: erb.askar96@mail.ru.
10. Дабылова Салтанат — инженер; тел.: (496) 216-31-13, e-mail: pearl_04_94@mail.ru.