

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА
«Изучение рассеяния быстрых нейтронов на
углероде с использованием метода меченых
нейтронов»

Выполнил студент
413 группы
Милованов Никита Юрьевич

Научный руководитель:
к.ф.-м. н. Т.Ю. Третьякова

Научный консультант:
к.ф.-м. н, м.н.с. Ю.Н. Копач

Допущена к защите
Заведующий кафедрой
чл.-корр. РАН Э.Э. Боос

Москва 2022

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	1
1 Постановка эксперимента по исследованию угловых распределений рассеянных нейтронов	5
2 Обработка данных	10
2.1 Аппроксимация времяпролетных гистограмм	10
2.2 Нормированное угловое распределение	13
2.3 Поправки на многократное рассеяние	18
3 Результаты	20
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	23
Приложение	28

ВВЕДЕНИЕ

Реакции под действием быстрых нейтронов предоставляют важную информацию для теоретических исследований в ядерной физике. Интерес к данным реакциям не ограничивается лишь фундаментальными исследованиями, благодаря компактности нейтронных генераторов реакции с нейтронами нашли широкое применение в элементном и изотопном анализе, а также в досмотровых установках. Для всех этих областей точность входных параметров для различных оценок и моделирований является важным фактором, поэтому уточнение и дополнение ранее полученных данных, в том числе угловых распределений рассеянных нейтронов, остается актуальным.

В качестве исследуемого образца углерод был выбран сразу по нескольким причинам. Углерод является одним из самых распространенных элементов во Вселенной. Характеристики ^{12}C важны для моделирования процессов звездного нуклеосинтеза, также данные о взаимодействии углерода и нейтронов востребованы для прикладных задач. С другой стороны, доступность, большое количество данных по ^{12}C , характерный для легких ядер большой энергетический промежуток между возбужденными состояниями делает углеродную мишень удобной для отработки методики эксперимента. У ядра ^{12}C первое, второе и третье возбужденные состояния имеют энергии $E_1 = 4.44$ МэВ, $E_2 = 7.65$ МэВ и $E_3 = 9.36$ МэВ, которые различаются между собой более чем на 1 МэВ. Это свойство позволяет применить метод, основанный на времени пролета, при изучении этих возбужденных состояний ядра ^{12}C .

Высокий спрос на данные о взаимодействии нейтронов с ядром ^{12}C привел к накоплению большого числа наборов значений дифференци-

ального сечения для реакций рассеяния нейтронов на ^{12}C . На рисунках 1 и 2 в качестве примера приведены дифференциальные сечения рассеяния, полученные ранее в работах [1–8] в диапазоне начальных энергий нейтрона от 14 МэВ до 14.13 МэВ. Данные работы были выполнены с использованием различных методик и охватывают различные диапазоны углов.

Здесь и далее введены обозначения:

(n, n_0) — реакция упругого рассеяния нейтронов на ядре ^{12}C ;

(n, n_i) — реакция неупругого рассеяния нейтронов на i -ом возбужденном состоянии ядра ^{12}C , $i=1, 2, 3$;

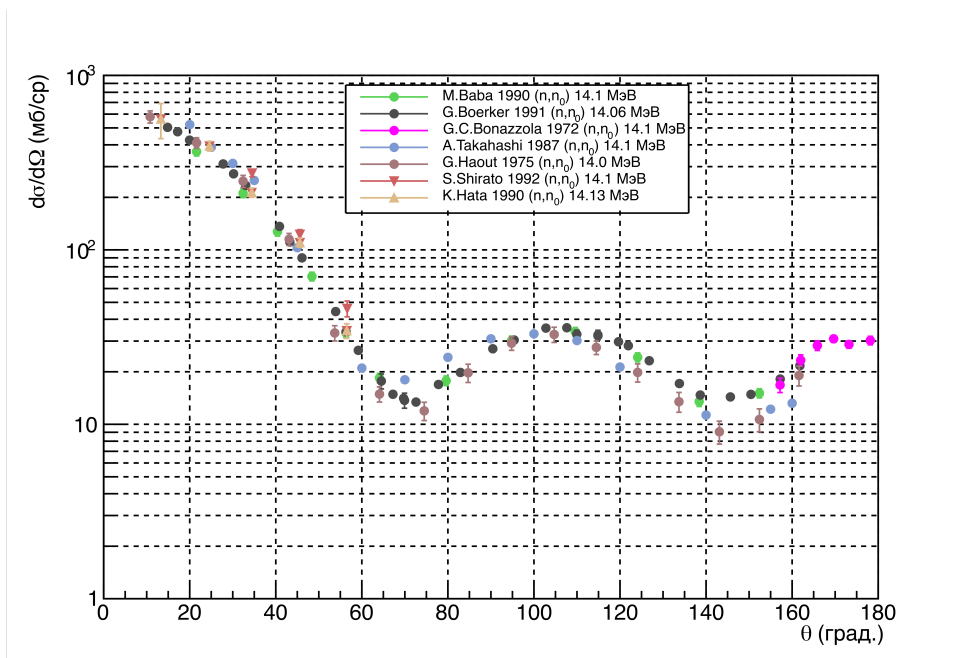


Рисунок 1: Дифференциальное сечение упругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ^{12}C [1–7]

Можно заметить, что для дифференциального сечения упругого рассеяния данные работ [1-7] согласуются в области до 60° . В области углов от 60° до 100° данные работы [4] имеют значения выше, нежели чем у работ [1,2,5], максимальное расхождение достигается между работами [2] и [4], а также [1] и [4] и составляет в обоих случаях около 25%. При углах более 100° данные работ [4,5] имеют заниженные в сравнении с работами

[1,2,3], наибольшее расхождение в данных наблюдается между [1] и [5], доходя вплоть до 58%.

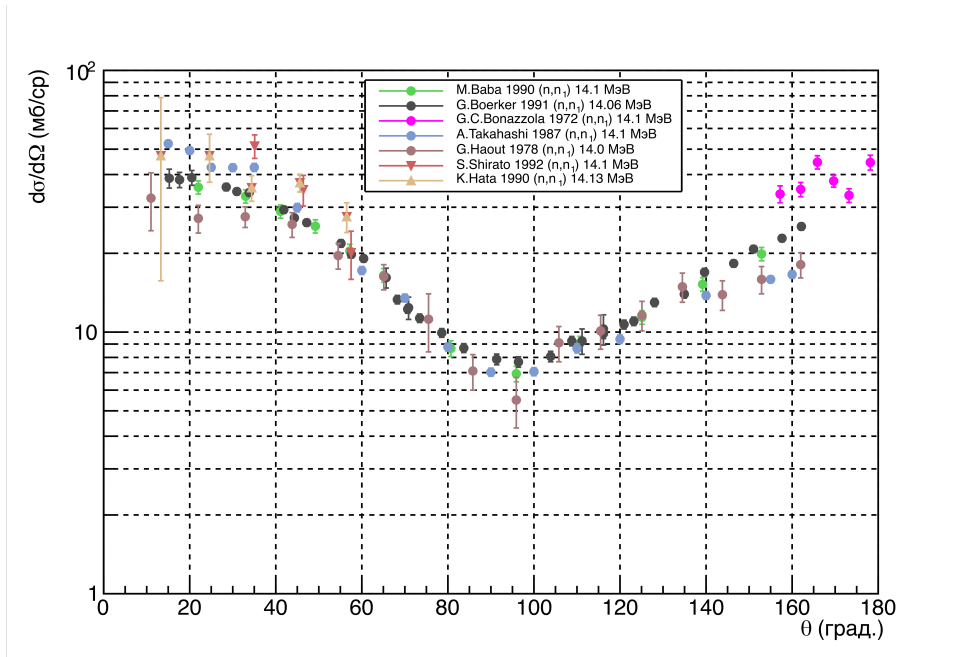


Рисунок 2: Дифференциальное сечение неупругого рассеяния с возбуждением первого $2+$ уровня ядра ^{12}C [1–4,6–8]

Для дифференциального сечения неупругого рассеяния данные работ [1-4,6-8] имеют довольно значительный разброс значений, достигающий до 26% между данными работ [2] и [4]. В области от 60° до 80° в работах [1,2,4,5] наблюдается согласие. В диапазоне углов от 80° до 100° , в котором располагается минимум распределений всех работ, можно наблюдать расхождение между работами [1,2,4] и [5], достигающий своего максимума 29% между работами [2] и [8]. Для углов от 100° до 140° можно наблюдать согласие данных работ [1,2,4,8], в то время как при углах более 140° наблюдается расхождение между работами [1,2] и [3,4,8], с наибольшим расхождением в 51% между работами [3] и [8]. Из всех рассмотренных экспериментальных данных следует, что современные данные для дифференциального рассеяния нейтронов на ^{12}C могут существенно отличаться друг от друга. Из всех этих работ были выделе-

ны работы [1,2,3], описывающие дифференциальное сечение рассеяния на всем диапазоне углов, а также являющиеся самосогласованными, то есть имеющими наименьшее отклонение друг от друга на одном и том же диапазоне углов, для дальнейшего сравнения с результатами нашей работы.

Целью данного исследования является отработка методики эксперимента по рассеянию нейтронов с энергией 14.1 МэВ, изучение угловых распределений нейтронов, наблюдаемых при упругом и неупругом рассеянии на углероде, а также их сравнение с работами других авторов.

1 Постановка эксперимента по исследованию угловых распределений рассеянных нейтронов

Данная работа была проведена в рамках проекта TANGRA (TAGged Neutrons and Gamma RAys) [9] Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне. Главной задачей проекта является изучение ядерных реакций под действием быстрых нейтронов. Установки проекта TANGRA предполагают использование различных детектирующих систем, позволяющих регистрировать как угловые распределения γ -квантов, так и нейтронов. Ранее на этой установке были изучены угловые распределения γ -квантов [10,11,12], после чего решено было исследовать распределения рассеянных нейтронов. Принцип работы установок проекта TANGRA по изучению вторичных излучений представлен на схеме, изображённой на рисунке 3.

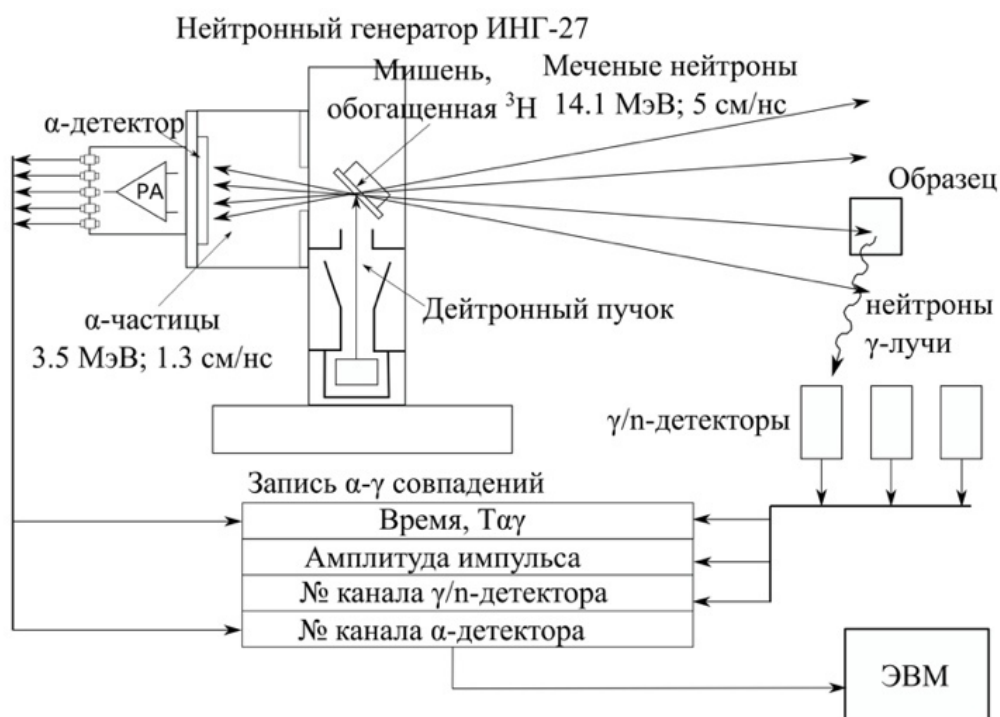


Рисунок 3: Схема эксперимента на установке TANGRA.

В установке использовался портативный генератор нейтронов ИНГ-27 [13], разработанный во Всероссийском научно-исследовательском институте автоматики им. Н.Л. Духова (ВНИИА, г. Москва) с максимальной интенсивностью $5 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$. С выработкой ресурса интенсивность падает, и во время эксперимента с углеродом составляет 10^6 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 $T_n \approx 14.1 \text{ МэВ}$ вместе с α -частицами с энергией $T_\alpha \approx 3.5 \text{ МэВ}$. В лабораторной системе координат (ЛСК) для этой реакции закон сохранения энергии можно записать как $T_d + Q = T_n + T_\alpha$. Кинетическая энергия нейтрона T_n в ЛСК зависит от угла вылета нейтрона относительно дейтронного пучка θ_n [14].

$$T_n = \frac{m_n m_d T_d}{(m_n + m_\alpha)^2} \left(\cos \theta_n \pm \sqrt{\cos^2 \theta_n + \frac{(m_n + m_\alpha)[(m_\alpha - m_d)T_d + m_\alpha Q]}{m_n m_d T_d}} \right)^2, \quad (2)$$

где θ_n — угол между импульсом дейтрона и импульсом нейтрона. В нашем случае угол $\theta_n \approx 90^\circ$. Расстояние между центром тритиевой мишени и кремниевым α -детектором, встроенным в генератор, составляет $100 \pm 2 \text{ мм}$. Позиционно-чувствительный α -детектор, представляющий собой матрицу 8×8 пикселей, с длиной стороны равной 55 мм, позволяет регистрировать только те α -частицы, которые вылетели под углами $71^\circ \dots 109^\circ$ относительно направления пучка дейтронов, что связано с геометрией расположения частей генератора. Таким образом, в ЛСК θ_n отличается от 90° не более чем на 19° , соответственно T_n , согласно

формуле (2), отклоняется от 14.1 МэВ не более чем на 0.2 МэВ.

Траектория нейтрона достраивается из данных о направлении вылета α -частицы, которое в свою очередь определяется из известного положения тритиевой мишени и положения одного из 64 пикселей α -детектора. Таким образом, регистрация α -частицы позволяет определить направление вылета нейтрона. Далее испущенные нейтроны взаимодействуют с исследуемым образцом, порождая вторичные частицы, которые далее регистрируются детекторами. Вышеописанная процедура называется методом меченых нейтронов (ММН) [15]. ММН позволяет определять направление вылета нейтрона и время его полета. Введем понятие стрипа α -детектора: будем называть стрипом полосу из восьми пикселей α -детектора, следующих друг за другом в одном направлении. Таким образом, 64 пикселя α -детектора разделены на 8 X-стрипов и 8 Y-стрипов, расположенных горизонтально и вертикально соответственно. В прошедшем эксперименте по изучению угловых распределений рассеянных нейтронов статистика событий, пришедшаяся на Y-стрипы суммировалась, в то время как разделение по X-стрипам сохранялось. Подобное суммирование позволило увеличить число регистрируемых событий и, как следствие, уменьшить суммарную ошибку.

В установке проекта TANGRA могут быть использованы различные детекторные системы в зависимости от типа исследуемых частиц. Для измерения углового распределения рассеянных на образце нейтронов использовалась система детектирования из 20 пластиковых детекторов модели V80A300/3M-E1-P-X-NEG, состоящих из сцинтилляционного материала EJ-200, обладающих размерами 8 см \times 8 см \times 30 см. Детекторы были расположены по кругу от изучаемого образца на расстоянии 2 м с шагом 15° по углу. Исследуемым образцом является графитовый блок размером 44 см \times 44 см \times 2 см, который был помещен в тонкий

пластиковый контейнер, подвешенный на тонких тросах к штанге в 50 см от тритиевой мишени генератора.

Изотопный состав образца: ^{12}C (98.9%), ^{13}C (1.1%). Ввиду того, что доля изотопа ^{12}C в образце превышает долю изотопа ^{13}C более чем в 89.9 раз, считалось, что мишень состоит только из ^{12}C . Измерения с образцом проводились в течение 22.6 часов, аналогичные измерения без графитового образца для оценки фона длились 8 часов. Конфигурация экспериментальной установки изображена на рисунке 4.

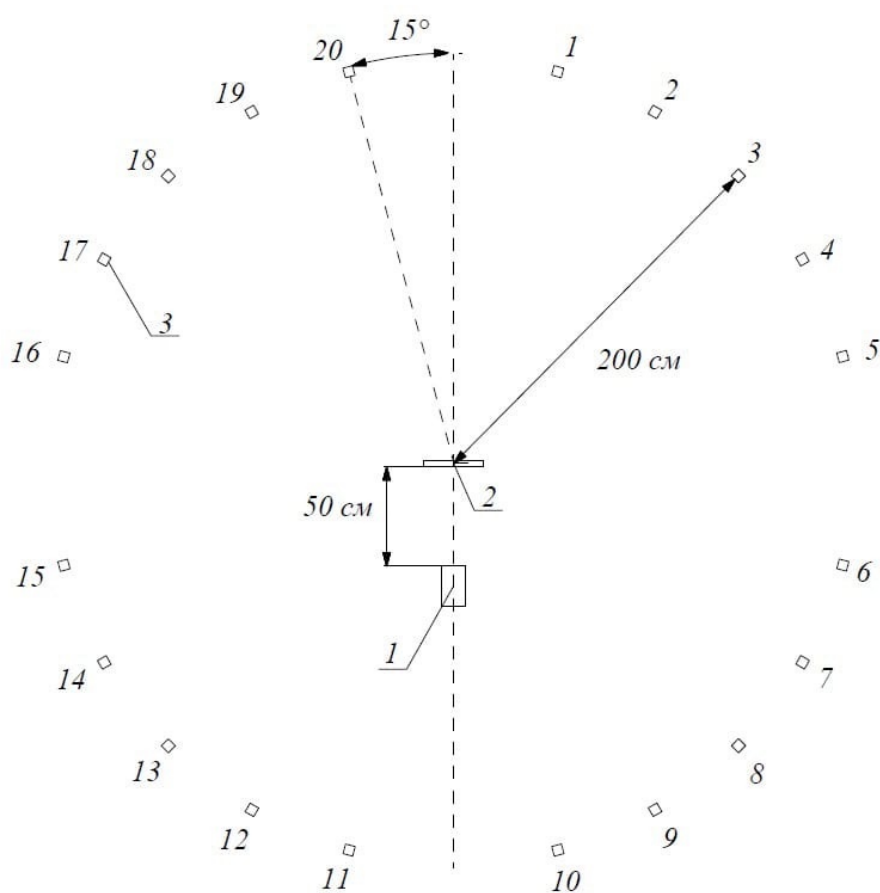


Рисунок 4: Схема экспериментальной установки TANGRA. 1 – генератор ИНГ-27, 2 – облучаемый образец, 3 – один из двадцати детекторов.

Для генератора ИНГ-27 были произведены измерения пространственного распределения нейтронных пучков с использованием нейтронного профилометра, имеющего размеры 120 мм × 120 мм и состоящего из

64×64=4096 чувствительных пикселей, позволяющих передавать информацию о координатах нейтрона, который был зарегистрирован устройством. Измерения с профилометром позволили получить центры нейтронных пучков, испущенных 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 меченых пучков на поверхности мишени. Расположение нейтронных пучков в пространстве определяет направление начального импульса рассеивающегося нейтрона. Определение положения пучков генератора необходимо для расчета корректных углов рассеяния каждой комбинации детектор – стрип.

2 Обработка данных

2.1 Аппроксимация времяпролетных гистограмм

В данном эксперименте был использован метод меченых нейтронов, что позволило значительно снизить количество фоновых событий, так как нейтроны регистрировались лишь в совпадении с соответствующими им α -частицами. Для каждой комбинации детектор – стрип была получена зависимость количества регистрируемых событий от времени срабатывания детектора нейтронов относительно срабатывания α -детектора. Пример подобной зависимости изображен на рисунке 5.

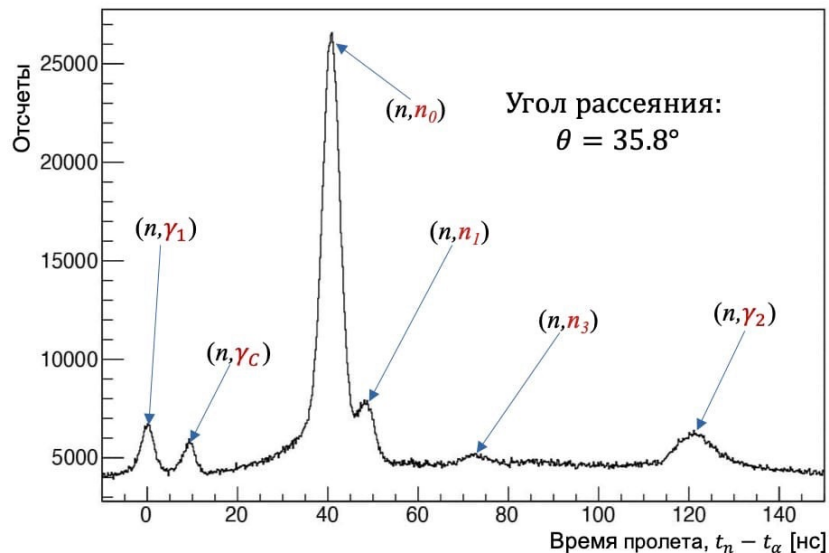


Рисунок 5: Пример времяпролетной гистограммы для угла рассеяния $\theta = 35.8^\circ$; (n, γ_1) – пик γ -квантов, испускаемых конструктивными элементами генератора; (n, γ_C) – пик γ -квантов, образующихся в облучаемом образце углерода; (n, n_0) – реакция упругого рассеяния нейтронов; (n, n_1) – реакция неупругого рассеяния нейтронов на первом возбужденном состоянии; (n, n_3) – реакция неупругого рассеяния нейтронов на третьем возбужденном состоянии; (n, γ_2) – пик фоновых γ -квантов, возникших в стене экспериментального зала.

Во времяпролетных гистограммах наблюдались пики упругого и неупругого рассеяния нейтронов, разделенные по времени. Была произведена аппроксимация наблюдаемых пиков. Неупругое рассеяние бы-

ло рассмотрено лишь на первом возбужденном состоянии углерода, ввиду того, что для более высоких уровней возбуждения углерода вероятность возбуждения гораздо ниже, и статистика в наблюдаемых пиках времяпролетной гистограммы оказалась недостаточной для проведения успешной аппроксимации для большей части комбинаций детектора и X-стрипа.

Критерием качества проведенной аппроксимации служил показатель χ^2/ndf :

$$\chi^2/ndf = \frac{1}{ndf} \sum_{i=1}^{ndf} \left(\frac{X_i - \mu}{\sigma} \right)^2, \quad (3)$$

где ndf — количество степеней свободы, X_i — независимые нормальные случайные величины, μ — математическое ожидание, σ — среднеквадратичное отклонение. Аппроксимация тем лучше, чем ближе этот показатель к единице. Для большинства времяпролетных гистограмм, за исключением подверженных прямому пучку нейтронов из генератора, значение данного показателя оказалось менее двух, что говорит в целом об успешной обработке пиков.

В результате аппроксимации были получены параметры, характеризующие площади пиков, ширины пиков и относительные времена прихода упруго и неупруго рассеянных нейтронов в детекторы для каждой комбинации детектор – стрип. Для описания пика упругого рассеяния помимо функции Гаусса, в связи с особенностями обработки сигналов, снимаемых с α -детектора генератора, для некоторых комбинаций детектор – стрип потребовалось ввести асимметричную функцию Ландау [16] для описания левого плеча пика упругого рассеяния. Пик неупругого рассеяния был описан с использованием лишь функции Гаусса. Для описания подложки случайных совпадений в обоих случаях использовалась константа. Площадь пика в гистограмме пропорциональна количеству

нейтронов, рассеянных в соответствующей комбинации начального пучка нейтронов и пластикового детектора. Примеры успешной аппроксимации пиков (n, n_0) и (n, n_1) в рамках их модельного описания функциями Гаусса и Ландау на времяпролетных гистограммах изображены на рисунке 6.

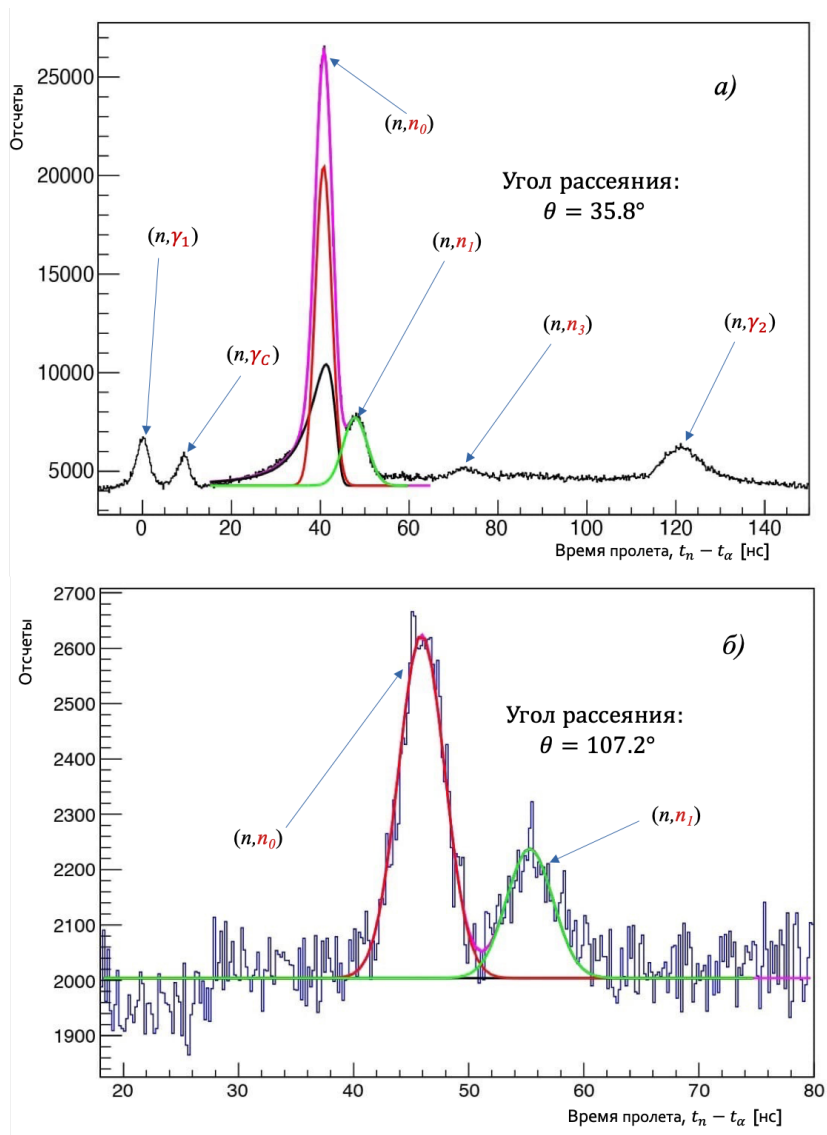


Рисунок 6: Примеры аппроксимации функциями Гаусса и Ландау пиков (n, n_0) и (n, n_1) на времяпролетных гистограммах. а— пик (n, n_0) аппроксимируется с использованием функции Ландау (изображена черным) и Гаусса (изображена красным), б— пик (n, n_0) аппроксимируется с использованием функции Гаусса (изображена красным). Зеленым изображена функция Гаусса для описания пика (n, n_1) , розовым изображена суммарная аппроксимация с использованием двух функций Гаусса и одной функции Ландау.

2.2 Нормированное угловое распределение

Каждой комбинации детектор – стрип соответствует определенный угол рассеяния, который можно получить, зная геометрические данные установки. Таким образом было получено угловое распределение упруго и неупруго рассеянных нейтронов- сопоставлением числа зарегистрированных рассеянных нейтронов с углом рассеяния.

Для сравнения форм полученных угловых распределений с литературными данными была произведена нормировка на дифференциальные сечения рассеяния нейтронов из работ [1,2,3]. Каждой комбинации детектор – стрип соответствует определенный угол рассеяния, который можно определить из геометрических данных установки, благодаря же аппроксимации пиков были получены количества упруго и неупруго рассеянных нейтронов для каждой подобной комбинации, определяющей угол рассеяния. Далее процесс нормировки заключался в нахождении коэффициента пропорциональности между интегралами интерполированных данных, полученных в данном эксперименте, с интерполированными в области углов от 20° до 40° данными других авторов [1,2]. Полученный коэффициент нормировки, введенный как отношение интеграла литературных данных к данным нашего эксперимента, $K_1 = 0.000464$. Однако наличие фоновых событий привело к некоторому расхождению с данными других авторов. Угловые распределения с учетом фоновых событий, возникающих из-за случайных совпадений, изображены на рисунках 7 и 8.

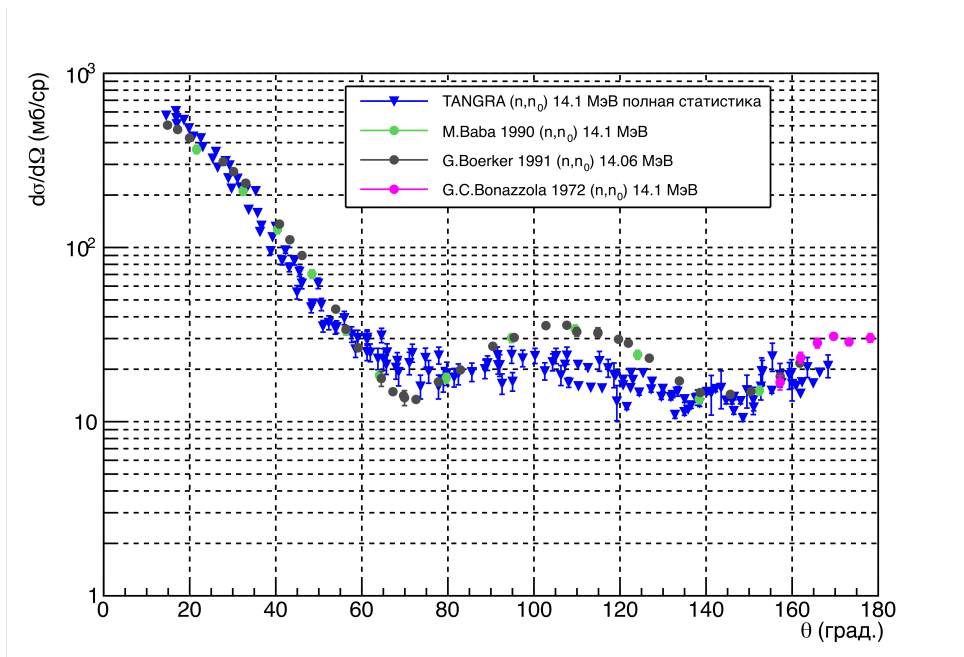


Рисунок 7: Нормированное угловое распределение (n, n_0) , полученное в эксперименте TANGRA с учетом фоновых событий в сравнении с данными работ [1,2,3]

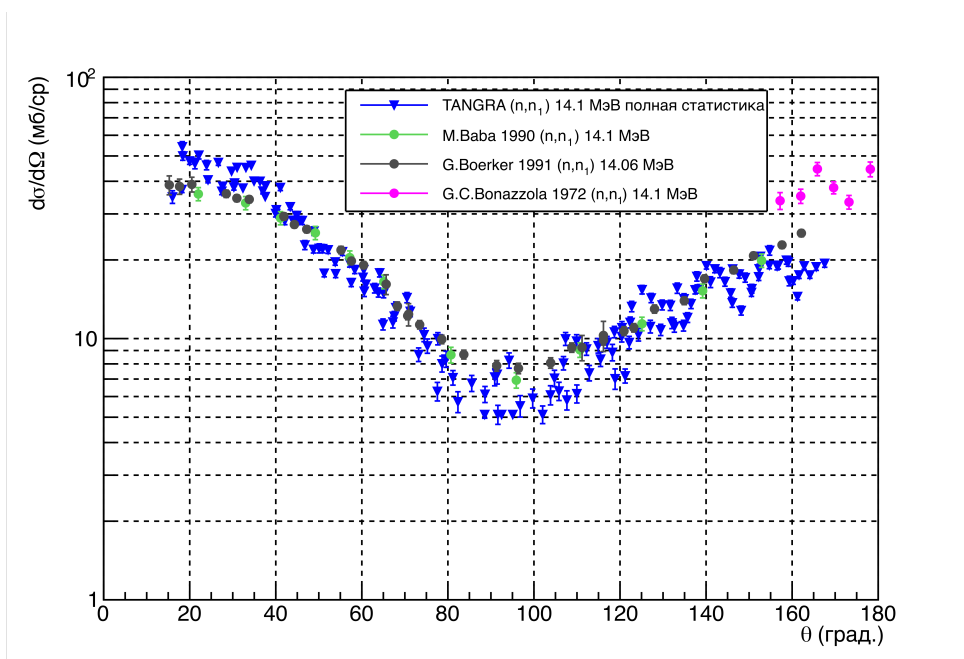


Рисунок 8: Нормированное угловое распределение (n, n_1) , полученное в эксперименте TANGRA с учетом фоновых событий в сравнении с данными работ [1,2,3]

Для улучшения качества наших данных было произведено измерение без образца, которое позволило получить временные спектры фоновых событий. Далее было произведено её вычитание из спектров изме-

рений с образцом. Благодаря этим действиям было получено “истинное” угловое распределение без примеси фоновых событий. Угловые распределения с вычитанием фоновых событий изображены на рисунках 9 и 10.

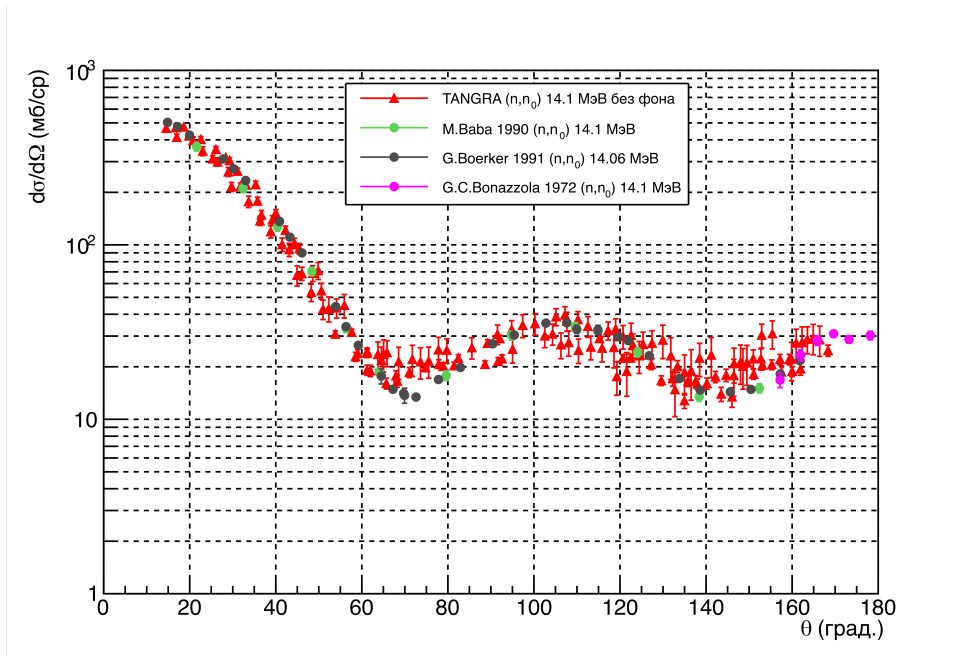


Рисунок 9: Нормированное угловое распределение (n, n_0) с вычитанием (красный цвет) фоновых событий в сравнении с [1,2,3]

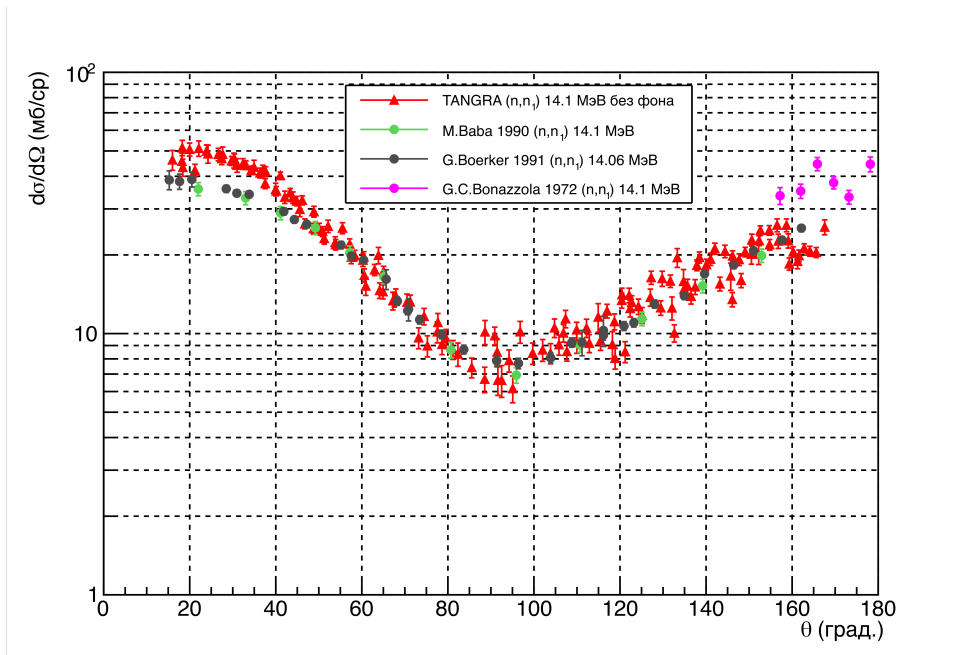


Рисунок 10: Нормированное угловое распределение (n, n_1) с вычитанием (красный цвет) фоновых событий в сравнении с [1,2,3]

При сравнении угловых распределений с вычитанием и без вычитания фоновых событий можно наблюдать определенные различия. В области малых углов, менее 20° , наблюдаемый результат при учете фоновых событий лежит выше других экспериментов [1,2], что может быть результатом неточностей обработки при слишком большом числе совпадений, так как эта область подвержена наибольшему влиянию прямого пучка нейтронов из генератора, статистика которого в этом случае не отбрасывается. Также можно заметить, что в области от 100° до 120° в угловом распределении упруго рассеянных нейтронов с вычетом фоновых событий наблюдается локальный максимум, в то время как данные с фоном не содержат выраженного пика. Подобные различия могут быть связаны с тем, что аппроксимация пиков производилась на подложке, которая в используемой модели являлась константой. При учете фоновых событий аппроксимация константой подложки становится недостаточной, так как подложка имеет более сложный вид, чем в случае с вычитанием фоновых событий. Сравнение угловых распределений с вычитанием и без вычитания фоновых событий изображено на рисунках 11 и 12.

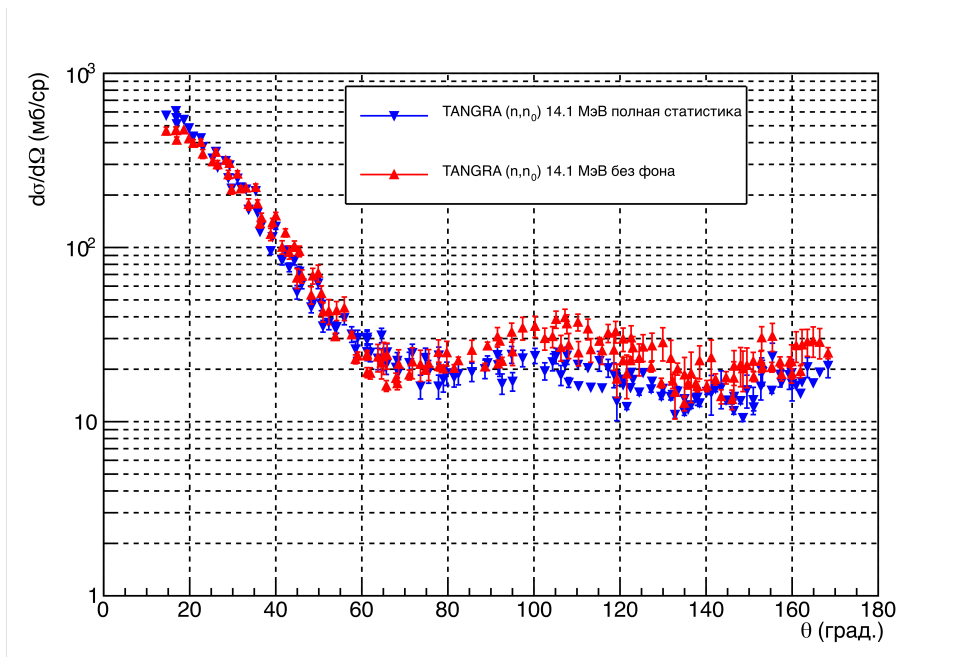


Рисунок 11: Нормированное угловое распределение (n, n_0) с вычитанием (красный цвет) и без вычитания (синий цвет) фоновых событий

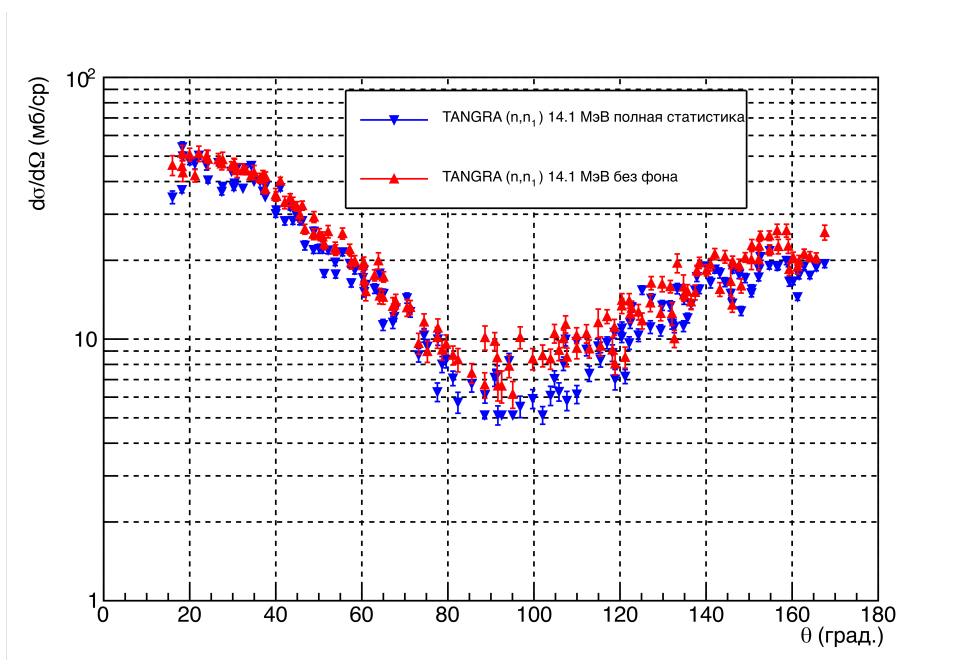


Рисунок 12: Нормированное угловое распределение (n, n_1) с вычитанием (красный цвет) и без вычитания (синий цвет) фоновых событий

2.3 Поправки на многократное рассеяние

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. Эти эффекты включают в себя многократное рассеяние нейтронов на ядрах образца, а также различие телесных углов, занимаемых каждым детектором относительно рассеивающего центра в мишени. Для их учета была создана программа моделирования эксперимента методом Монте – Карло с использованием Geant4 [17]. В модели были воспроизведены основные элементы экспериментальной установки: источник, мишень и детекторы нейтронов. Все элементы данной модели имели размеры и положения в пространстве, соответствующие реальным частям экспериментальной установки. Источником нейтронов в модели бралась материальная точка, отображающая тритиевую мишень генератора. Из тритиевой мишени, в соответствии с делением α -детектора в генераторе на 64 пикселя, выходили 64 пучка нейтронов. 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 соответствовали измеренным профилометром значениям. В данном моделировании стены экспериментального зала и корпус генератора не были воспроизведены, так как их влияние учитывалось в измерении без образца, статистика которого была отброшена.

В созданной модели была проведена симуляция рассеяния нейтронов от источника на углеродной мишени. В результате проведенной симуляции для (n, n_0) и (n, n_1) было получено по два набора данных. Первый набор включал в себя события однократного рассеяния нейтронов на ядрах углерода, в то время как второй набор регистрируемых событий

соответствовал всем рассеянным нейтронам, попавшим в объем соответствующего пластикового детектора. Для каждой комбинации детектор – стрип было найдено отношение полученных наборов, это отношение считалось искомым коэффициентом k , характеризующим поправку как на многократное рассеяние в образце, так и на телесные углы детекторов нейтронов. Для получения дифференциального сечения рассеяния площадь пика упругого или неупругого рассеяния делилась на поправочный коэффициент, после чего умножалась на нормировочный коэффициент:

$$d\sigma/d\Omega = \frac{S}{k}K_n, \quad (4)$$

где $d\sigma/d\Omega$ – дифференциальное сечение упругого или неупругого рассеяния нейтронов на ^{12}C , S – полученная из аппроксимации площадь пика упругого или неупругого рассеяния нейтронов, K_n – нормировочный коэффициент. Поправочные коэффициенты для (n, n_0) и (n, n_1) приведены в Приложении в таблицах 1 и 2.

Нормировка производилась на данные, полученные в работах [1,2], по ранее описанной методике. Полученный коэффициент нормировки для данных с вычетом фоновых событий и внесенными поправками, введенный как отношение интеграла литературных данных к данным нашего эксперимента, $K_2 = 0.000483$.

3 Результаты

В результате проделанной работы был выполнен эксперимент по изучению рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на углероде, проведенный на установке TANGRA. Для сравнения форм полученных угловых распределений с литературными данными была произведена нормировка на значения дифференциального сечения рассеяния нейтронов, полученные ранее иными авторами. Сам процесс нормировки заключался в нахождении интеграла пропорциональности между интегралами интерполированных данных, полученных в данной работе, и интерполированными в области углов от 20° до 40° данными других авторов [1,2]. В результате было получено относительное угловое распределение упруго и неупруго рассеянных нейтронов. Угловые распределения с учетом вычитания фоновых событий и поправками на многократное рассеяние, нормированные для сравнения с соответствующими дифференциальными сечениями других авторов изображены на рисунках 13 и 14.

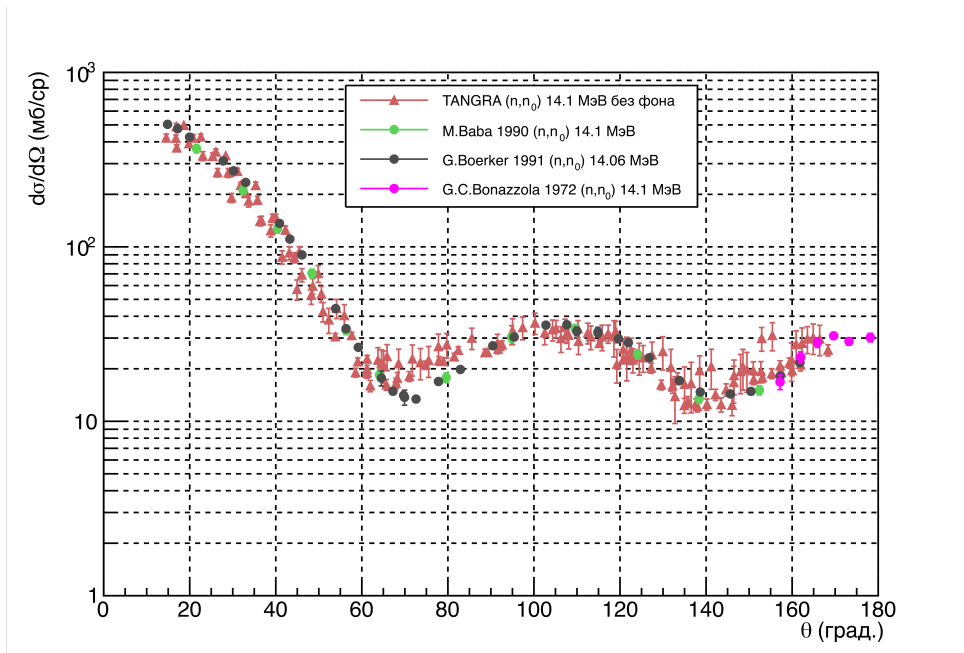


Рисунок 13: Нормированное угловое распределение (n,n_0) с учетом вычитания фоновых событий и поправками на многократное рассеяние в сравнении с [1,2,3]

В угловом распределении упруго рассеянных нейтронов для промежутка углов до 60° результаты нашего эксперимента хорошо согласуются с данными других экспериментов [1,2]. Полученные в эксперименте значения для углов от 60° до 80° превышают другие экспериментальные данные. Эффекты, приводящие к подобному завышению могут быть связаны с неопределенностями, возникающими при учете поглощения нейтронов в образце. Внесенные поправки учета многократного рассеяния позволили улучшить результаты в данной области углов, однако определенное расхождение с данными иных авторов все же наблюдается.

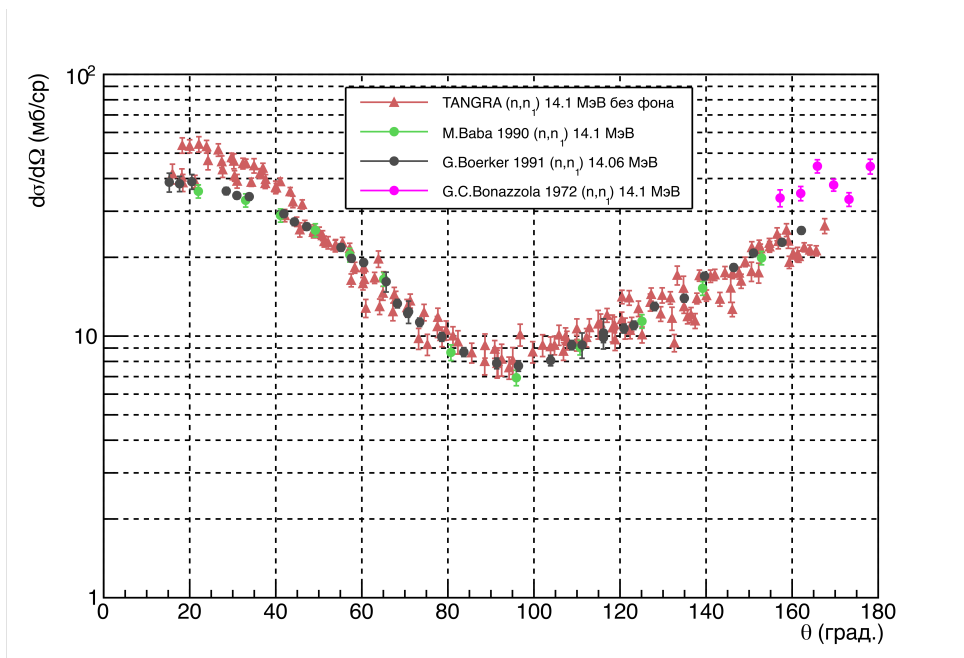


Рисунок 14: Нормированное угловое распределение (n,n_1) с учетом вычитания фоновых событий и поправками на многократное рассеяние в сравнении с [1,2,3]

Для распределения неупруго рассеянных нейтронов экспериментальные значения превышают литературные данные в области углов до 40° . Подобные различия могут быть связаны с отклонением примененных поправок от истинных значений. Объяснением этому расхождению может служить использование в пакете Geant4 неподходящих данных для симуляции рассеяния нейтрона на ^{12}C , которые берутся из базы данных

ENDF [18]. Также причиной возникновения определенных неточностей поправок могут быть ошибки в определении пространственного распределения нейтронных пучков, рожденных в генераторе, что связано со сложной геометрической формой реального пучка и индивидуальными особенностями каждого пикселя 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 (ЛНФ имени И.М. Франка, ОИЯИ). Были получены относительные угловые распределения рассеянных нейтронов для реакций (n, n_0) и (n, n_1) на углероде как для случая с фоновыми событиями, так и для случая с их вычетом. Был разработан и использован метод поправок на многократное рассеяние в образце с использованием Geant4, что привело, в том числе, к лучшему согласию с другими авторами. При этом в данном эксперименте, в отличие от его предшественников, угловые распределения были получены для широкого диапазона углов, что позволило более полно оценить дифференциальное сечение взаимодействия нейтронов с углеродом, а также была изучена и отработана процедура получения нормированных угловых распределений с использованием метода меченых нейтронов.

В будущем планируется дальнейшая модернизация и проведение эксперимента с образцом из углерода в схожей конфигурации. В новой версии эксперимента будет использован новый генератор нейтронов со значительно более высокой интенсивностью. Увеличение статистики регистрируемых событий позволит улучшить данные для второго и третьего возбужденных уровней углерода, также, благодаря отсутствию необходимости объединения и суммирования данных с различных пикселей генератора, может быть получено более высокое разрешение по углу рассеяния.

Благодарности

Автор выражает благодарность Т.Ю. Третьяковой, Ю.Н. Копачу, И.Д. Дашкову и всем остальным участникам коллаборации TANGRA за неоценимую помощь в выполнении данной работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] M. Baba, S. Matsuyama, M. Fujisawa et al. Application of post acceleration beam chopper for neutron emission cross section measurements. // JAERI-M-90-025. — Tohoku Univ., Sendai (Japan). — 1990.
- [2] G. Börker, W. Mannhart, B. Siebert. Elastic and inelastic neutron scattering on carbon-12 // Nuclear Data for Science and Technology / Springer. — 1992. — P. 317–319.
- [3] G.C. Bonazzola, T. Bressani, E. Chiavassa et al. Backward scattering of 14.1 MeV neutrons from ^{12}C // Lett. Nuovo Cimento 3. — 1972. — P. 99.
- [4] A. Takahashi, E. Ichimura, Y. Sasaki et al. Double and Single Differential Neutron Emission Cross Sections at 14.1 MeV // OKTAVIAN-Report A-87-03, Osaka University. — 1987.
- [5] G. Haouat, J. Lachkar, J. Sigaud et al. Measurement of the Differential Elastic and Inelastic Neutron Scattering Cross Sections of Carbon from 8.0 to 14.5 MeV // Centre d'Etudes Nucleaires, Saclay Reports. No.4641. — 1975.
- [6] S. Shirato, K. Hata, Y. Ando. Differential Cross Sections for Elastic and Inelastic Neutron Scattering Cross from ^{12}C at 14.1 MeV // JAERI-M Reports, No.92-027, Japan. — 1992.
- [7] K. Hata, S. Shirato, Y. Ando. Measurements of the Neutron Emission Cross Sections of C-Nat and Fe-Nat for 14.1 MeV Incident Neutrons. // Japanese report to NEANDC, No.155. — 1990.
- [8] G. Haouat, J. Lachkar, J. Sigaud et al. Measurement of the Differential

Elastic and Inelastic Neutron Scattering Cross Sections of Carbon from 8.0 to 14.5 MeV // Nuclear science and engineering, — 65. — 1978.

- [9] I.N. Ruskov, Y.N. Kopatch, V.M. Bystritsky et al. // Physics Procedia. — 2015. — 64. — P. 163.
- [10] Д.Н. Грозданов, Н.А. Федоров, В.М. Быстрицкий и др. Измерение угловых распределений гамма-квантов в реакциях неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах углерода и кислорода // Ядерная физика. — 2018. — Т. 81, № 5. — С. 548–554.
- [11] Д.Н. Грозданов, Н.А. Федоров, Ю.Н. Копач и др. Измерение выходов и угловых распределений γ -квантов, образующихся при взаимодействии нейтронов с энергией 14.1 МэВ с ядрами хрома. // Ядерная физика. — 2020. — Т. 83, № 3. — С. 200–207.
- [12] Н.А. Федоров, Д.Н. Грозданов, Ю.Н. Копач и др. Измерение выходов и угловых распределений γ -квантов, образующихся при взаимодействии нейтронов с энергией 14.1 МэВ с ядрами магния // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2020. — Т. 84, № 4. — С. 480–486.
- [13] Neutron generators for analysis of substances and materials. ING-27 gas-filled neutron tube based neutron generator of VNIIA. — http://www.vniia.ru/production/incl/prospekt_element.pdf
- [14] О.Ф. Немец, Ю.В. Гофман. Справочник по ядерной физике. — Киев, Наукова думка, 1975.
- [15] V. Valković. 14 MeV Neutrons. Physics and Applications. Boca Raton, FL, US: CRC Press, LLC. 2016.

- [16] K.S. Kölbig, B. Schorr // Computer Physics Communications. 1984. 31, Issue 1. P. 97.
- [17] S. Agostinelli et al. Nucl. Instrum. Meth. A 506 (2003) 250-303
- [18] M.B. Chadwick, P. Obložinský, M. Herman et al. // Nuclear Data Sheets. 2006. 107. P. 2931.

Приложение

Таблица 1: Поправочные коэффициенты на многократное рассеяние нейтронов в образце, полученные с помощью моделирования, для (n, n_0) .

Номер детектора	Номер X – стрипа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.05	1.01	0.96	0.93	0.92	0.93	0.96	0.93
2	1.10	1.06	0.99	0.96	0.94	0.95	0.99	0.96
3	1.11	1.06	1.01	0.99	0.99	1.00	0.99	0.92
4	1.15	1.13	1.09	1.05	1.00	0.95	0.91	0.85
5	1.18	1.10	1.00	0.94	0.89	0.84	0.81	0.74
6	1.08	1.02	0.94	0.90	0.87	0.83	0.83	0.78
7	1.12	1.07	1.02	0.98	0.98	1.00	1.05	1.02
8	1.16	1.14	1.11	1.12	1.13	1.11	1.06	0.96
9	1.29	1.26	1.16	1.08	1.02	0.97	0.96	0.90
10	1.13	1.07	1.00	0.96	0.95	0.95	0.96	0.92
11	0.96	0.95	0.94	0.95	0.97	1.04	1.12	1.11
12	0.94	0.96	0.99	1.04	1.11	1.21	1.28	1.25
13	1.04	1.09	1.12	1.12	1.11	1.11	1.16	1.13
14	1.04	1.01	0.97	0.97	0.99	1.04	1.12	1.11
15	0.81	0.82	0.85	0.88	0.92	0.98	1.06	1.08
16	0.79	0.82	0.86	0.91	0.96	1.05	1.16	1.17
17	0.89	0.92	0.98	1.03	1.06	1.11	1.15	1.13
18	0.97	0.99	0.99	0.99	1.00	1.03	1.10	1.10
19	0.98	0.97	0.94	0.95	0.97	1.02	1.10	1.08
20	0.96	0.94	0.92	0.92	0.94	0.98	1.05	1.03

Таблица 2: Поправочные коэффициенты на многократное рассеяние нейтронов в образце, полученные с помощью моделирования, для (n, n_1) .

Номер детектора	Номер X – стрипа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.01	0.98	0.94	0.92	0.92	0.93	0.96	0.92
2	1.05	1.02	0.96	0.94	0.93	0.93	0.95	0.90
3	1.08	1.04	0.98	0.95	0.94	0.93	0.94	0.88
4	1.09	1.05	0.99	0.96	0.94	0.92	0.91	0.84
5	1.01	0.97	0.91	0.88	0.84	0.82	0.79	0.71
6	1.07	1.01	0.94	0.90	0.87	0.85	0.82	0.74
7	1.12	1.16	1.09	1.03	0.99	0.95	0.92	0.84
8	1.20	1.16	1.08	1.03	1.00	0.98	0.97	0.89
9	1.15	1.12	1.06	1.03	1.00	1.00	1.00	0.94
10	1.11	1.09	1.04	1.02	1.01	1.01	1.03	0.98
11	1.02	1.02	1.01	1.01	1.03	1.06	1.12	1.08
12	0.99	0.99	1.00	1.01	1.03	1.09	1.16	1.13
13	0.95	0.97	0.98	1.01	1.05	1.11	1.20	1.18
14	0.90	0.93	0.97	1.01	1.05	1.12	1.19	1.18
15	0.79	0.83	0.86	0.88	0.92	0.97	1.06	1.08
16	0.76	0.80	0.82	0.85	0.89	0.93	1.00	1.01
17	0.89	0.91	0.93	0.94	0.97	1.01	1.07	1.06
18	0.92	0.93	0.93	0.94	0.96	1.00	1.07	1.05
19	0.94	0.94	0.92	0.93	0.94	0.98	1.04	1.02
20	0.95	0.94	0.92	0.92	0.92	0.95	1.01	0.98