

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

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Отчет о работе в аспирантуре

Выполнил аспирант
Зг.о.
Федоров Н.А.

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

Москва 2020

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	1
1 Эксперимент	4
1.1 Конфигурации детекторной системы	5
1.2 Облучаемые образцы	8
1.3 Системы сбора данных	9
2 Обработка экспериментальных данных	10
2.1 Анализ осциллограмм и группировка сигналов в события	10
2.2 Заполнение спектров и временных окон	11
2.2.1 Анализ временных спектров	11
2.2.2 Анализ амплитудно-временных распределений для HPGe	13
3 Коррекция получаемых данных	17
3.1 Измерение профиля меченых пучков	17
3.2 Коррекция угловых распределений	18
3.3 Коррекция данных, получаемых с HPGe	19
4 Результаты и заключение	20

Введение

Исследование нейтрон-ядерных реакций важно как для фундаментальной, так и для прикладной областей ядерной физики. Отсутствие у нейтрона электрического заряда приводит к высокой проникающей способности нейтронного излучения, что, в свою очередь, делает перспективным применение нейтронных пучков в досмотровых комплексах, установках неразрушающего элементного анализа, в устройствах для исследования скважин (каротажа). Нейтроны способны взаимодействовать с атомными ядрами практически при любых энергиях, что позволяет исследовать различные механизмы протекания нейтрон-ядерных реакций, изоспиновую симметрию ядерных сил, проверять теоретические модели.

Реакции с испусканием γ -квантов являются наиболее доступными для изучения, так как для их регистрации требуются только γ -детекторы, а необходимость в вакуумном оборудовании и длинных пролетных базах отсутствует.

Для исследования нейтрон-ядерных реакций в Лаборатории Нейтронной физики Объединенного Института Ядерных Исследований (ЛИФ ОИЯИ, Дубна) была создана установка «TANGRA», и, спустя некоторое время, была образована коллаборация «TANGRA». Цели коллаборации следующие:

- Создание/развитие базы данных по сечениям реакций взаимодействия нейтронов с энергией 14.1 МэВ с ядрами различных элементов и характеристическим гамма-линиям для расширения применимости метода меченых нейтронов для идентификации широкого

круга сложных химических веществ.

- Разработка методики на базе метода меченых нейтронов для исследования элементного состава грунтов и минералов с целью определения содержания в них легких элементов (литий, бериллий, бор, углерод и др.), а также редкоземельных элементов.
- Исследование $(n, x\gamma)$ и, впоследствии, $(n, 2n)$ реакций с помощью метода меченых нейтронов.
- Разработка алгоритмов и программ для анализа экспериментальной информации, поступающей с детекторов нейтронного и γ -излучений
- Тестирование различных теоретических подходов, описывающих изучаемые процессы.

История вопроса

Изучение нейтрон-ядерных реакций имеет довольно длительную историю. Все началось с открытия нейтрона Дж. Чедвиком в 1932 году, который проводил эксперименты по выбиванию протонов из парафина с помощью излучения, испускаемого источником, состоящим из полония и бериллия. Считалось, что в реакции между бериллием и α -частицами, испускаемыми полонием, рождаются высокоэнергетические γ -кванты, которые испытывают комптоновское рассеяние на протонах в парафине, однако, эта гипотеза требовала, чтобы энергия таких γ -квантов была около 55 МэВ, а энерговыделение в реакции ${}^9\text{Be} + \alpha \rightarrow {}^{13}\text{C} + \gamma$ не превышало 14 МэВ [1], что и привело к предположению о существовании массивной нейтральной частицы, входящей в состав атомных ядер и рождающейся в реакции ${}^9\text{Be} + \alpha \rightarrow {}^{12}\text{C} + n$. Вскоре была открыта реакция синтеза изотопов водорода (М. Олифант, 1932) и высказано предположение, что именно

эти реакции происходят в звездах. Дальнейшее исследование нейтрон-ядерных реакций группой Ферми привели к открытию искусственной радиоактивности (1934) и резонансного поглощения нейтронов (1936). Улучшалась и техника, в 1935 был создан нейтронный монохроматор, а в 1938-источник нейтронов на основе ускорителя, позволивший существенно расширить диапазон энергий начальных частиц. Измерения радиусов атомных ядер с помощью быстрых (14 и 25 МэВ) нейтронов выявили отклонения от закона $R \propto A^{1/3}$, что привело к созданию оптической модели Фешбахом и др. в 1953 г.

Первые эксперименты по исследованию неупругого рассеяния нейтронов на атомных ядрах были проведены в 1953, спустя некоторое время начались исследования нейтрон-гамма корреляций (1957), проводилось построение теоретических моделей, как в рамках подхода составного ядра, так и прямого механизма ядерных реакций[2]. Исследования нейтрон-ядерных реакций, в процессе которых происходит излучение γ -квантов, происходит и в настоящее время. Одним из замечательных проектов, в рамках которых исследуются эти реакции, является nELBE[3]

Хорошие проникающие свойства нейтронного излучения не могли не привлекать внимание инженеров, разрабатывающих методы неразрушающего исследования различных объектов. Регистрация γ -лучей, испускаемых ядрами в процессе нейтрон-ядерных реакций позволяет определять элементный состав веществ, а создание компактных нейтронных источников позволило создать промышленно применимые установки элементного анализа, использующие нейтрон-ядерные реакции[4]. Регистрация заряженных частиц, рождающихся совместно с нейтроном в реакциях $d+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$ и $d+{}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He}+n$ позволила создать т.н. меченые пучки (В. Валкович, 1969)[5], использование которых позволяет реконструировать направление вылета нейтрона и определить координаты области реак-

ции, используя информацию о промежутке времени с момента регистрации заряженной частицы до регистрации γ -кванта.

Возможность получать информацию о пространственном распределении веществ в исследуемом объеме является очень привлекательной для конструкторов досмотровых комплексов, устройств для поиска мин и других аналогичных установок. Так, в 2004 был начат проект EURITRACK[6], в рамках которого разрабатываются устройства, использующие ММН для поиска опасных веществ в грузовиках. В настоящее время в ОИЯИ разрабатываются установки для поиска алмазов в кимберлите[7] и быстрого элементного анализа горных пород.

Проект TANGRA, начатый в 2014 г., является попыткой применить промышленные наработки в научных целях, провести исследование нейтрон-ядерных реакций с помощью серийно производимого нейтронного генератора ИНГ-27[8], и поэтому процедура проведения экспериментов и обработки данных имеют свои особенности, которые могут как упрощать, так и усложнять получение конечного результата.

1 Эксперимент

Проект TANGRA реализуется уже на протяжении 6 лет. За это время было проведено множество экспериментов, и большая их часть была проведена с использованием следующих конфигураций детекторной системы:

1. «Ромашка» на основе NaI(Tl) сцинтилляционных детекторов
2. «Ромаша», состоящая из детекторов BGO
3. «HPGe», в которой использовался один детектор из сверхчистого германия (HPGe).

Схемы таких конфигураций приведены на Рис. 1-3. Рассмотрим же их более подробно.

1.1 Конфигурации детекторной системы

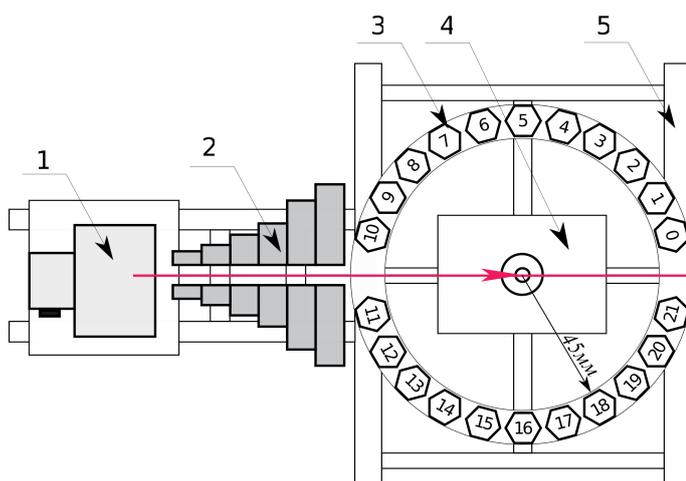


Рисунок 1: Схема экспериментальной установки с детекторной системой «Ромашка». 1-нейтронный генератор ИНГ-27, 2-стальной коллиматор, 3-гамма-детектор, входящий в массив из 22-х NaI(Tl) γ -детекторов, 4-облучаемый образец, установленный на столике, 5-рама установки

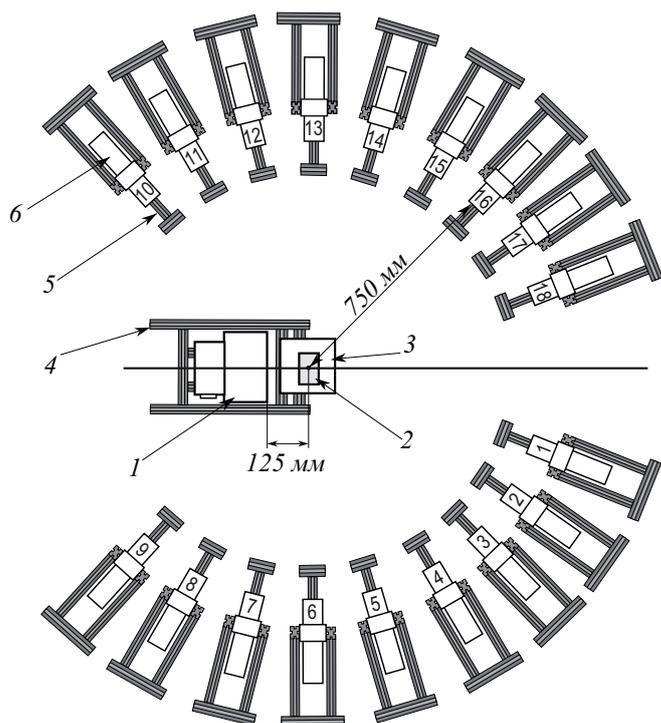


Рисунок 2: Схема экспериментальной установки с детекторной системой «Ромаша». 1-нейтронный генератор ИНГ-27, 2-мишень, 3-стол с облучаемым объектом, 4-стол для генератора, 5-держатель гамма-детектора, 6-гамма-детектор, входящий в массив из 18-ти BGO γ -детекторов «Ромаша»

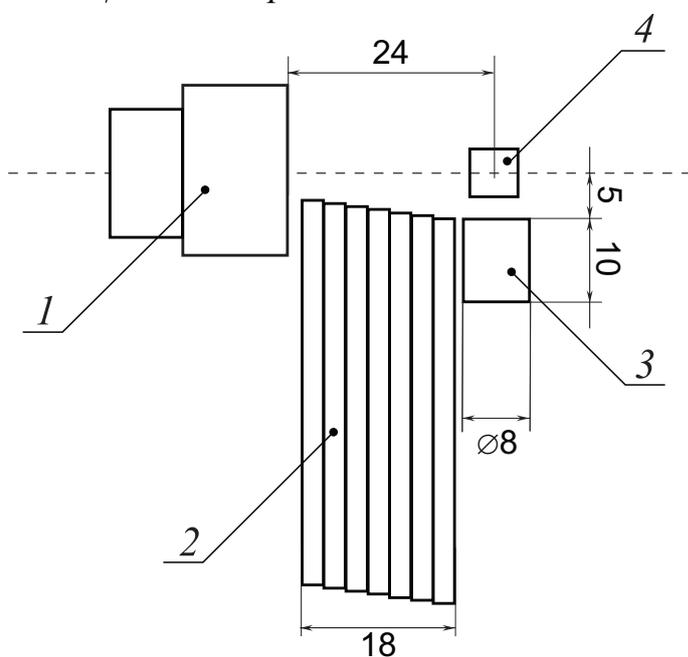


Рисунок 3: Схема экспериментальной установки с детектором HPGe. 1-нейтронный генератор ИНГ-27, 2-свинцовый коллиматор, 3-HPGe детектор, 4-образец

Конфигурация «Ромашка» (Рис. 1) была первой детекторной системой,

использованной в установке TANGRA. Она состояла из 22 детекторов на основе NaI(Tl), расположенных по окружности радиусом 45 см с шагом 15° . Сами детекторы представляют из себя шестигранные призмы длиной 40 см и расстоянием между противоположными ребрами 9 см. Детекторы были установлены вертикально, что обеспечивало высокую эффективность регистрации γ -квантов низких и средних (до 2 МэВ) энергий. Для предотвращения попадания нейтронов из генератора напрямую в детектор использовался стальной коллиматор толщиной 20 см. С одной стороны, коллиматор сокращал число фоновых событий, а с другой - не позволял использовать больше одного нейтронного пучка, что упрощает процедуру обработки данных и, в то же время, сокращает количество точек в измеренном угловом распределении, ведь каждый используемый нейтронный пучок образует свой набор углов между налетающими нейтронами и гамма-квантами, регистрируемыми системой.

«Ромашка» (Рис. 2) была следующей детекторной системой, и с ее помощью была проведена большая часть экспериментов по измерению угловых распределений γ -излучения. Она состоит из 18 BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) детекторов, расположенных по окружности радиусом 75 см с шагом 14° . Чувствительный элемент детекторов - цилиндр из германата висмута диаметром 7,75 см и высотой 6,5 см. Эффективность BGO выше, чем у NaI(Tl) аналогичных размеров, и γ -кванты высоких энергий регистрируются значительно лучше. При проектировании этой детекторной системы использовался опыт, полученный при эксплуатации «Ромашки», и полученные данные были более качественными.

Сцинтилляторы обладают плохим энергетическим разрешением и поэтому с их помощью можно исследовать только наиболее интенсивные γ -линии. Для набора γ -спектров с высоким разрешением использовался детектор из сверхчистого германия ORTEC_GMX30_83_PL_S. Схема

установки в этой конфигурации приведена на Рис. 3. В из-за малой, по сравнению со сцинтилляторами, эффективности, детектор размещался на небольшом расстоянии от образца. Для защиты детектора от попадания нейтронов использовался свинцовый коллиматор толщиной 18 см. Применение HPGe детектора позволяет проводить измерение выходов γ -излучения для большого количества линий, и, впоследствии, сечений.

1.2 Облучаемые образцы

К облучаемым образцам предъявляются два противоречивых требования: с одной стороны, образцы должны быть достаточно крупными для того, чтобы использовать как можно больше меченых пучков, а, с другой стороны, увеличение размеров образца приводит к увеличению вклада поглощения гамма-лучей в наблюдаемое угловое распределение. В экспериментах с системой «Ромашка» использовались блоки из чистых веществ размерами $10 \times 10 \times 5 \text{ см}^3$, либо пластиковые контейнеры размерами $10 \times 10 \times 10 \text{ см}^3$, заполненные порошками, расчетов для определения оптимальных размеров образца не проводилось.

При последующих экспериментах проводились расчеты в Geant4 с целью определить оптимальные для измерений угловых распределений размеры образца, для простоты изготовления образцов было решено, что они должны быть в форме параллелипипеда. Было установлено, что наименьшее искажение вносят образцы, сечение которых представляет из себя квадрат. В связи с этим, образцы имели размеры $4 \times 4 \times 14$, $6 \times 6 \times 14$, $8 \times 8 \times 14 \text{ см}^3$.

АЦП	Частота дискретизации	Макс. скорость счета	Интерфейс
ADCM	100МГц	$<10^5$ событий/с	PCI
ЦРС	200МГц	10^5 событий/с	USB 3.0

Таблица 1: Параметры АЦП, используемых в эксперименте TANGRA

1.3 Системы сбора данных

В эксперименте TANGRA использовались два различных типа АЦП: ADCM-32[9] и ЦРС-6/32 (Рис. 4). Эти приборы довольно сильно отличаются друг от друга, их характеристики приведены в таблице 1.

Система ADCM не позволяет производить подсчет количества испущен-



Рисунок 4: Системы сбора данных ADCM (слева) и ЦРС (справа)

ных нейтронов из-за низкой скорости счета; она не может быть использована совместно с HPGe детектором из-за неспособности оцифровывать длинные импульсы. Этих недостатков нет у системы ЦРС, позволяющей проводить подсчет срабатываний α -детектора. Большая часть экспериментов по измерению угловых распределений была поставлена с использованием ADCM, все эксперименты с HPGe были проведены с использованием системы ЦРС, накопленные данные содержат информацию о количестве испущенных нейтронов и потому могут быть использованы для получения сечений.

2 Обработка экспериментальных данных

В эксперименте TANGRA обработка данных, по сути, начинается во время их накопления: импульсы, приходящие с детекторов, оцифровываются, (и, в случае использования системы ADCM, группируются в события), определяются их амплитуды и времена прихода. Осциллограммы сигналов сохраняются на жестком диске компьютера для последующего анализа. Блок-схема анализа данных приведена на Рис. 5.

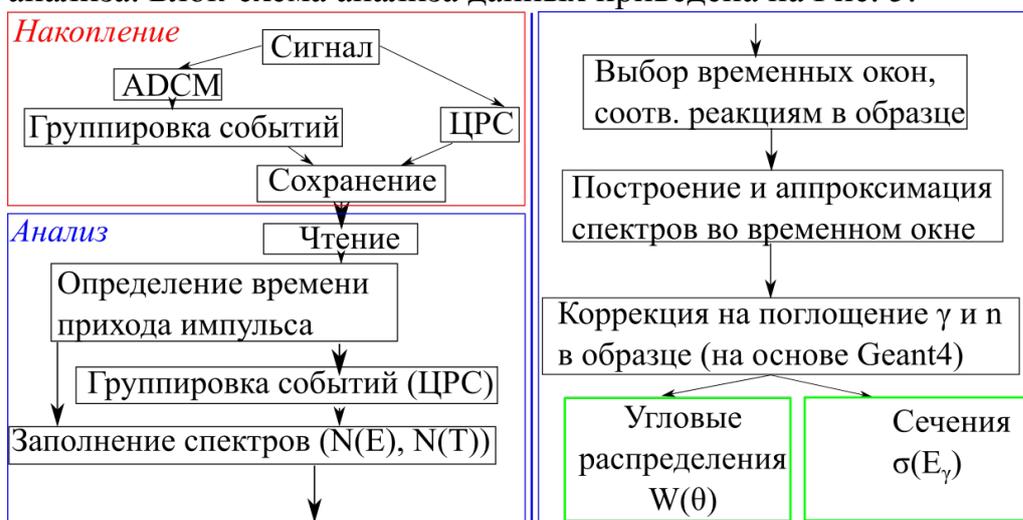


Рисунок 5: Алгоритм анализа данных эксперимента TANGRA

2.1 Анализ осциллограмм и группировка сигналов в события

Осциллограммы сигналов, сохраненные на жестком диске, либо в оперативной памяти, анализируются с помощью специализированных программ, которые определяют время прихода импульса по его фронту, выполняют интегрирование этого импульса в задаваемых пользователем пределах относительно времени его прихода. Группировка сигналов в события происходит по разнице во времени их прихода: если она укладывается в задаваемые пользователем пределы, то импульсы объединяются в событие. Этот этап является универсальным и не зависит от типа ис-

пользуемой детекторной системы, поэтому времена прихода импульсов, их интегралы и длительности, группированные в события, записываются в т.н. файлы декодированных данных, которые затем анализируются с помощью более специализированных программ.

2.2 Заполнение спектров и временных окон

Анализ файлов декодированных данных происходит по-разному для экспериментов со сцинтилляторами и HPGe детектором, что связано как с особенностями самих детекторов, так и с их количеством. Тем не менее, у применяемых при этом процедур есть общая черта: из событий, записанных в декодированных файлах происходит набор спектров. Для сцинтилляционных детекторов строятся временные и энергетические спектры отдельно, а для HPGe набирается двумерный время-амплитудный спектр. Причины этой разницы-временное разрешение используемых детекторов, и количество комбинаций «пучок-детектор», которое достигает 648 в некоторых экспериментах с использованием системы детекторов «Ромаша» и 36 меченых пучков что требует оптимизации процедуры анализа данных для ее ускорения.

2.2.1 Анализ временных спектров

Анализ временных спектров является важной частью процедуры обработки данных. Примеры этих спектров, набранных в ходе экспериментов с различными детекторами, приведены на Рис. 6.

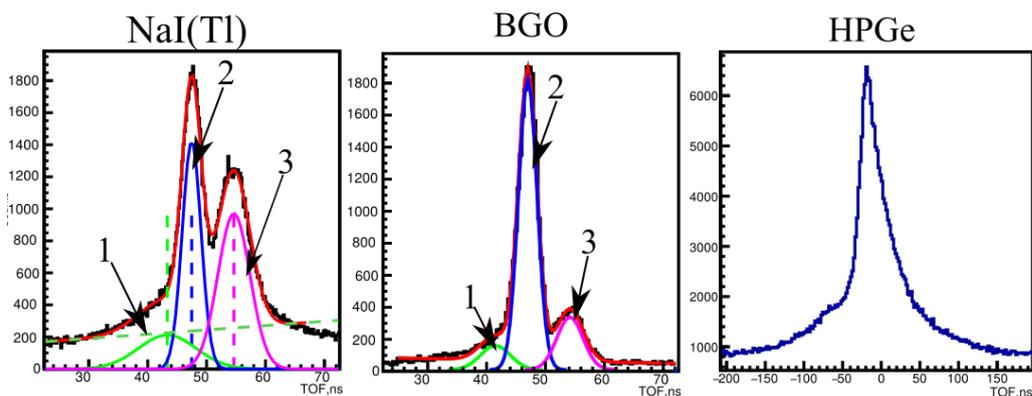


Рисунок 6: Временные спектры, набранные с использованием различных детекторных систем. Все детекторы располагались под углами, близкими к 90° к нейтронному пучку. Пик 1 соответствует γ , родившимся в коллиматоре/корпусе и подставке генератора, 2- γ из образца, 3-нейтроны, попавшие в детектор.

Видно, что хорошее временное разрешение сцинтилляторов позволяет эффективно отделять события, соответствующие реакциям в изучаемом образце от событий, вызванных реакциями в окружающей среде и попаданием нейтронов в детектор. Увеличенный радиус спектрометрической системы «Ромаша» приводит к улучшению выделения полезных событий по времени пролета. Что касается HPGe детектора, то его временное разрешение не позволяет провести такое разделение. К счастью, хорошее временное разрешение HPGe позволяет эффективно отделять фоновые пики по их энергии.

Выделение событий, соответствующих γ -квантам, рожденным в образце, приводит к существенному увеличению отношения количества полезных событий к числу фоновых, кроме того, на спектрах в соответствующем временном окне зачастую отсутствуют многие фоновые пики. На Рис. 7 показан результат этой процедуры. Видно, что соотношение пик/подложка для ^{12}C (4,4 МэВ) существенно выше на спектре внутри временного окна. Также, в окне отсутствуют события от ^{16}O , вызываемые нейтронами, попавшими в детектор.

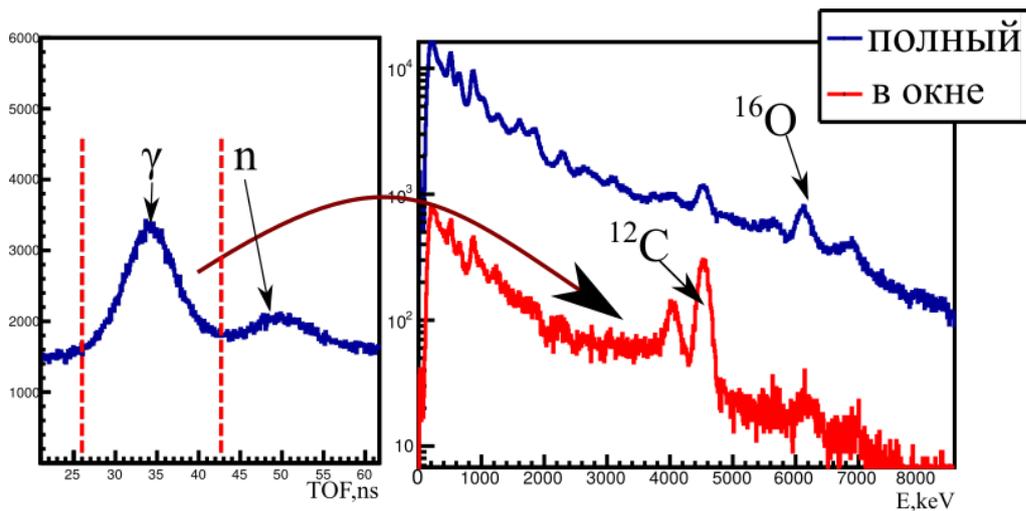


Рисунок 7: Временной спектр событий, зарегистрированных детектором BGO в эксперименте с ^{12}C (слева), полный энергетический спектр и спектр во временном окне (справа)

2.2.2 Анализ амплитудно-временных распределений для HPGe

Временное разрешение HPGe детектора не позволяет отделять полезные события от фоновых так же хорошо, как в сцинтилляторах, в то же время, по времени пролета все еще можно отделить постоянный во времени фон случайных событий, генерируемый, в основном, «непомеченными» нейтронами, попавшими в окружающие объекты.

Особенности сбора заряда в германиевом детекторе приводят к тому, что его временное разрешение зависит от энергии регистрируемых событий. Следовательно, для корректного анализа полученных данных нужны уже двумерные амплитудно-временные спектры. Пример такого спектра, набранного в эксперименте с железом, приведены на Рис. 8.

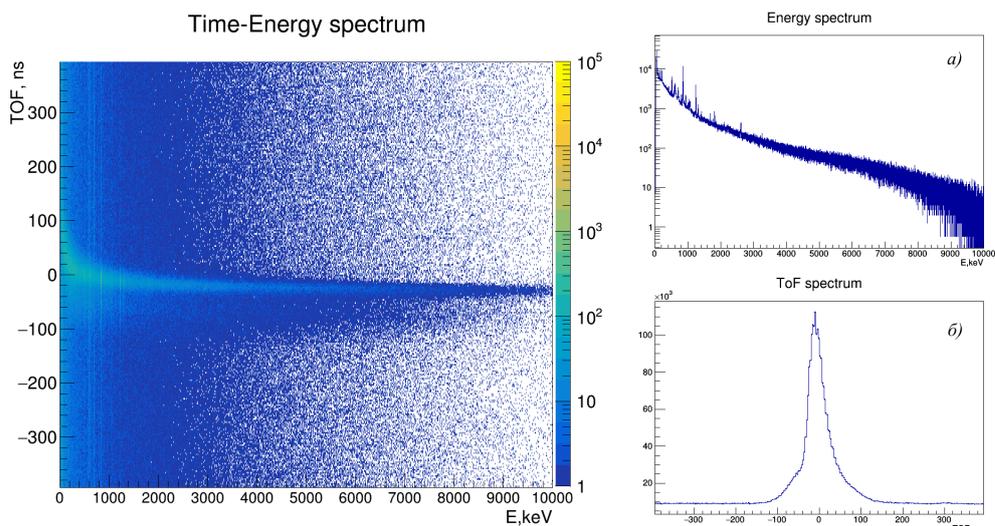


Рисунок 8: Амплитудно-временной спектр событий, зарегистрированных HPGe детектором в эксперименте с Fe а), полный энергетический спектр б), полный временной спектр в).

Выделение полезных событий проводилось следующим образом: амплитудно-временной спектр разбивался на сегменты по энергии с некоторым шагом (в нашем случае, 100 кэВ для энергий до 1 МэВ, далее-300 кэВ), в которых проводилась аппроксимация положений и ширины пика на временном спектре (пика совпадений). События, не попадающие в окно 3σ вокруг пика совпадений считались фоновыми (антисовпадениями). Для того, чтобы избежать влияния флуктуаций положений и ширины пиков на итоговые границы спектров совпадений/антисовпадений, значения положений и ширины аппроксимировались гладкими функциями. Затем по полученным зависимостям уже разделялись спектры совпадений и антисовпадений. Рис. 9 иллюстрирует эту процедуру, а амплитудно-временные спектры совпадений и антисовпадений приведены на Рис. 10.

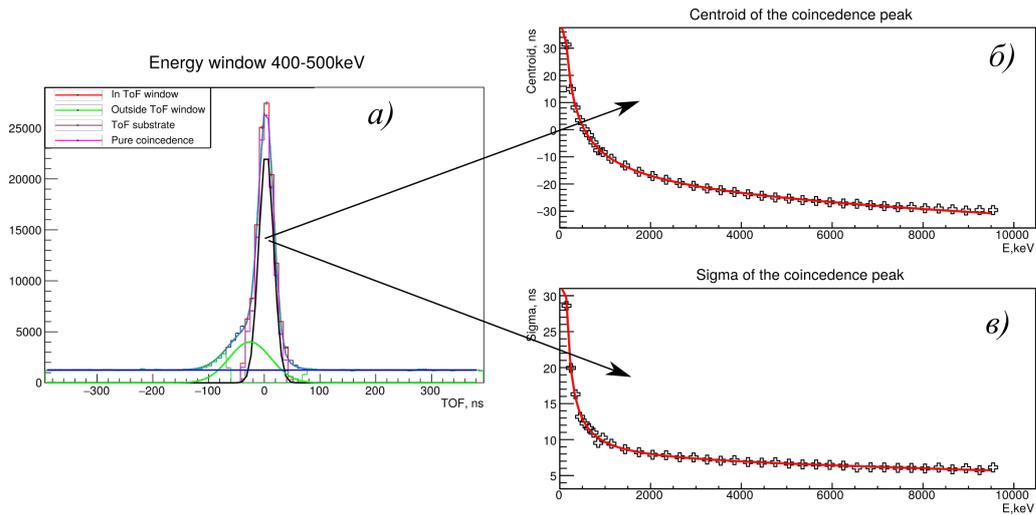


Рисунок 9: Временной спектр в окне 400-500 кэВ а), график положений пика совпадений б) и его ширины в)

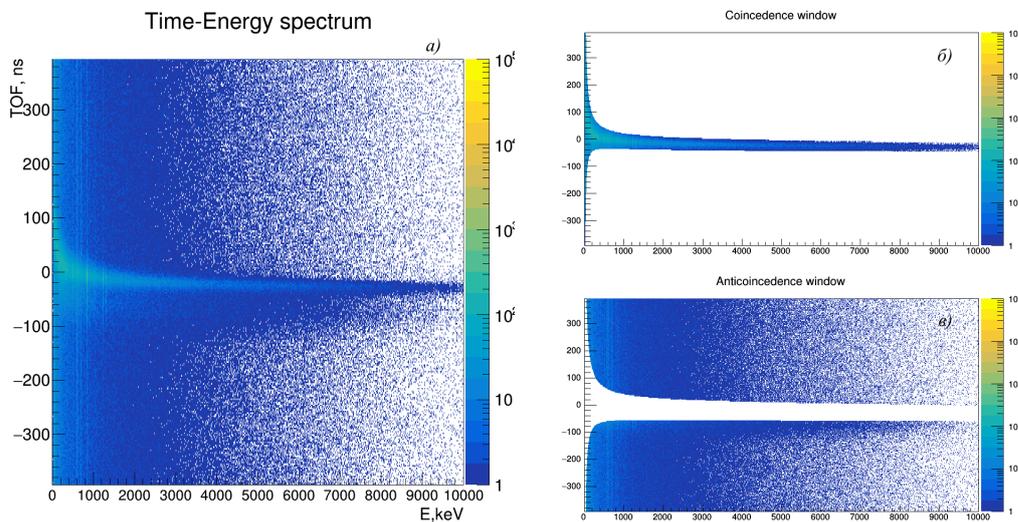


Рисунок 10: Полный амплитудно-временной спектр а), амплитудно-временной спектр совпадений б), антисовпадений в).

В спектре совпадений соотношение между полезными и фоновыми событиями больше, чем в спектре антисовпадений, что позволяет отделять полезные пики от фоновых. Более того, вычитание нормированного на ширину временного окна спектра антисовпадений из спектра совпадений зачастую (но не всегда) приводит к пропаданию фоновых пиков. Сравнение спектров совпадений и антисовпадений приведено на Рис. 11, а примеры, когда вычитание спектра антисовпадений приводит и не приводит к пропаданию фонового пика - на Рис. 12.

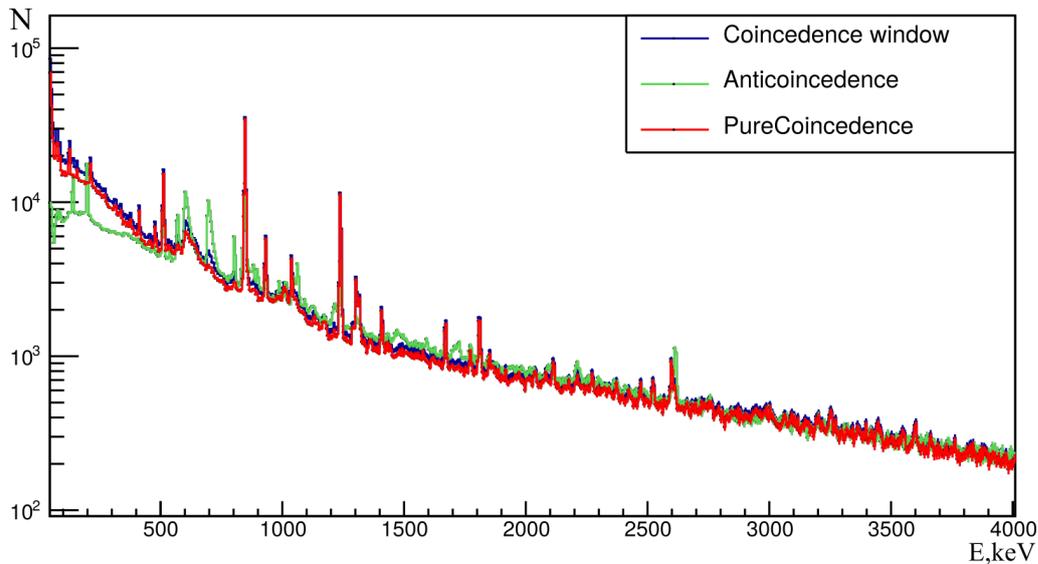


Рисунок 11: Сравнение спектров совпадений и антисовпадений. Также приведен чистый спектр совпадений (спектр совпадений, из которого вычтен спектр антисовпадений)

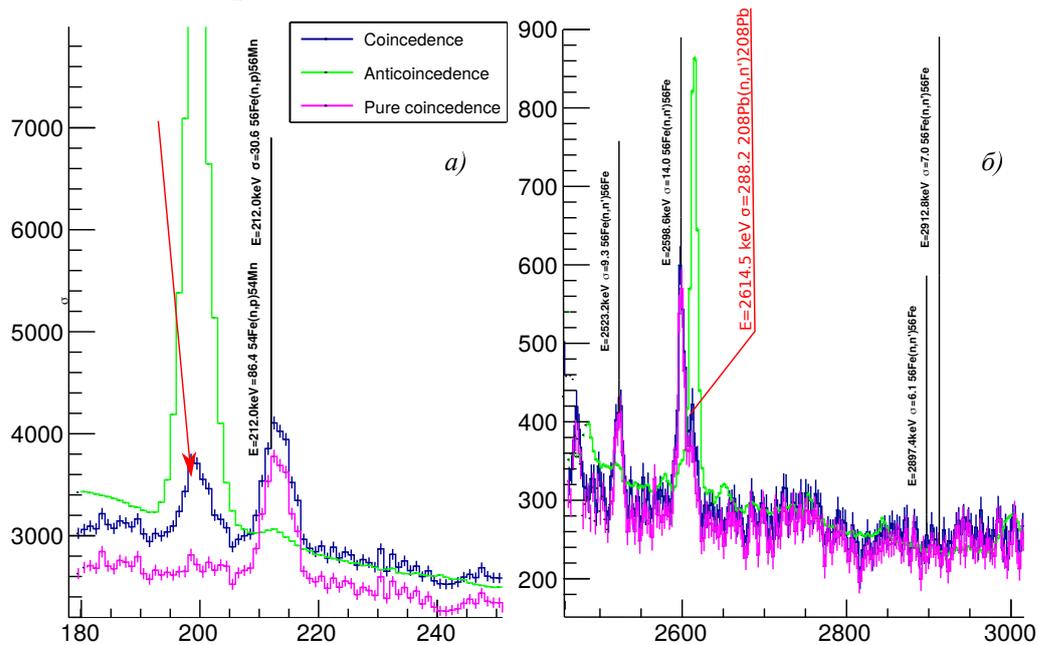


Рисунок 12: Пример успешного вычитания антисовпадений, при котором пропадает фоновый пик а) (происхождение не установлено), и ситуация, когда фоновый пик от реакции $^{208}\text{Pb}(n, n')^{208}\text{Pb}$ не может быть вычтен полностью б), из-за того, что он образуется частично при попадании упруго рассеянных нейтронов в свинцовый коллиматор. Чистый спектр антисовпадений (зеленый) приведен для сравнения.)

3 Коррекция получаемых данных

В нашем эксперименте использовались крупные образцы, поэтому коррекция на поглощение и рассеяние нейтронов необходима. Использование большого числа пучков сильно усложняет геометрию эксперимента и не позволяет рассчитать эти поправки аналитически, поэтому мы использовали Geant4 для проведения монте-карло моделирования эксперимента. Кроме того, для проведения расчетов необходима информация о расположении меченых пучков, которая была получена с помощью отдельных измерений.

3.1 Измерение профиля меченых пучков

Для измерения профилей меченых пучков (координат центров и ширин) был поставлен отдельный эксперимент. Для регистрации нейтронов использовался позиционно-чувствительный кремниевый детектор (профилометр), состоящий из 16-ти перекрещивающихся стрипов (8 вертикальных и 8 горизонтальных), дающих в результате 64 квадратных пикселя со стороной 12 мм. Детектор вместе с преусилителем помещены в алюминиевый корпус, снабженный подставкой, позволяющей легко перемещать профилометр по высоте и в продольном направлении. Регистрация нейтронов кремниевым детектором происходит в результате реакций $^{28}\text{Si}(n, p)$ ($B_\alpha = 9.985$ МэВ) и $^{28}\text{Si}(n, \alpha)$ ($B_p = 11.586$ МэВ), что накладывает ограничения на минимальную энергию регистрируемых нейтронов. На Рисунке 14 представлена фотография профилометра, установленного спереди от нейтронного генератора:

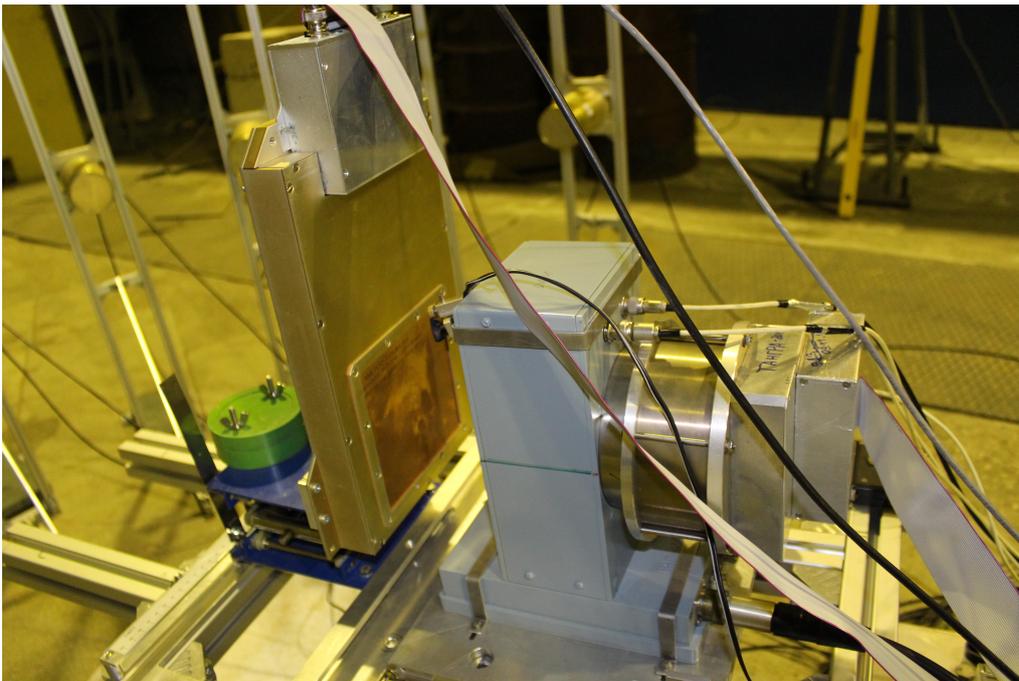


Рисунок 13: Профилометр, установленный перед нейтронным генератором.

Информация о параметрах меченых пучков важна для проведения корректного моделирования эксперимента и использовалась в расчетах в качестве входных данных.

3.2 Коррекция угловых распределений

Поглощение γ -квантов веществом образца способно сильно менять наблюдаемое угловое распределение, и этот эффект должен быть учтен. Его величина сильно зависит от вещества, размеров и плотности образца, профиля нейтронного пучка. Коррекция угловых распределений проводилась следующим образом: в Geant4 проводилось моделирование эксперимента, в процессе которого угловое распределение γ -квантов устанавливалось изотропным, в результате чего расчетное угловое распределение определялось исключительно поглощением и рассеянием фотонов в образце и пространственным распределением точек, из которых эти γ -кванты были испущены. Полученная в этом расчете анизотропия K_{ij} и есть искомая поправка, применяемая к данным как: $W_{ij} = \frac{W_{ij}^e}{K_{ij}}$, где W_{ij}^e -

поправленная анизотропия (для комбинации i -го стрипа и j -го детектора), W_{ij}^e -экспериментальная анизотропия, K_{ij} -коррекция.

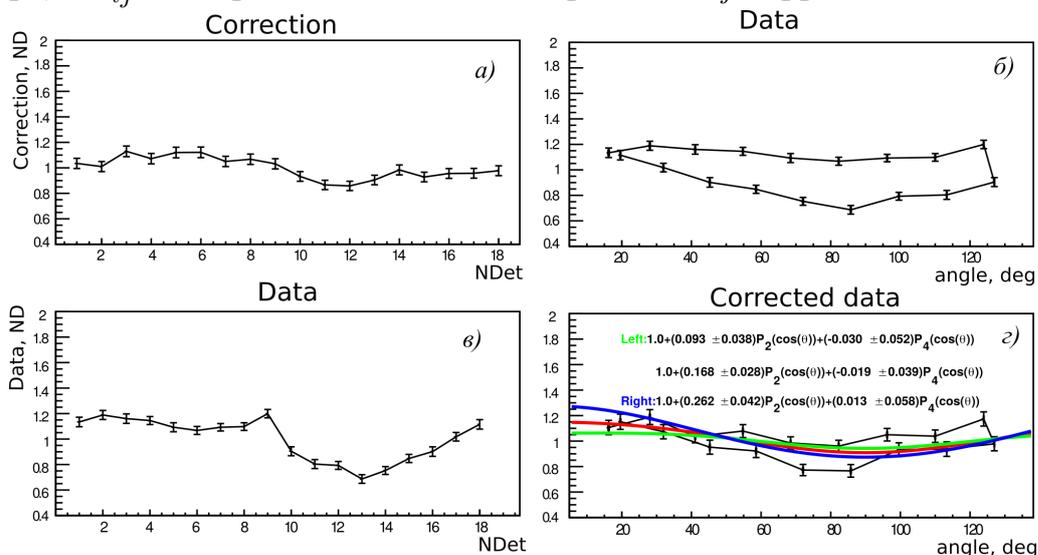


Рисунок 14: Процедура коррекции угловых распределений. а)-коэффициенты коррекции, б),в)-исходные данные, г)-скорректированные данные.

3.3 Коррекция данных, получаемых с HPGe

В наших экспериментах с HPGe результатами являются выходы и сечения испускания γ -квантов, поэтому эффективность регистрации γ -излучения является крайне важной величиной, необходимой для расчета количества испущенных в ходе реакций фотонов. Кроме того, для получения сечений необходима информация о потоке нейтронов в образце. В силу сложной геометрии эксперимента рассчитать аналитически эти величины не представляется возможным, и поэтому мы использовали монте-карло моделирование в Geant4. В случае точечного источника и отсутствия значимого поглощения, количество испущенных γ -квантов N_0 может быть получено по формуле:

$$N_0 = N_{\text{reg}}/\epsilon \quad (1)$$

где ϵ -эффективность для точечного источника. В случае протяженного источника, находящегося в веществе, ϵ заменяется на

$$\epsilon = \int_V \kappa(\vec{r}') \epsilon(\vec{r}') dV, \quad (2)$$

где $\kappa(\vec{r}')$ -коэффициент поглощения γ -квантов, испущенных в точке \vec{r}' , а $\epsilon(\vec{r}')$ -эффективность регистрации γ -квантов. Примеры графиков расчетных величин ϵ приведены на Рис 15.

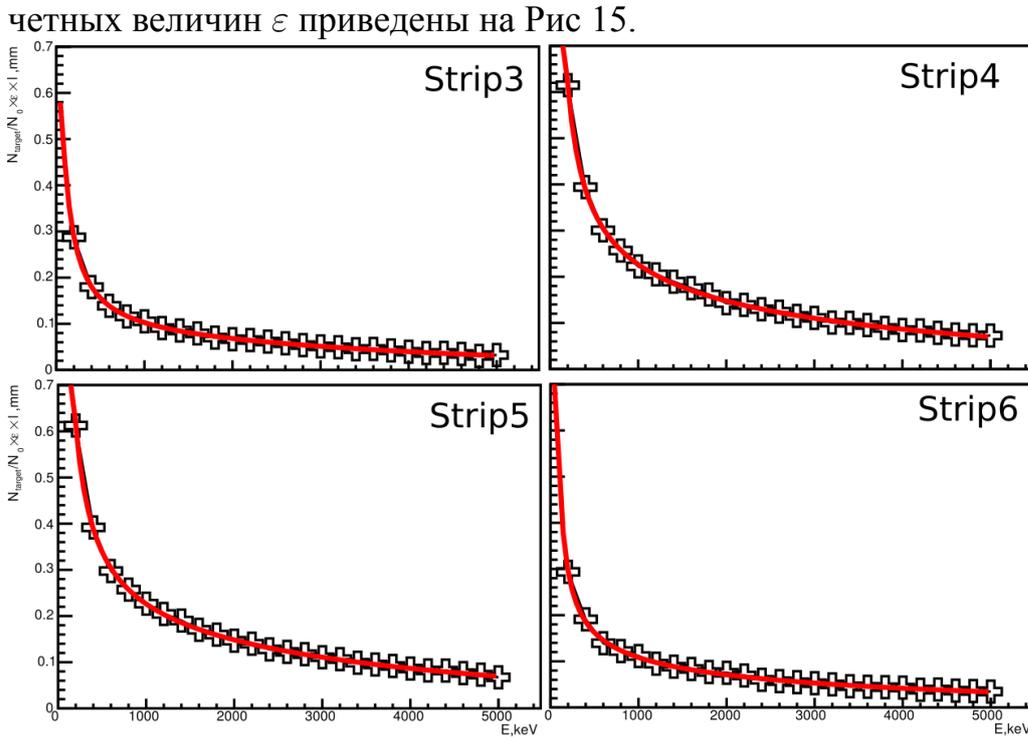


Рисунок 15: Зависимость величин ϵ от энергии для разных стрипов

4 Результаты и заключение

В настоящее время накоплены данные для большого количества элементов, данные по угловым распределениям и выходам γ -квантов частично опубликованы. Разработан первоначальный вариант процедуры извлечения сечений, но пока нет полной уверенности в его корректности. Диаграмма, показывающая современное состояние экспериментов на TANGRA приведена на Рис. 16.

Periodic Table 1-172

- Измерено в NaI/BGO/HPGe
 - Измерено в NaI/HPGe
 - Измерено в BGO/HPGe
 - Измерено в HPGe
 - Не измерено
 - Опубликовано

Period	1																	18	Orbitals		
1	1 H																	2 He	1s		
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	2s2p		
3	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar										18 Ar	3s3p		
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	4s3d4p		
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	5s4d5p		
6	55 Cs	56 Ba	57-71 La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	6s5d6p		
7	87 Fr	88 Ra	89-103 Ac Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	7s6d7p		
8	119	120	121-138 121-138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	8s7d8p
9	165	166	167	168															167	168	9s9p

Рисунок 16: Элементы, исследованные в эксперименте TANGRA. Примеры полученных и опубликованных результатов приведены в таблице 2 (сечения) и Рис. 17.

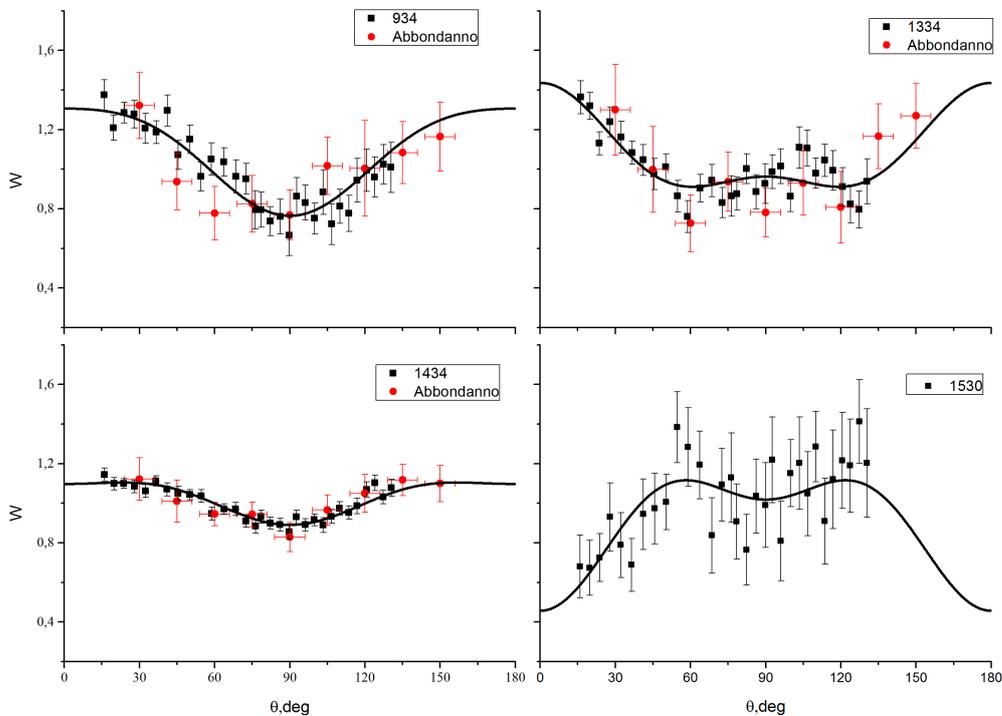


Рисунок 17: Угловые распределения γ -квантов, испускаемых ядрами Sr в реакциях $(n, x\gamma)$, измеренные на установке TANGRA[13] и их сравнение с данными, приведенными в работе [11].

Обработка неопубликованных данных продолжается и в настоящее время.

Таблица 2: Сечения излучения γ -квантов, испускаемых ядрами Mg в реакциях $(n, x\gamma)$, измеренные на установке TANGRA. Опубликовано в [12]

E_γ , keV	Reaction	$(J^\pi)_i \rightarrow (J^\pi)_f$	σ_γ , mb		
			TANGRA	TALYS	[10]
350.7	$^{24}\text{Mg}(n, \alpha)^{21}\text{Ne}$	$5/2^+ \rightarrow 3/2^+$	185 ± 2	123	77 ± 13
440.0	$^{24}\text{Mg}(n, d)^{23}\text{Na}$	$5/2^+ \rightarrow 3/2^+$	26 ± 1.6	34	31 ± 8
472.2	$^{24}\text{Mg}(n, p)^{24}\text{Na}$	$1^+ \rightarrow 4^+$		153	126 ± 20
1368.6	$^{24}\text{Mg}(n, n)^{24}\text{Mg}$	$2^+ \rightarrow 0^+$	412	411	412 ± 62
1809.0	$^{26}\text{Mg}(n, n)^{26}\text{Mg}$	$2^+ \rightarrow 0^+$			82 ± 13
2754.0	$^{24}\text{Mg}(n, n)^{24}\text{Mg}$	$4^+ \rightarrow 0^+$	55 ± 3	82	55 ± 11
3735.2	$^{24}\text{Mg}(n, \alpha)^{21}\text{Ne}$	$5/2^+ \rightarrow 3/2^+$	19 ± 3	9	
3866.1	$^{24}\text{Mg}(n, n)^{24}\text{Mg}$	$3^+ \rightarrow 2^+$	25 ± 3	34	33 ± 5
4237.9	$^{24}\text{Mg}(n, n)^{24}\text{Mg}$	$2^+ \rightarrow 0^+$	27 ± 4	25	36 ± 8
4642.2	$^{24}\text{Mg}(n, n)^{24}\text{Mg}$	$4^+ \rightarrow 2^+$	23 ± 3	23	20 ± 4
6246.8	$^{24}\text{Mg}(n, n)^{24}\text{Mg}$	$3^- \rightarrow 2^+$	13 ± 3	21	24 ± 4

мя, ведется подготовка статей, описывающих экспериментальную установку и результаты исследований реакций $(n, x\gamma)$ на ядрах железа. Проводится работа по анализу кода программы TALYS с целью более качественного понимания его работы, а также для последующей модификации, которая позволит проводить расчеты угловых распределений γ -излучения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Chadwick J., Proceedings of the Royal Society A, **136** (1932) P. 692.
2. Satchler G. R., Proc. Phys. Soc. A. **68** (1955) P. 1037.
3. Altstadt E., Beckert C., Freiesleben H. et al., Annals of Nuclear Energy **34** (2007) P.36.
4. Van Grieken R., Specke A., and Hoste J., J. Radioanal. Chem., **6** (1970) P.385.

5. V Valkovic. 14 MeV Neutrons. Physics and Applications. – CRC Press, New York. 2015.
6. <http://www.euritrack.org/>
7. Рогов Ю. Н., Сапожников М. Г., Никитин Г. М., Ямов А. В., Горный журнал, **5** (2018) С. 58.
8. Bystritsky V. M., Grozdanov D. N., Zontikov A. O. et al. Phys. Part. Nuclei Lett. **13** (2016) P.504.
9. Описание ADCM-16.<http://afi.jinr.ru/ADCM16-LTC>.
10. Nyberg-Ponnert K, Jonsson B, Bergqvist I, Phys Scr, **4** (1971) P.165.
11. Abbondanno U. et al., J. Nucl. Energy. **27** (1973) P. 227.
12. Федоров, Н. А., Грозданов, Д. Н., Копач, Ю. Н. и др. Известия Российской академии наук. Серия физическая **84** (2020) С.480.
13. Грозданов, Д. Н., Федоров, Н. А., Копач, Ю. Н.и др. Ядерная физика **83** (2020) С.200.