

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 539.1, 53.072.8

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ДЕТЕКТОРЕ РЭД-100**

Студент _____ Ю. И. Коськин

Научный руководитель,
к.ф.-м.н., доц. _____ А. В. Кумпан

Научный консультант _____ О. Е. Разуваева

Москва 2025

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ДЕТЕКТОРЕ РЭД-100

Студент	_____ Ю. И. Коськин
Научный руководитель, к.ф.-м.н., доц.	_____ А. В. Кумпан
Научный консультант	_____ О. Е. Разуваева
Рецензент, к.ф.-м.н.	_____ Э. И. Самигуллин
Секретарь ГЭК, к.ф.-м.н.	_____ А. А. Кириллов
Зав. каф. №40, д.ф.-м.н., проф.	_____ М. Д. Скорохватов

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Эксперимент РЭД-100	4
1.1 Упругое когерентное рассеяние нейтрино на атомных ядрах .	4
1.2 Детектор РЭД-100, его устройство	5
1.3 Моделирование детектора РЭД-100 в GEANT4	6
2 Моделирование фоновых событий для эксперимента на КАЭС . .	8
3 Моделирование нестандартных взаимодействий нейтрино в детек- торе РЭД-100	14
3.1 $0\nu\beta\beta$ -распад	15
3.2 Магнитный момент нейтрино	17
3.3 Исследование нестандартных взаимодействий на экспериментах	19
3.4 Моделирование и результаты	21
4 Заключение	27
Список использованных источников	27

Введение

Стандартная модель (СМ) — основополагающая теория современной физики элементарных частиц. Однако, эксперименты по проверке теории выявляют множество вопросов, ответов на которые наука на данный момент не нашла, потому ученые со всего мира ведут свои исследования для доказательства или опровержения её утверждений, поиска «новой физики». Большое количество таких вопросов затрагивает такую частицу как нейтрино. Несмотря на то, что наличие у нейтрино массы было доказано существованием нейтринных осцилляций еще 20 лет назад [1; 2], точная масса остается неизвестной. Теоретические выводы оставляют пространство для поиска «новой физики» в нестандартных взаимодействиях (таких, как не обнаруженный на сегодняшний день двойной безнейтринный бета-распад) и их свойствах (например, экспериментальное определение магнитного момента нейтрино). Исследования нейтринной физики требуют детекторов с высокой чувствительностью и низким уровнем фона. Для такой задачи отлично подходят двухфазные эмиссионные детекторы, к классу которых принадлежит РЭД-100, моделированию процессов в котором и посвящена данная работа. Идея использования двух фаз рабочего вещества была предложена Б. Долгошеиным в 1970-х годах [3]. Принцип работы таких детекторов состоит в регистрации двух компонент сигнала — сцинтилляции (S1) в жидкой фазе и электролюминесценции (S2) в газообразной.

Целями данной работы являются:

- подготовка среды для моделирования событий в детекторе РЭД-100 с учетом замены рабочего вещества с ксенона на аргон;
- моделирование отклика детектора на гамма-фон от радиоактивных изотопов, содержащихся в бетоне и различных частях конструкции установки, сравнение полученных результатов с предсказанным откликом от упругого когерентного рассеяния нейтрино (УКРН);
- моделирование отклика детектора на нестандартные взаимодействия нейтрино, исследование возможности регистрации их при помощи детектора РЭД-100.

1 Эксперимент РЭД-100

1.1 Упругое когерентное рассеяние нейтрино на атомных ядрах

Упругое когерентное рассеяние нейтрино (УКРН) на атомном ядре — процесс, предсказанный в рамках Стандартной Модели [4]. УКРН играет важную роль в процессах формирования Вселенной и эволюции звезд [5], и может сыграть важную роль в изучении физики за пределами Стандартной Модели. Отличительной чертой процесса является то, что нейтрино вступает во взаимодействие со всеми нуклонами ядра когерентным образом, что приводит к увеличению сечения взаимодействия примерно в N^2 раз, где N — число нейтронов в ядре. Данный процесс представляет собой обмен Z -бозоном между нейтрино и всеми нуклонами ядра одновременно.

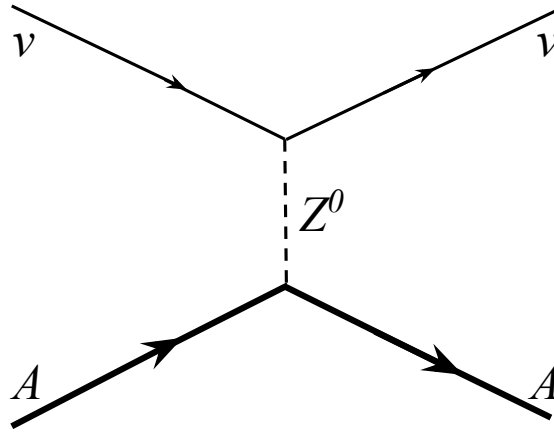


Рис. 1 – Схема когерентного рассеяния нейтрино на ядре

Отметим, максимальная энергия ядра отдачи равна

$$T_{max} = \frac{2E_\nu^2}{M + 2E_\nu}, \quad (1)$$

то есть для большинства элементов энергия ядра отдачи очень мала — порядка единиц-десятков кэВ на ядро [6]. Таким образом возникают серьезные экспериментальные трудности при регистрации подобных процессов,

поэтому, несмотря на то, что процесс УКРН предсказан достаточно давно, экспериментально зарегистрирован он был лишь в 2017 году [7]. На сегодняшний день в мире существует более 20 экспериментов по исследованию УКРН. Источниками нейтрино и антинейтрино нужных энергий (до 50 МэВ) являются ускорители, атомные реакторы и солнце. Эксперимент РЭД-100, о котором пойдет речь далее, нацелен на исследование УКРН от реакторных антинейтрино на Калининской АЭС.

1.2 Детектор РЭД-100, его устройство

Детектор РЭД-100 является двухфазным эмиссионным детектором[8]. Его схема в разрезе представлена на рисунке 2. В качестве материалов рабочего вещества могут использоваться ксенон и аргон. Рабочий объем в форме двенадцатигранника, высотой примерно 40 см просматривается сверху и снизу двумя матрицами, в которых 19 низкофоновых ФЭУ Hamamatsu R11410-20 компактно расположены внутри правильного шестиугольника, вписанного в окружность диаметром около 40 см (рисунок 3).

Ионизирующая частица, попадающая в жидкую фазу детектора взаимодействует с веществом, в результате происходит выделение тепла (что не регистрируется двухфазными детекторами), а также возникают фотоны сцинтилляции (S1) и электроны ионизации. Под действием приложенного электрического поля (около 220 кВ/см) такие электроны дрейфуют в газовую фазу, где после экстракции через границу раздела фаз взаимодействуют с атомами рабочего вещества в электролюминесцентном зазоре с испусканием фотонов электролюминесценции (S2) [9]. Следует отметить, что электрическое поле в электролюминесцентном зазоре гораздо выше (около 3 кВ/см), нежели дрейфовое поле.

Распределение сигнала между фотоумножителями позволяет восстановить координаты события в плоскости XY, а время между первичной (S1) и вторичной (S2) сцинтилляциями определить его глубину.

В 2021-22 гг. на Калининской АЭС был проведен эксперимент с использованием детектора РЭД-100 по исследованию упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах ксенона [8]. При проведении данного экспе-

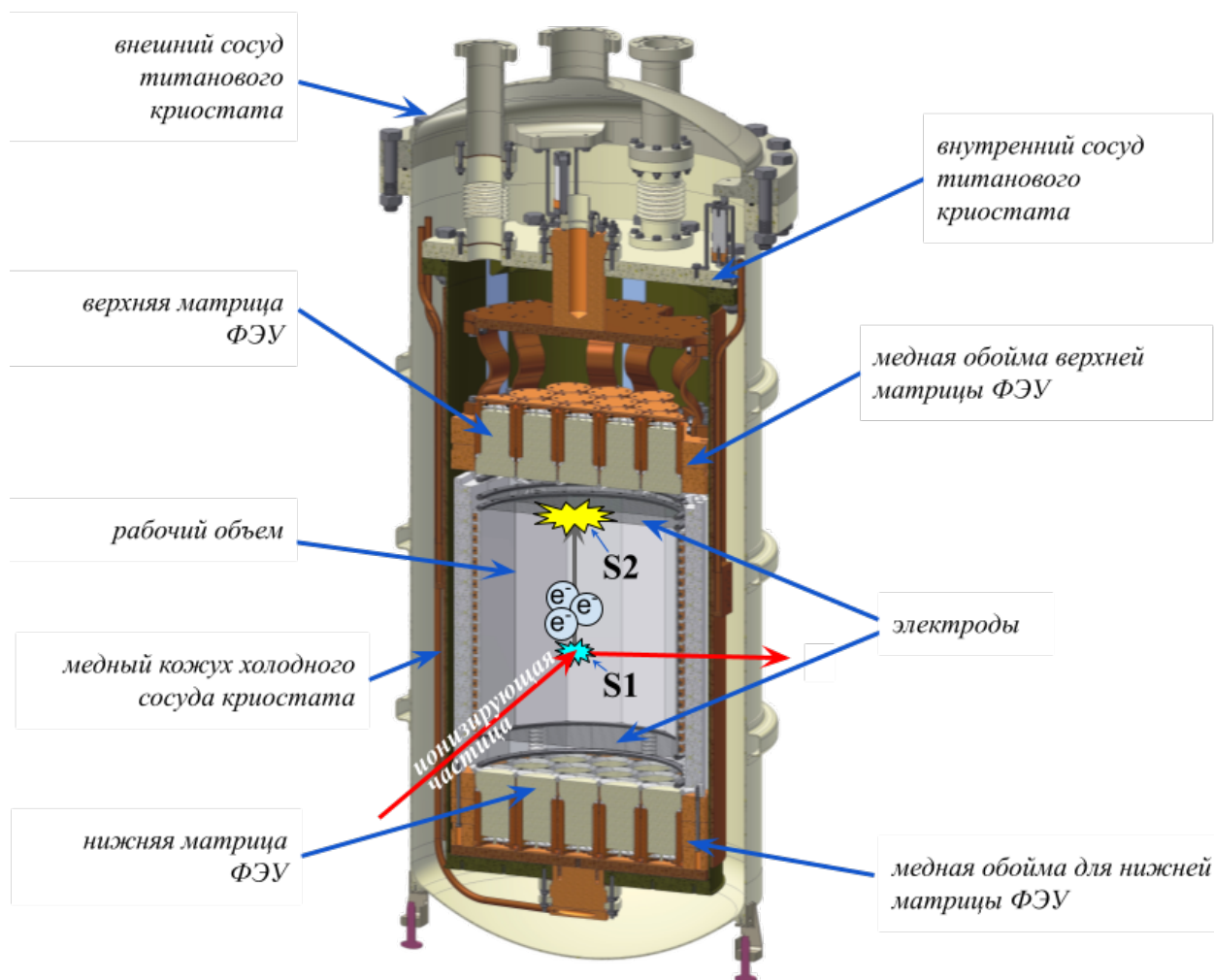


Рис. 2 – Детектор РЭД-100 в разрезе

римента детектор располагался в 19 метрах снизу от реактора четвертого энергоблока и был окружен пассивной защитой – 5 см меди и 60 см воды, находящейся в мягком баке из поливинилхлорида (ПВХ). На данный момент в лаборатории экспериментальной ядерной физики НИЯУ МИФИ ведутся работы по подготовке аналогичного эксперимента, но с аргоном в качестве мишени. Уже было проведено несколько тестовых запусков детектора в лаборатории, в результате чего были получены важные характеристики аргона как рабочего вещества детектора РЭД-100.

1.3 Моделирование детектора РЭД-100 в GEANT4

В рамках данной работы было осуществлено знакомство с широко используемым в экспериментальной ядерной физике программным пакетом

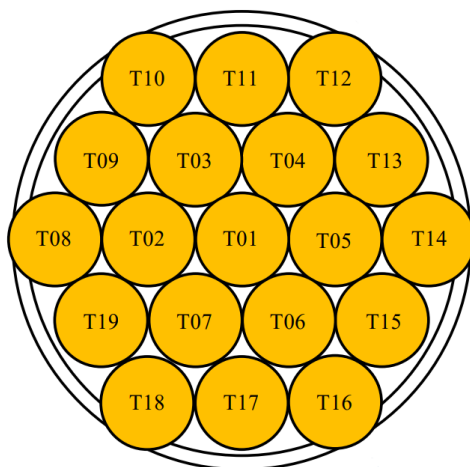


Рис. 3 – Схема расположения ФЭУ в матрице (вид сверху)

GEANT4 [10]. Данная среда предоставляет возможность создания моделей детекторов, состоящих из различных материалов и использующих различные электрические поля и моделирует поведение частиц в различных частях детектора (например, давая возможность оценить процент отсечения фона защитой). Так же GEANT4 позволяет отслеживать не только конечные частицы, но и промежуточные процессы и их параметры. Производя компьютерное моделирование процессов в программе GEANT4 можно получать параметры взаимодействия частиц с веществом с высокой точностью. Конечным результатом GEANT4-моделирования взаимодействия ионизирующей частицы с веществом является набор точечных энерговыделений.

Алгоритм кластеризации

Поскольку не каждое энерговыделение внутри чувствительного объема можно интерпретировать как событие с точки зрения детектора, возникает необходимость введения алгоритма, преобразующего выходные данные GEANT-4 моделирования в кластеры. Данный алгоритм кластеризации был реализован в лаборатории экспериментальной ядерной физики. Принцип его работы заключается в том, что точечные энерговыделения группируются по определенным критериям, при этом сохраняются их структурные особенности (частичный состав, энергии, времена, координаты).

Принципиально работу этого алгоритма можно разбить на четыре

главных этапа.

- 1) Первый этап: на вход алгоритма из GEANT4 поступает информация о событии. Алгоритм считывает координатные и временные распределения в объеме детектора и производит первичный отбор энерговыделений в чувствительном объеме и сортирует их по времени.
- 2) Во втором этапе производится группировка близко располагающихся в пространстве и времени точечных энерговыделений и кластеров. Также на этом этапе происходит отсечение низкоэнергетических событий, которые не могут быть зарегистрированы детектором.
- 3) На третьем шаге для уже кластеризованных событий уточняются такие детали как средние значения координаты, тип частиц, времени.
- 4) Последний, четвертый шаг заключается в составлении итогового списка кластеров со всеми уточненными характеристиками и их сохранение в ROOT-дерево для последующего моделирования сцинтилляций в детекторе.

С использованием алгоритма кластеризации обрабатывались все результаты GEANT4-моделирования в детекторе РЭД-100.

2 Моделирование фоновых событий для эксперимента на КАЭС

Одним из ключевых этапов любого эксперимента в физике элементарных частиц является анализ фоновых условий эксперимента. Так была поставлена задача моделирования сигналов от внешних гамма-фонов для будущего эксперимента на Калининской АЭС по исследованию УКРН с использованием аргона в качестве рабочего вещества. В рамках решения данной задачи были выделены основные источники фона, содержащие радиоактивные изотопы, а именно: бетон здания реактора (^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U), криостат детектора (^{232}Th , ^{238}U) и два медных держателя ФЭУ (^{232}Th , ^{238}U).

Ввиду большого объема бетона в стенах здания и ограничений предполагаемых вычислительных мощностей, прямое моделирование радиоактивных распадов соответствующих изотопов не представляется возможным за разумное время. С целью ускорения процесса моделирования была рассмотрена упрощенная конфигурация, сохраняющая особенности геометрического и энергетического распределений продуктов распада. Из всех частиц, возникающих в процессе и результате распадов всех вышеуказанных изотопов до детектирующего объема детектора в заметных количествах доживают только гамма-кванты. В рамках исследования фоновых сигналов для модели с ксеноном был произведен анализ угловых и энергетических распределений этих гамма-квантов. Идея упрощения процесса моделирования состоит в том, чтобы выбрать некоторую симметричную поверхность вне детектора, генерирование гамма квантов с которой позволило бы максимально эффективно воссоздать картину фона от бетона. В качестве такой поверхности хорошо подходит поверхность водной защиты – цилиндрического бака диаметром около 3 м (далее «внешний цилиндр»), окружающего детектор во время сеанса на реакторе. На рисунке 4 приведена схема расположения детектора на КАЭС по отношению к реактору и цилиндру водной защиты.

Однако, несмотря на значительное ускорение, процедура все еще не подходила для генерации длительных периодов (анализ которых и представляет первоначальный интерес), так как это занимало слишком много времени (генерация 4 минут занимала около двух суток на вычислительном кластере НИЯУ МИФИ). Потому идейным продолжением этого упрощения стал «внутренний цилиндр». В этом случае, все также симметричная поверхность диаметром около 50 см располагается между внутренней стенкой криостата и жидкой фазой детектора. Было установлено, что использование тех же угловых распределений что и для «внешнего цилиндра» не оказывает значительного влияния на отличие формы ожидаемых спектров. Масштаб отклонений лежит в пределах допустимого в рамках данного исследования. С учетом поглощения гамма-фона водной и медной пассивной защитами, для указанного в таблице 2 количества распадов радиоактивных изотопов в бетоне, количество гамма-квантов от всех изотопов, проходящих через поверхность внешнего цилиндра в сутки составляет $72.3 \cdot 10^9$ единиц,

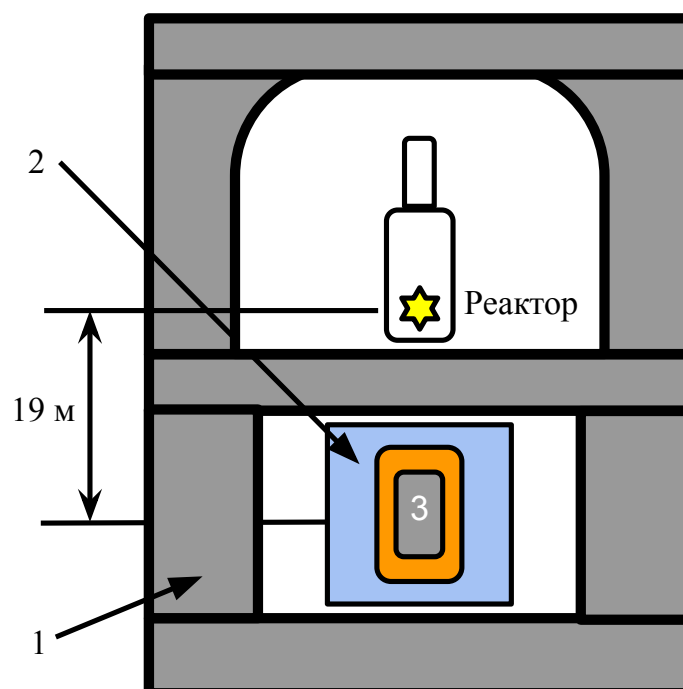


Рис. 4 – Схема расположения детектора РЭД-100 на Калининской АЭС. 1 — бетонная конструкция здания КАЭС; 2 — цилиндр водной защиты; 3 — детектор РЭД-100

а через поверхность внутреннего цилиндра – $71.8 \cdot 10^5$.

Для выполнения поставленной задачи автором работы была осуществлена замена детектирующего вещества детектора на аргон в GEANT4-модели детектора с учетом соответствующих физических характеристик аргона, используемого в эксперименте, приведенных в таблице 1.

	Жидкий аргон	Газообразный аргон
Плотность, г/см ³	1.39400	0.00178
Температура, К	91.15	168.15
Давление, Атм	1.28	1.30

Таблица 1 – Параметры для аргона в модели детектора РЭД-100 в GEANT-4

Далее, произведено моделирование гамма-квантов с «внешнего» (2 минуты фона, отмасштабированные на 3 суток живого времени для проверки спектров) и «внутреннего» (3 суток фона) цилиндров как «имита-

ции» фонов от бетона. Как видно на рисунке 5, энергетические спектры гамма квантов, смоделированных из «внутреннего» и «внешнего» цилиндров совпадают. Этот факт позволяет сделать вывод, о том, что упрощение с «внутренним» цилиндром в достаточной степени сохраняет физику, которая была заложена в моделирование. Следовательно, его можно использовать.

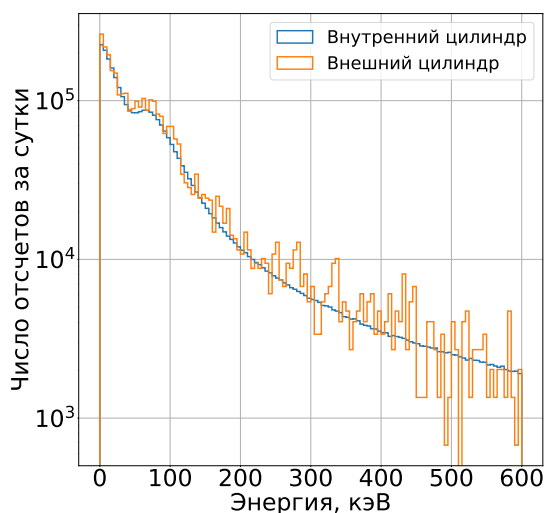


Рис. 5 – Энергетические спектры кластеров при моделировании гамма квантов с «внутреннего» и «внешнего» цилиндров

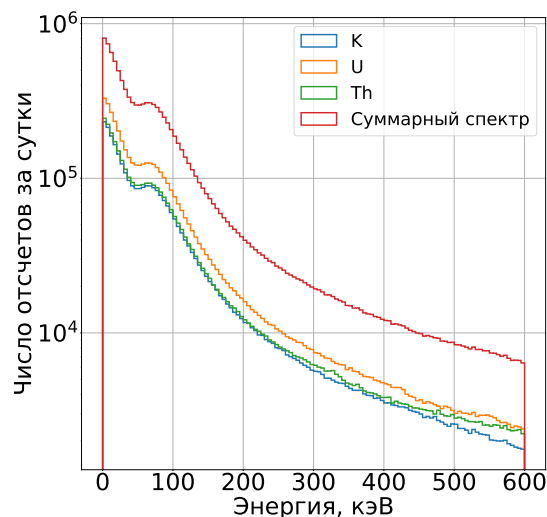


Рис. 6 – Суммарный и поэлементные энергетические спектры кластеров фоновых событий

Сочетание меньших концентраций изотопов тория-232 и урана-238 в упомянутых ранее криостате и медных держателях матриц ФЭУ, а также значительно меньшие объемы соответствующих составляющих детектора позволяют провести прямое моделирование 1 суток радиоактивных распадов без каких-либо упрощений. Соответствующие количества распадов в сутки данных изотопов в бетоне и различных частях детектора представлены в таблице 2. Для обработанных алгоритмом кластеризации событий был построен полный спектр энерговыделений в детекторе. Он представлен на рисунке 6.

После того, как события прошли через алгоритм кластеризации, требуется моделирование спектра в электронах ионизации. Для этого используется программный пакет NEST [11] (Noble Element Simulation Technique)

Источник фона / Изотоп	Число распадов в сутки		
	^{40}K	^{232}Th	^{238}U
Бетон	$8.24 \cdot 10^{11}$	$8.53 \cdot 10^{11}$	$17.87 \cdot 10^{11}$
Внешний криостат	— *	$1.89 \cdot 10^5$	$7.02 \cdot 10^5$
Внутренний криостат	— *	$3.13 \cdot 10^5$	$13.67 \cdot 10^5$
Держатели матриц ФЭУ	— *	$1.09 \cdot 10^5$	$2.83 \cdot 10^5$

Таблица 2 – Число распадов изотопов, содержащихся в исследуемых частях экспериментального комплекса в сутки.

* концентрация изотопа ^{40}K в соответствующих частях детектора считалась незначительной.

– программный пакет, предназначенный для работы с детекторами на благородных газах. Используя полуэмпирические (основанные на экспериментальных и теоретических данных) модели взаимодействий, он, в сочетании с инструментарием GEANT4 позволяет получать в моделировании процессов в жидких благородных газах более близкие к экспериментальным результаты. Результирующий спектр в электронах ионизации далее поступает на вход программы моделирования потерь при дрейфе и экстракции образованных электронов ионизации. Количество электронов ионизации разыгрывается по биномиальному распределению дважды: первый раз с вероятностью, соответствующей эффективности экстракции электронов, второй раз – с вероятностью t/τ , где t – время дрейфа электронов, а τ – время жизни электронов в жидком ксеноне. Время жизни электронов при дрейфе в жидком аргоне, согласно измерениям, полученным в ходе последнего тестового запуска детектора РЭД-100 с аргоном, составляет 450 мкс, при максимальном времени дрейфа 435 мкс. При переходе границы раздела жидкой и газообразной фаз электроны преодолевают потенциальный барьер, однако в случае аргона его высота невелика и эффективность экстракции электронов через границу раздела фаз составляет около 100% [12]. В ксеноне данная эффективность ниже (порядка 32.8%) и для того, чтобы программа была универсальной, в нее была добавлена эффективность экстракции как регулируемый параметр. Таким образом были получены распределения по числу электронов ионизации в событиях до и после потерь при дрейфе и экстракции. Распределения для различных энергетических диапазонов приведены на рисунках 7 и 8.

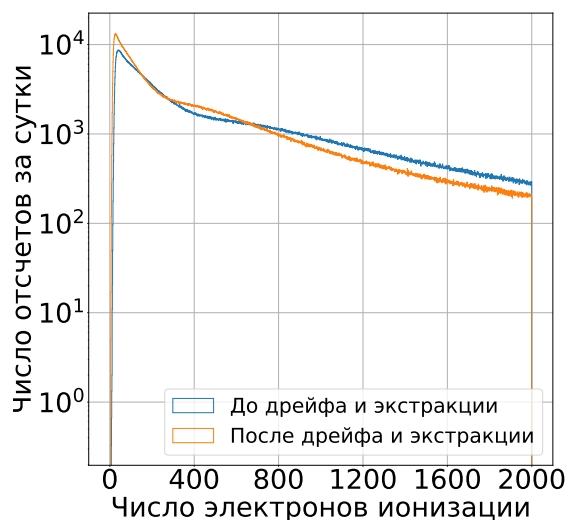


Рис. 7 – Распределение числа электронов ионизации в событии (до 2000 электронов)

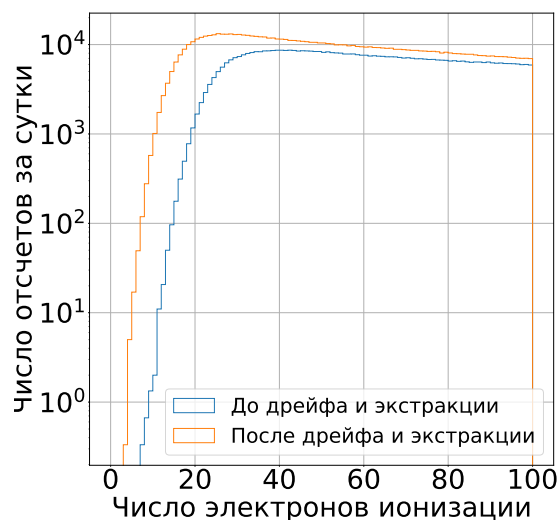


Рис. 8 – Распределение числа электронов ионизации в событии (до 100 электронов)

Ожидаемый сигнал от упругого когерентного рассеяния нейтрино в аргоне составляет до десяти электронов ионизации. При сравнении флуктуаций полученного в данной работе сигнала от внешних фонов с ожидаемым спектром от УКРН в электронах ионизации можно убедиться, что флуктуации составляют допустимую незначительную долю от числа событий УКРН в области до 7 электронов ионизации, что видно на рисунке 9. Поэтому можно сделать вывод о том, что модернизация защиты детектора не необходима. Однако, в области энергий больше 7 электронов флуктуации фона, очевидно, превышают ожидаемый сигнал. Поэтому, хоть в улучшении защиты от внешних гамма-фонов нет критической необходимости, из полученных данных можно сделать вывод о том, что модернизация защиты и критериев отбора совершенно точно улучшит фоновые условия эксперимента. Следует отметить, что данные выводы касаются только внешних гамма-фонов. Другие источники фона не исследовались в рамках данной работы.

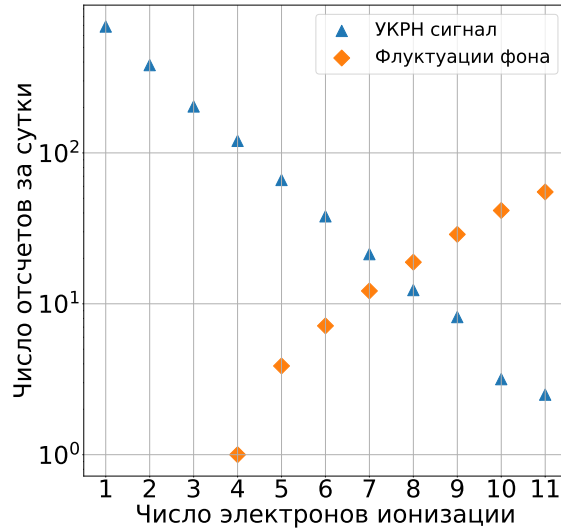


Рис. 9 – Распределение числа фоновых событий, а также событий УКРН в сутки по числу электронов ионизации

3 Моделирование нестандартных взаимодействий нейтрино в детекторе РЭД-100

Детектор РЭД-100 изначально задумывался как детектор для исследования явления упругого когерентного рассеяния нейтрино. Однако, исследования нейтрино неминуемо сопряжены с поиском нестандартных взаимодействий. К таким взаимодействиям относятся двойной безнейтринный бета-распад или гипотетическое нейтрино-электронное рассеяние по электромагнитному каналу, позволяющее изучать магнитный момент нейтрино. Оба этих процесса представляют огромный интерес для современной физики, так как могут объяснить природу массы нейтрино, установить или опровергнуть факт сохранения лептонного числа и его связи с калибровочной симметрией. Получение результатов в этой области и их интерпретация позволит углубить свое понимание об устройстве вселенной и пути ее развития.

3.1 $0\nu\beta\beta$ -распад

Исследование двойного бета-распада берет свое начало с работы Марии Гёперт-Майер, которая в 1935 году в работе [13] теоретически описала возможность одновременного распада двух протонов бета-активных ядер. Его формула записывается следующим образом:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + 2\tilde{\nu}_e \quad (2)$$

Фейнмановская диаграмма такого процесса представлена на рисунке 10. Здесь нейтрино задается как дираковская частица, т.е. описываемая решениями уравнения Дирака и такая, которая не тождественна своей античастице.

Исследование Гёперт-Майер привлекло внимание научного сообщества и физики того времени стали развивать теоретическую структуру нового взаимодействия. Так, выдвинутое Этторе Майорана в 1937 году предположение о неразличимости нейтрино и антинейтрино [14] вдохновило Вэнделла Фьюри на описание безнейтринной вариации двойного бета-распада [15], в котором нейтрино участвует как виртуальная частица — $0\nu\beta\beta$ -распад:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z \pm 2) + e^\mp + e^\mp \quad (3)$$

Фейнмановская диаграмма электронной вариации процесса на рисунке 11. При таком процессе нейтрино является майорановской частицей (т.е. является собственной античастицей), или комбинацией дираковского и майорановского типов. На рисунке 12 представлены распределения числа событий двухнейтринного и безнейтринного бета-распадов от энергии образованных электронов.

Согласно теории, безнейтринный двойной бета-распад в природе более вероятен, чем ныне экспериментально подтвержденный двухнейтринный. Это утверждение объясняется различием в фазовых объемах процессов. Существует условие, которое ограничивает энергию нейтрино в безнейтринном распаде до величины порядка 40 МэВ (для ядер средней массы) — знак волновой функции не должен меняться внутри ядра. Озвученная

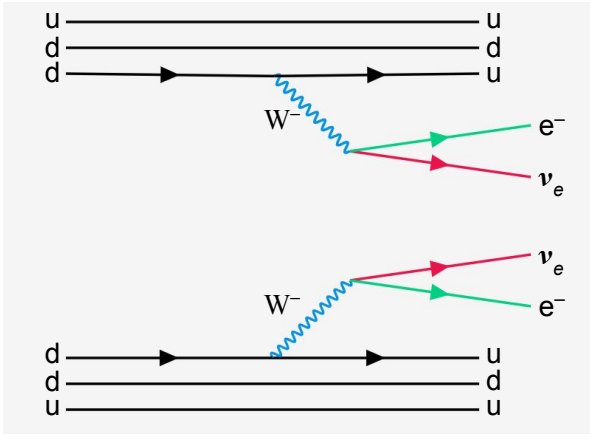


Рис. 10 – Диаграмма Фейнмана для $2\nu\beta\beta$ -распада.

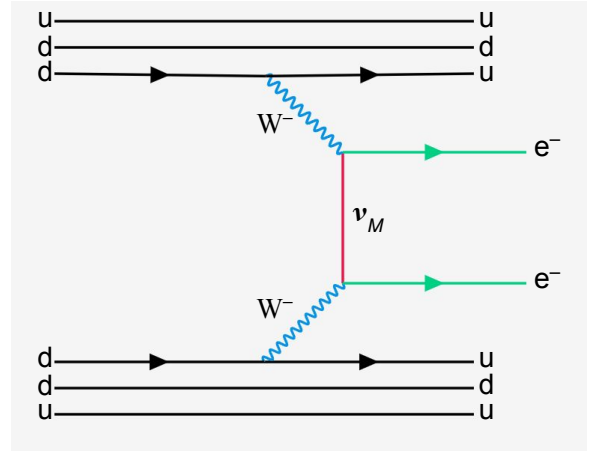


Рис. 11 – Диаграмма Фейнмана для $0\nu\beta\beta$ -распада.

в предыдущем предложении энергия виртуального нейтрино значительно больше возможной в двухнейтринном распаде, отчего и фазовый объем у такого процесса больше, а потому и его вероятность [16].

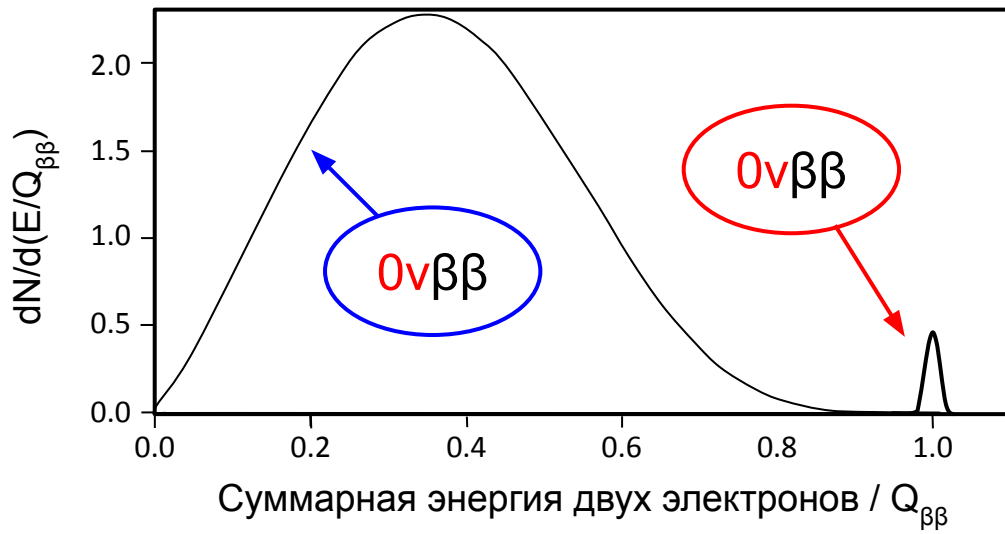


Рис. 12 – Распределения числа событий $2\nu\beta\beta$ и $0\nu\beta\beta$ распадов от суммарной энергии двух электронов ($Q_{\beta\beta} \sim 2-3$ МэВ)

В 1955 году результаты эксперимента Реймонда Дэвидса по поиску антинейтрино в реакции $\bar{\nu}_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ физиками были восприняты как возможное подтверждение того, что нейтрино является дираковской частицей, а лептонное число сохраняется. После открытия нарушения Р-

четности в эксперименте Ву[17] стало понятно, что исследуемая Дэвидсом реакция невозможна, поскольку должна быть подавлена из соображений хиральности.

Сохранение лептонного числа в Стандартной модели требует безмассовости нейтрино, что противоречит экспериментальным выводам, полученным из открытия нейтринных осцилляций. Современная физика элементарных частиц занимается поиском теорий, которые могли бы объяснить экспериментально подтвержденные аномальные эффекты, не согласующиеся со Стандартной моделью. Так в Теориях Великого Объединения (GUT) нейтрино есть смесь дираковского и майорановского состояний и при этом обладает ненулевой массой.

Помимо выше обозначенных мод распада, для $0\nu\beta\beta$ в калибровочных теориях допускается существование майорановой моды (с безмассовым голдстоуновским бозоном, возникающим в контексте барионно-лептонной асимметрии) известный так же как $0\nu\chi^{2\beta}$ -распад.

3.2 Магнитный момент нейтрино

Дираковская природа массивного нейтрино влечет за собой наличие у него магнитного момента. Несмотря на нейтральную природу частицы, последнее утверждение находит свое объяснение в пространстве взаимодействия виртуальных частиц. Нейтрино, движущееся в электромагнитном поле в некоторый момент времени t в точке r с некоторой вероятностью распадается на виртуальные W^+ -бозон и электрон. В момент времени t' , в точке с координатой r' виртуальные W^+ и e^- взаимно поглощаются, превращаясь в нейтрино. Поясняющая диаграмма Фейнмана приведена на рисунке 13. Образовавшиеся виртуальные частицы взаимодействуют с внешним электрическим полем, тем самым меняя свое состояние и конечное состояние нейтрино соответственно. В результате такого взаимодействия образуются поправки к энергии нейтрино, действительная часть которых определяется как сдвиг уровней энергии во внешнем электрическом поле. Одно из слагаемых в этой поправке можно интерпретировать как энергию взаимодействия магнитного момента нейтрино μ_ν с внешним магнитным полем H . Таким образом, магнитный момент сонаправлен со спином для

нейтрино и противоположен для антинейтрино.

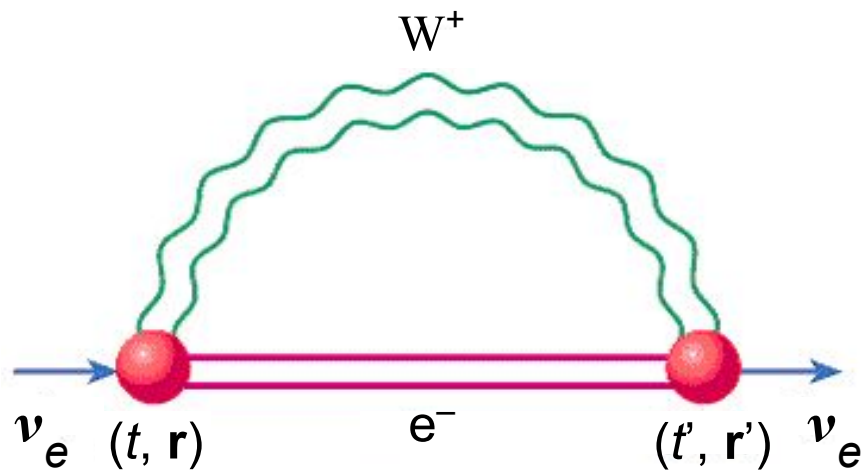


Рис. 13 – Фейнмановская диаграмма, описывающая радиационную поправку к массе дираковского нейтрино во внешнем поле

3.3 Исследование нестандартных взаимодействий на экспериментах

Опровержение или расширение Стандартной Модели продолжает привлекать внимание ученых со всего мира. На сегодняшний день существует множество организаций и объединений, ведущих исследования нестандартных взаимодействий и расширения Стандартной Модели.

Безусловно, список существующих экспериментов и коллабораций не ограничивается лишь упомянутыми ниже. Приведенные группы являются одними из ведущих в этой области и были изучены автором работы в порядке ознакомления с международным опытом исследований «новой физики».

Поиск $0\nu\beta\beta$ -распада

1. Эксперимент CANDLES (Calcium fluoride for the study of Neutrinos and Dark matters by Low Energy Spectrometer). Данный детектор использует для измерений кристаллы фторида кальция CaF_2 , которые содержат ^{48}Ca . В установке они имеют форму куба размером 10 см и массой 3.18 кг [18]. Кристаллы фторида кальция погружены в баки с жидким сцинтиллятором, который испускает фотоны, взаимодействуя с фоновым излучением. Вне жидкого сцинтиллятора сосуд заполнен чистой водой, которая играет роль пассивной защиты от фонового излучения вне детектора. Наблюдение фотонов производится с помощью 40 фотоэлектронных умножителей. Используя разницу между временами распада CaF_2 (порядка 1 мкс) и временем высвечивания жидкого сцинтиллятора (10 нс) можно распознать фоновое гамма излучение по форме сигнала. Полученный верхний предел: $T_{\frac{1}{2}} > 0.8 \times 10^{22}$ лет [19]

2. Эксперимент GERDA (The GERmanium Detector Array), использующий высокочистые германиевые детекторы в качестве и рабочего вещества, и источника (обогащенный ^{76}Ge) [20]. Дополнительной защитой служат резервуары с жидким аргоном и резервуар с дистиллированной водой, которые работают как активная и пассивная защита. Подобный метод отсека фонов показал крайне высокую эффективность по сравнению с другими

экспериментами подобного класса (например, Гейдельберг-Москва). Полученный верхний предел: $T_{\frac{1}{2}} > 1.8 \times 10^{26}$ лет [21]

3. Эксперимент KAMLand-Zen (The KAmioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector), использующий в качестве рабочего вещества жидкий сцинтиллятор, а в качестве источника - жидкий ксенон, растворённый в нём. В качестве дополнительной активной защиты используется 1000-тонный резервуар с жидким органическим сцинтиллятором, который так же просматривается ФЭУ. Полученный верхний предел: $T_{\frac{1}{2}} > 1.9 \times 10^{25}$ лет [22]

Исследование магнитного момента нейтрино

1) Эксперимент TEXONO.

Лаборатория исследования реакторных нейтрино в Куо-Шенге, Китай располагается на расстоянии 28 метров от ядра одноименной ядерной электростанции. Мультифункциональное «внутреннее» детекторное пространство из германия высокой степени очистки, объемом 600 литров, полностью окружено экранирующими панелями общим весом порядка 50 тон. Защитные слои включают в себя таким материалы как борированный полиэтилен, медь а также специальные сцинтилляционные панели. Вся детектирующая установка размещена на подвижном основании, что позволяет менять расстояние от центра детектора до реактора[23]

Полученное ограничение: $\mu_{\nu_e} < 7.4 \cdot 10^{-11} \mu_B$

2) Эксперимент BOREXINO.

Долговременный международный эксперимент по физике нейтрино, осуществляемый в подземной лаборатории Национального института ядерной физики Италии (INFN) в горном массиве Гран Сассо в центре Апеннин[24]. Нейлоновая сфера, заполненная 300 тоннами жидкого сцинтиллятора, очищенного от примесей урана и тория, просматривается сферической, покрывающей всю поверхность сферы матрицей из 2200 ФЭУ. Также сфера окружена слоем дистиллированной

воды, служащей защитой от продуктов распада урана и тория, содержащихся в горных породах.

Результат: $\mu_\nu^{eff} < 3.9 \cdot 10^{-11} \mu_B$ [24]

3) Эксперимент Super-Kamiokande.

Нейтринный черенковский детектор, являющийся модернизацией и идейным последователем Kamiokande-II, расположен в префектуре Гифу, Япония. Конструкция представляет из себя водный бак, заполненный 50000 тоннами воды, просматриваемый 13000 ФЭУ [25].

Результат: $\mu_\nu < 3.6 \cdot 10^{-10} \mu_B$

4) Эксперимент ν Gen [26]. Особенностью данного эксперимента является то, что он находится на Калининской АЭС, на третьем энергоблоке, реактор которого аналогичен реактору четвертого энергоблока. Следовательно, его результаты так или иначе могут быть использованы при планировании эксперимента РЭД-100 и анализе его результатов. Рабочим веществом в данном эксперименте является германий. В зависимости от выбранного энергетического диапазона, на данном эксперименте исследуются как электромагнитные свойства нейтрино, так и УКРН.

Результат: $\mu_\nu < 7.5 \cdot 10^{-11} \mu_B$

3.4 Моделирование и результаты

Двойной безнейтринный позитронный бета распад

После ознакомления с теорией была написана программа упрощенного пространственного моделирования процесса двойного безнейтринного позитронного бета-распада (ДБПБР) на языке программирования Python. В случае детектора РЭД-100, исследованию ДБПБР подлежит изотоп ^{124}Xe . Распределение возникающих при аннигиляции позитронов четырех гамма-квантов внутри сферы радиуса 15 см [27], что проиллюстрировано на рисунке 15) позволяет свести моделирование геометрии события в ^{124}Xe к

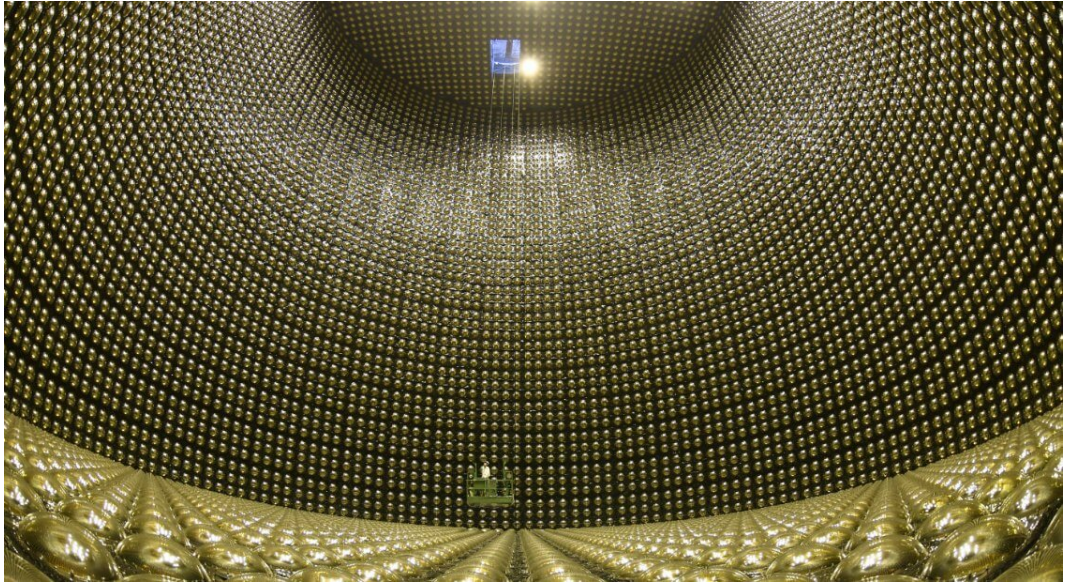


Рис. 14 – Эксперимент Super-Kamiokande (вид изнутри)

генерации пяти точек (центров энергетических кластеров): центральной — соответствующей энерговыделению в точке аннигиляции нейтрино и четырех, расположенных вокруг нее внутри сферы, попарно по разные стороны от центра. Энерговыделение в центральном кластере составляет 821 кэВ, в периферийных в случае полного фотопоглощения — 511 кэВ [27].

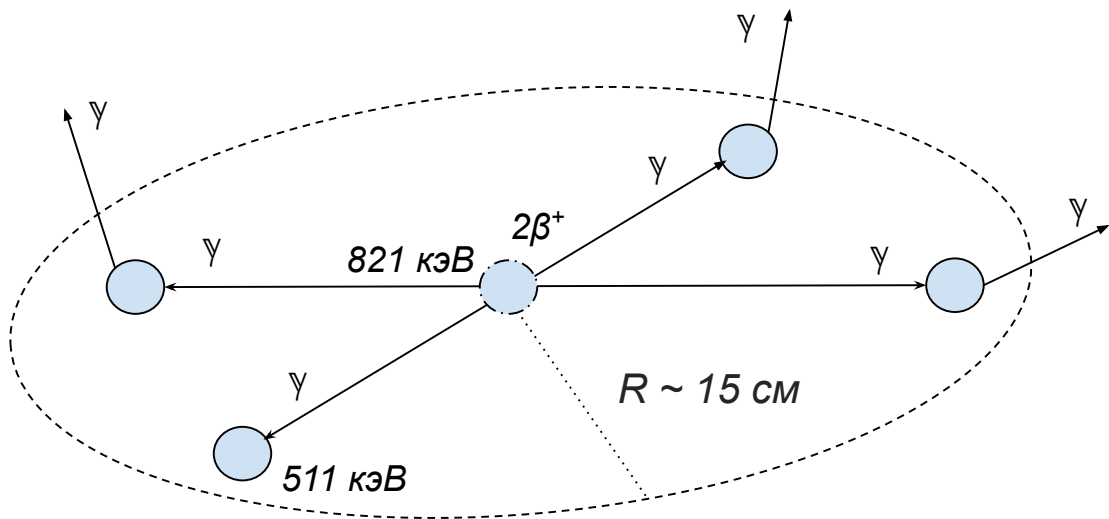


Рис. 15 – Схематичное изображение события позитронного двойного бета-распада в детекторе, заполненном жидким ксеноном.

Геометрические особенности такого распада обеспечивается генерацией точек на двух прямых, проходящих через центр сферы требуемого

радиуса. Добавление в координаты этих точек сгенерированных в соответствии с нормальным распределением ошибок, приближенно соответствующим координатному разрешению детектора, позволяет симитировать отклонения реконструированных координат взаимодействий от первоначальных. В плоскости ХУ значение координатного разрешения полагалось равным около 15 мм, по Z - координате — 5 мм. Далее производилось фитирование точек плоскостью и визуализация трехмерной картины смоделированного процесса (рисунок 16). Данная программа была необходима для предварительного моделирования пространственной сигнатуры событий ДБПБР. Процедура фитирования плоскостью в дальнейшем была также использована для анализа смоделированных в GEANT-4 событий.

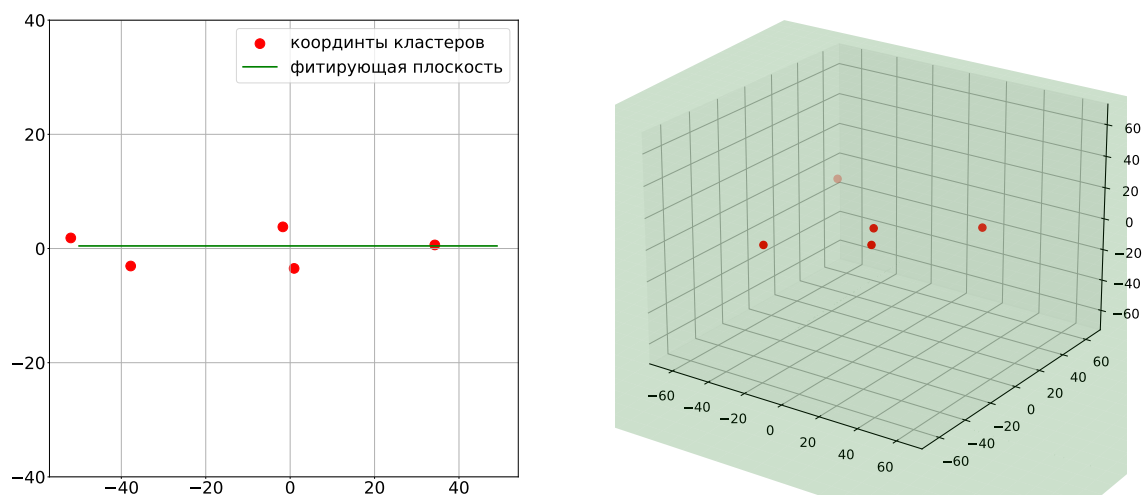


Рис. 16 – Слева: Пример проекции координат кластеров и фитирующей плоскости для события двойного безнейтринного позитронного бета-распада на плоскость ХZ. Справа: Пространственная картина смоделированного события двойного безнейтринного позитронного бета-распада.

Для более подробного анализа, в GEANT4 было произведено моделирование 30000 событий ДБПБР и их последующий анализ через алгоритм кластеризации. Из кластеризованных событий были отобраны содержащие ровно пять кластеров. Также автором работы около 1000 раз было смоделировано 5 точек, случайно разбросанных внутри сферы радиуса 15 см.

Далее к полученным наборам координат была применена процедура

фитирования плоскостью. Распределения средних значений ошибки такого фитирования для данных случайной генерации и GEANT4 моделирования приведены на рисунке 17 слева. Можно заметить, что средние значения, а также вид полученных распределений значительно отличаются, что можно использовать как идентифицирующую особенность при поиске событий ДБПБР на эксперименте. Однако, так как случайных совпадений в реальном эксперименте будет, очевидно, больше, чем от гипотетического процесса ДБПБР, будет требоваться разработка и других критериев отбора, помимо среднего отклонения от плоскости.

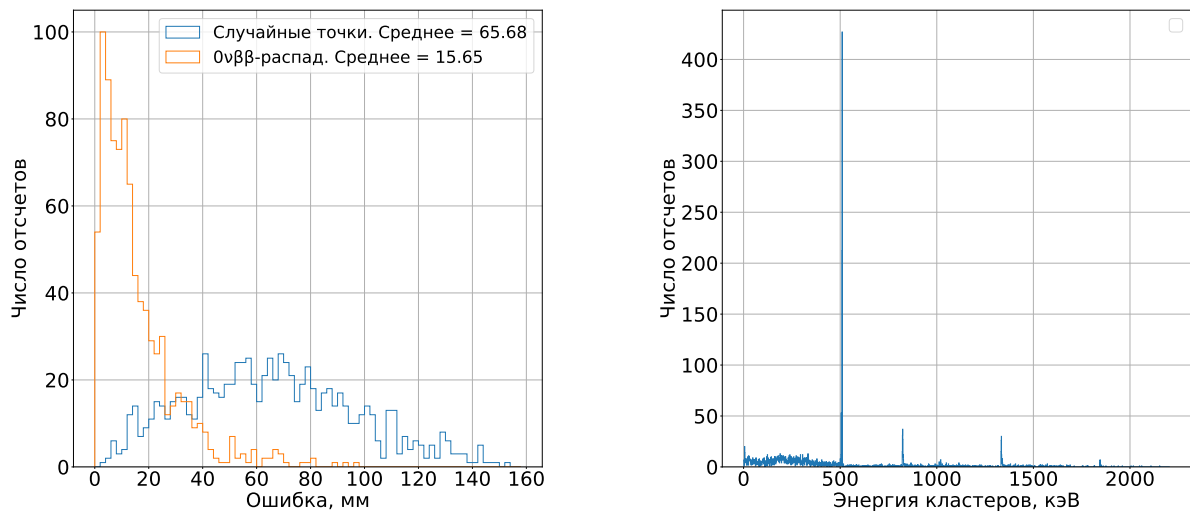


Рис. 17 – Слева: Распределение средних значений ошибки при фитировании координат кластеров плоскостью из GEANT-моделирования, а также координат пяти точек, случайно сгенерированных внутри сферы радиуса 15 см. Справа: Распределение значений энергии кластеров. Из гистограммы исключен нулевой бин.

Также для отобранных из GEANT-моделирования событий было построено распределение по энергиям кластеров, представленное на рисунке 17 справа. На данном распределении можно видеть характерный пик на 511 кэВ, и на 821 кэВ, данные пики соответствуют центральному периферическим и центральному энергосвечениям соответственно. Это свидетельствует о том, что моделирование было проведено верно и соответствует физике процесса. Пики с большими энергиями соответствуют случаям, когда два энергосвечения были объединены алгоритмом кластеризации

в один кластер, так как произошли слишком близко, чтобы быть различимыми с точки зрения детектора.

К сожалению, согласно моделированию, «идеальные» события, содержащие в себе ровно 5 кластеров (а именно такие события представляют интерес из-за своей пространственной сигнатуры), составляют около 3% от общего числа смоделированных событий. Данный результат ставит под сомнение возможность регистрации ДПБР детектором РЭД-100, и требует дальнейшего изучения вопроса, и, возможно, изменения подхода к отбору событий.

Рассеяние нейтрино на электроны по электромагнитному каналу

Как уже упоминалось, для исследования магнитного момента нейтрино подходит гипотетический процесс рассеяния нейтрино на электроны по электромагнитному каналу.

На данный момент в лаборатории экспериментальной ядерной физики рассматривается возможность поставить ограничение на величину магнитного момента нейтрино с использованием уже набранных и обработанных данных с эксперимента на Калининской АЭС с использованием ксенона в качестве рабочего вещества. Для этого с использованием величины магнитного момента нейтрино $10^{-10} \mu_B$ был смоделирован соответствующий спектр электронов отдачи в ксеноне. Величина магнитного момента является варьируемым параметром при постановке верхнего предела, поэтому было взято большее значение, нежели существующие ограничения, для увеличения статистики. После чего, при помощи теоретическо-эмпирических моделей NEST был получен спектр в электронах ионизации. Далее, с применением упоминавшегося в главе «Моделирование фоновых событий событий в детекторе РЭД-100» алгоритма моделирования дрейфа и экстракции автором работы было смоделировано 200 суток сигнала от магнитного момента нейтрино после дрейфа и экстракции. Измеренный коэффициент экстракции электронов в жидком ксеноне ниже чем в аргоне и составлял $32.8 \pm 2.8\%$ во время эксперимента на Калининской АЭС [8]. При этом, в ходе продолжительной очистки рабочего вещества, удалось достичь времени жизни электронов при дрейфе в жидком ксеноне 874 ± 17 мкс.

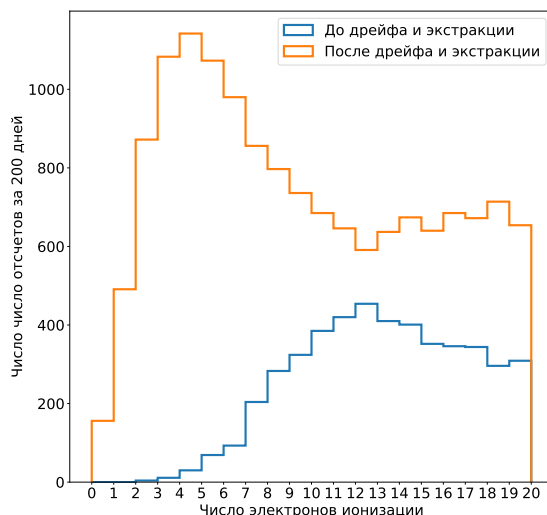


Рис. 18 – Распределение числа электронов ионизации в событии электрон-нейтринного рассеяния до и после дрейфа и экстракции

Полученный в электронах ионизации спектр до и после дрейфа и экстракции представлен на рисунке 18. Спектры на данном рисунке ограничены 20 электронами ионизации ввиду того, что триггер при наборе данных детектора РЭД-100 был оптимизирован для набора данных до 10 электронов ионизации, и неизвестно, как ведет себя его эффективность при больших энергиях. На данном спектре видно, что большое количество событий находится в области больше 5-6 электронов ионизации (области интереса при исследованиях УКРН на РЭД-100), что, возможно, потребует дополнительной переобработки набранных данных. На текущий момент эти вопросы находятся в процессе обсуждения.

В дальнейшем планируется смоделировать отклик детектора РЭД-100 на события рассеяния нейтрино на электроны по электромагнитному каналу, что позволит наложить на них все необходимые для анализа отборы. Далее планируется сравнить их спектр с разностным спектром данных, набранных в рамках эксперимента на Калининской АЭС с включенным и выключенным реактором. Аналогичная процедура была проделана для УКРН данных, и позволила ранее установить верхний предел на сечение УКРН реакторных антинейтрино на ядрах ксенона [8].

4 Заключение

В рамках выполнения данной работы были получены следующие результаты:

- 1) Изучены процедуры моделирования событий в двухфазном эмиссионном детекторе РЭД-100 (как на ксеноне, так и на аргоне).
- 2) В модели РЭД-100 в GEANT-4 произведена замена рабочего вещества на аргон.
- 3) Произведена модификация процедуры кластеризации соответствующая замене рабочего вещества
- 4) Проведено моделирование энерговыделений от внешних гамма-фонов в детекторе РЭД-100; на основе полученных результатов сделаны выводы о необходимости модификации внешней пассивной защиты и критериев отбора, при условии исследования области энергий больше 7 электронов ионизации.
- 5) Произведен обзор литературы на тему экспериментальных исследований нестандартных взаимодействий нейтрино.
- 6) Произведено GEANT-4 моделирование процесса двойного позитронного безнейтринного бета-распада в детекторе РЭД-100.
- 7) Произведено моделирование электрон-нейтринного рассеяния по электромагнитному каналу в детекторе РЭД-100.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 The Sudbury Neutrino Observatory / A. Bellerive [и др.] // Nuclear Physics B. — 2016. — Июль. — Т. 908. — С. 30—51. — ISSN 0550-3213.
- 2 Kajita T. Atmospheric neutrino results from Super-Kamiokande and Kamiokande — Evidence for oscillations // Nuclear Physics B - Proceedings Supplements. — 1999. — Май. — Т. 77, № 1—3. — С. 123—132. — ISSN 0920-5632.
- 3 Dolgoshein B. A., Lebedenko V. N., Rodionov B. U. New Method of Registration of Ionizing-particle Tracks in Condensed Matter //. — 1970. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:115818246>.
- 4 Freedman D. Z. Coherent effects of a weak neutral current // Phys. Rev. — 1974. — Mar. — Vol. 9, no. 5.
- 5 Balasi K., Langanke K., Martínez-Pinedo G. Neutrino–nucleus reactions and their role for supernova dynamics and nucleosynthesis // Progress in Particle and Nuclear Physics. — 2015. — Vol. 85. — P. 33–81. — ISSN 0146-6410.
- 6 Calibration and characterization of the RED-100 detector at the Kalinin Nuclear Power Plant / D. Akimov [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2024. — Нояб. — Т. 19, № 11. — T11004. — ISSN 1748-0221.
- 7 Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering, Science / D. Akimov, J. Albert, P. An, [et al.] // Science. — 2017. — Sept. — Vol. 357, no. 15. — P. 1123–1126.
- 8 First constraints on the coherent elastic scattering of reactor antineutrinos off xenon nuclei / D. Y. Akimov [и др.] // Phys. Rev. D. — 2025. — Апр. — Т. 111, вып. 7. — С. 072012.
- 9 Noble Gas Detectors / E. Aprile [et al.]. — Wiley-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, Weinheim, 10/2006.

- 10 GEANT4-a simulation toolkit / S. Agostinelli [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. — 2003. — Июль. — Т. 506. — С. 250.
- 11 A Review of NEST Models for Liquid Xenon and Exhaustive Comparison to Other Approaches / M. Szydagis [и др.]. — 2022. — Нояб. — arXiv: 2211.10726 [hep-ex].
- 12 First constraints on the coherent elastic scattering of reactor antineutrinos off xenon nuclei / D. Y. Akimov [и др.] // Physical Review D. — 2025. — Апр. — Т. 111.
- 13 Goeppert-Mayer M. Double Beta-Disintegration // Phys. Rev. — 1935. — Сент. — Т. 48, вып. 6. — С. 512—516.
- 14 Majorana E. Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone // Nuovo Cimento. — 1937. — Т. 14. — С. 171—184.
- 15 Furry W. H. On Transition Probabilities in Double Beta-Disintegration // Phys. Rev. — 1939. — Дек. — Т. 56, вып. 12. — С. 1184—1193.
- 16 Хирк М. Попытки теоретического предсказания периодов полураспада изотопов, подверженных двойному бета-распаду //. Т. 2. — 10.2016. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:185650730>.
- 17 Further Experiments on β Decay of Polarized Nuclei / E. Ambler [и др.] // Phys. Rev. — 1957. — Июнь. — Т. 106, вып. 6. — С. 1361—1363.
- 18 Study of ^{48}Ca Double Beta Decay by CANDLES / I. Ogawa [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2011. — Сент. — Т. 312, № 7. — С. 072014.
- 19 The CANDLES experiment for the study of Ca-48 double beta decay / T. Iida [и др.] // Nuclear and Particle Physics Proceedings. — 2016. — Апр. — Т. 273—275. — С. 2633—2635.
- 20 The GERmanium Detector Array (Gerda) for the search of neutrinoless decays of ^{76}Ge at LNGS / S. Schönert [и др.] // Nuclear Physics B - Proceedings Supplements. — 2005. — Т. 145. — С. 242—245. — ISSN 0920-5632. — NOW 2004.

- 21 Results on Neutrinoless Double- Decay of ^{76}Ge from Phase I of the GERDA Experiment. / M. Agostini [и др.] // Physical review letters. — 2013. — Сент. — Т. 111. — С. 122503.
- 22 Measurement of the double- β decay half-life of ^{136}Xe with the KamLAND-Zen experiment / A. Gando [и др.] // Phys. Rev. C. — 2012. — Апр. — Т. 85, вып. 4. — С. 045504.
- 23 Singh V., Wong H. T. Recent Results and Status of TEXONO Experiments. — 2004. — arXiv: nucl-ex/0412057 [nucl-ex]. — URL: <https://arxiv.org/abs/nucl-ex/0412057>.
- 24 The Main Results of the Borexino Experiment / A. Derbin [и др.]. — 2016. — arXiv: 1605.06795 [hep-ex]. — URL: <https://arxiv.org/abs/1605.06795>.
- 25 The Super-Kamiokande detector / S. Fukuda [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — Т. 501, № 2. — С. 418—462. — ISSN 0168-9002.
- 26 First results of the νGeN experiment on coherent elastic neutrino-nucleus scattering / I. Alekseev [и др.] // Phys. Rev. D. — 2022. — Сент. — Т. 106, вып. 5. — С. L051101.
- 27 An electroluminescence emission detector to search for double-beta positron decays of ^{124}Xe and ^{78}Kr / A. Bolozdynya [и др.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1997. — Т. 44, № 3. — С. 1046—1051.