

МИНЕСТЕРСТВО 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

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ДЕТЕКТОРЕ
РЭД-100

Научный руководитель

_____ Кумпан А. В.

Студент

_____ Коськин Ю. И.

Москва 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Эксперимент РЭД-100	4
1.1 Детектор РЭД-100, его устройство	4
1.2 Моделирование детектора РЭД-100, алгоритм кластеризации .	4
2 Моделирование фоновых событий для эксперимента на КАЭС . .	7
3 Моделирование нестандартных взаимодействий в детекторе РЭД-100	11
3.1 $\nu\beta\beta$ -распад	11
3.2 Магнитный момент нейтрино	13
3.3 Эксперименты по поиску $\nu\beta\beta$ -распада и исследованию маг-	
нитного момента нейтрино	14
3.4 Моделирование и результаты	16
4 Заключение	21
Список использованных источников	21

Введение

Стандартная модель (СМ) – основополагающая теория современной физики элементарных частиц. Но несмотря на свою фундаментальность, 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 него массы было доказано существованием нейтринных осцилляций еще 20 лет назад, 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. Принцип работы двухфазного эмиссионного детектора состоит в эмиссии электронов в результате взаимодействия частиц с веществом детектирующей (жидкой) фазы и последующего их дрейфа в газовую фазу, с соответствующей регистрацией энерговыделений (сцинтилляций) приборами детектора.

1 Эксперимент РЭД-100

1.1 Детектор РЭД-100, его устройство

РЭД-100 представляет собой двухфазный эмиссионный детектор (рис. 2) на жидком ксеноне [1—3]. Цилиндрический рабочий объем детектора с размерами примерно 40 см в высоту и 40 см в диаметре сверху и снизу просматривается матрицами (рис. 3), состоящими из 19 низкофоновых, работающих при криогенных температурах фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). При взаимодействии элементарной частицы с ксеноном испускаются фотоны сцинтилляции (S1) и электроны ионизации [1—3]. Благодаря приложенному электрическому полю электроны ионизации дрейфуют к поверхности, где выходят в газовую фазу. Величина поля в жидкой фазе составляет примерно 200 В/см. В газе электроны возбуждают атомы ксенона с излучением вторичной сцинтилляции (S2), также называемой электролюминесценцией. Следует подчеркнуть, что размножение электронов отсутствует, следовательно, количество фотонов пропорционально количеству электронов. РЭД-100 является жидко-ксеноновой время-проекционной камерой. Временной промежуток между S1 и S2 позволяет определять глубину произошедшего взаимодействия, а распределение сигнала между ФЭУ — координату в плоскости XY и полную энергию события.

1.2 Моделирование детектора РЭД-100, алгоритм кластеризации

В рамках второго этапа работы было осуществлено знакомство со средой Geant. Данная среда предоставляет возможность создания моделей детекторов, состоящих из различных материалов и использующих различные электрические поля и симулирует поведение частиц в различных частях детектора (например, давая возможность оценить процент отсекаемого фона защитой). Так же GEANT позволяет отслеживать не только конечные частицы, но и промежуточные процессы и их параметры. С использовани-

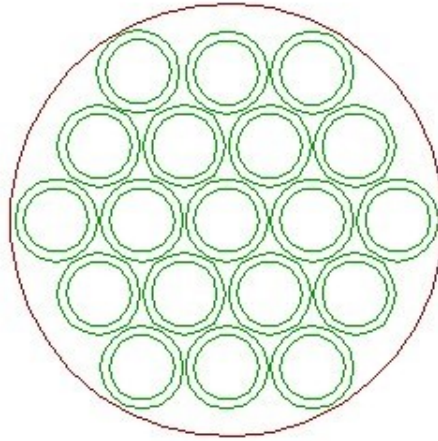


Рисунок 1 – Схема расположения ФЭУ в матрице (вид сверху)

ем данного программного пакета были смоделированы 3800 событий $0\nu\beta\beta$, анализ которых и производился в последующем. Особое место в данной научной работе занимает алгоритм кластеризации компьютерной симуляции безнейтринного два-бета распада. В отличие от написанного на первом этапе работы пространственного моделирования, использование пакета Geant4 позволяет максимально правдоподобно реализовать симуляцию процесса с учетом всех физических закономерностей и взаимодействий, которые оказывают влияние как на геометрию процесса, так и на процесс его идентификации самим детектором на основании данных о световыходе. Каждый гамма квант, испускаемый при 0-распаде некоторым образом реагирует с веществом детектора и теряет в этом всю свою первоначальную энергию, образуя различные частицы, в числе которых находятся регистрируемые матрицами ФЭУ фотоны. Таким образом, в реальности понимание физики процесса сводится к анализу последовательных энерговыделений гамма квантов. С этой целью в межкафедральной лаборатории экспериментальной ядерной физики был разработан алгоритм кластеризации. Сам алгоритм представляет из себя последовательность из нескольких шагов, позволяющих из информации о взаимодействиях, созданных генерацией ранее, посредством задания определенных, обусловленных физикой, ограничений организовать отбор энерговыделений по координатам и посред-

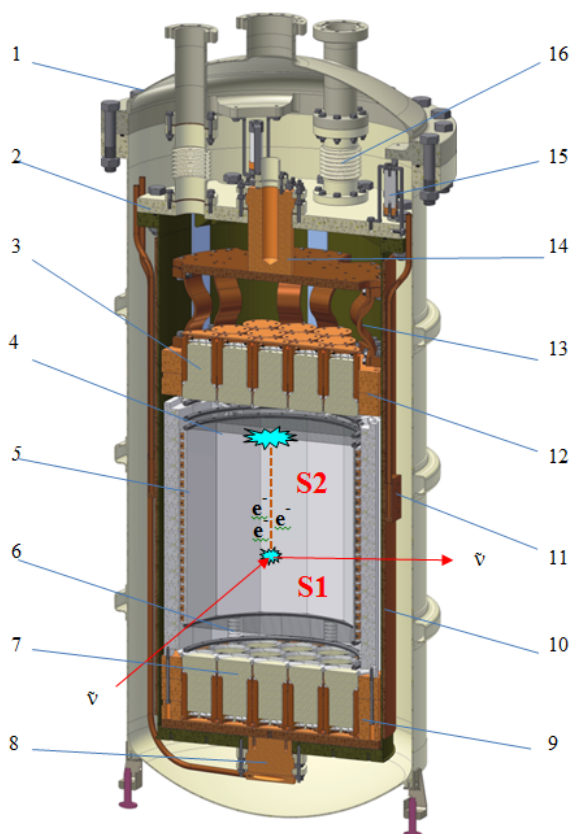


Рисунок 2 – Принцип работы и устройство детектора РЭД-100. 1 — внешний сосуд титанового криостата, 2 — внутренний сосуд титанового криостата, 3 — верхняя матрица из девятнадцати ФЭУ типа Hamamatsu R11410-20, 4 — сетчатый анод и электронный затвор, 5 — рабочий объем, окруженный тефлоновым отражателем со встроенными полезадающими электродами, 6 — сетчатый катод, 7 — нижняя матрица из девятнадцати ФЭУ, 8 — нижний центральный теплосъемник с термосифоном, 9 — медная обойма для нижней матрицы ФЭУ, 10 — медный кожух холодного сосуда криостата, 11 — один из двух боковых теплосъемников с термосифонами, 12 — медная обойма верхней матрицы ФЭУ, 13 — гибкий тепловой мост, 14 — верхний центральный теплосъемник с медным диском, на котором конденсируется ксенон, 15 — теплоизолирующий подвес, 16 — сильфонная тепловая развязка для вывода кабелей; e^- — электроны ионизации, $\bar{\nu}$ — антинейтрино, передающее энергию ядру отдачи, S1 — сцинтилляционная вспышка, S2 — электролюминесцентная вспышка.

ством последующих манипуляций получить на выходе список энергетических кластеров, с различными наблюдаемыми в ходе процесса характеристиками. На первом этапе происходит «грубое» деление на события – отбор энерговыделений по координатам (в чувствительном объёме детектора) и

их деление по временным интервалам Второй этап – это кластеризация событий - слияние близко располагающихся по времени и пространственной координате точечных энерговыделений или кластеров и выдача их эффективных характеристик, таких как: размеры, пространственное и временное расположение, энергия. Так же в алгоритм кластеризации входит отсеечение событий со слишком малой энергией, т.е., таких, которые не могут быть зарегистрированы в реальном детекторе или их регистрация для конкретной задачи не представляет интерес.

2 Моделирование фоновых событий для эксперимента на КАЭС

Важным этапом любого эксперимента в ядерной физике является идентификация и анализ фоновых сигналов, которые неминуемым образом возникают в процессе набора данных. Так была поставлена задача моделирования фоновых сигналов для эксперимента на Калининской АЭС. В рамках этой задачи были выделены основные источники радиоактивных распадов, коими явились: бетон здания реактора ($K40$, $Th232$, $U238$), криостат детектора ($Th232$, $U238$) и два медных держателя ФЭУ ($Th232$, $U238$). Ввиду большого объема бетона в стенах здания и ограничений располагаемых вычислительных мощностей, прямое моделирование радиоактивных распадов соответствующих изотопов не представляется возможным. 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 доживают лишь гамма-кванты. В рамках исследования фоновых сигналов для модели с ксеноном сотрудниками РЭД-100 уже был произведен анализ угловых и энергетических распределений этих гамма-квантов и их идея состояла 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 выступила поверхность водной за-

щиты – цилиндрического бака (далее «внешний цилиндр»), окружающего детектор во время сеанса на реакторе. Значительно ускоренную процедуру все еще нельзя было стабильно применять для генерации длительных периодов времени (анализ которых и представляет первоначальный интерес), потому идейным продолжением этого упрощения стал «внутренний цилиндр». Все также симметричная поверхность 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 ожидаемых спектров от полученных, масштаб которого лежит в пределах допустимого в рамках моего исследования.

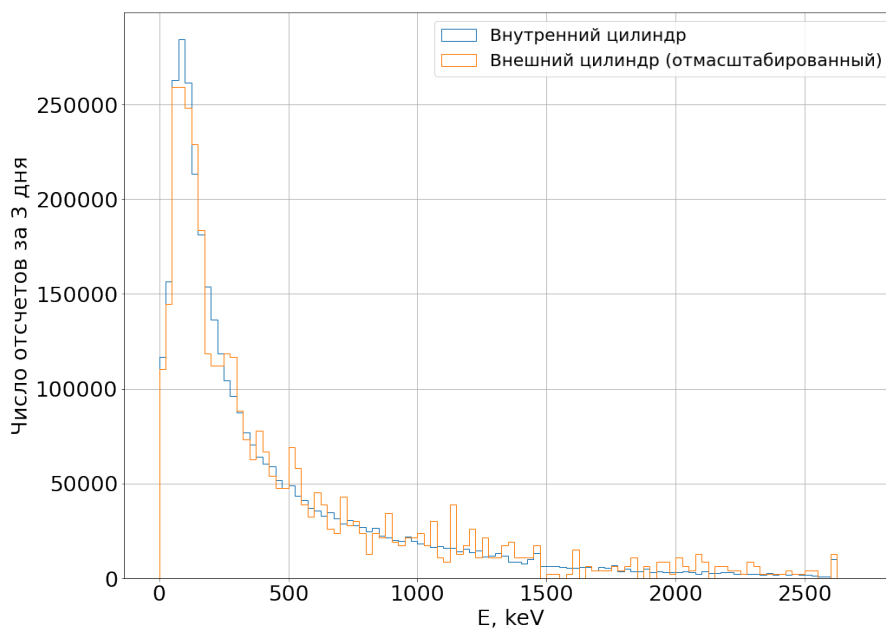


Рисунок 3 – Энергетические спектры для внутреннего и внешнего цилиндров в аргоновой модели

После замены вещества детектирующей фазы на аргон в GEANT-модели детектора, мною было воспроизведено моделирование гамма-квантов с внешнего (2 минуты фона, отмасштабированные на 3 суток живого времени для проверки спектров) и внутреннего (3 суток фона, рис 3) цилиндров как «имитация» фонов от бетона. Аналогичные процедуры были проделаны и для модели детектора с ксеноном (рис. 4), общий график фоновых

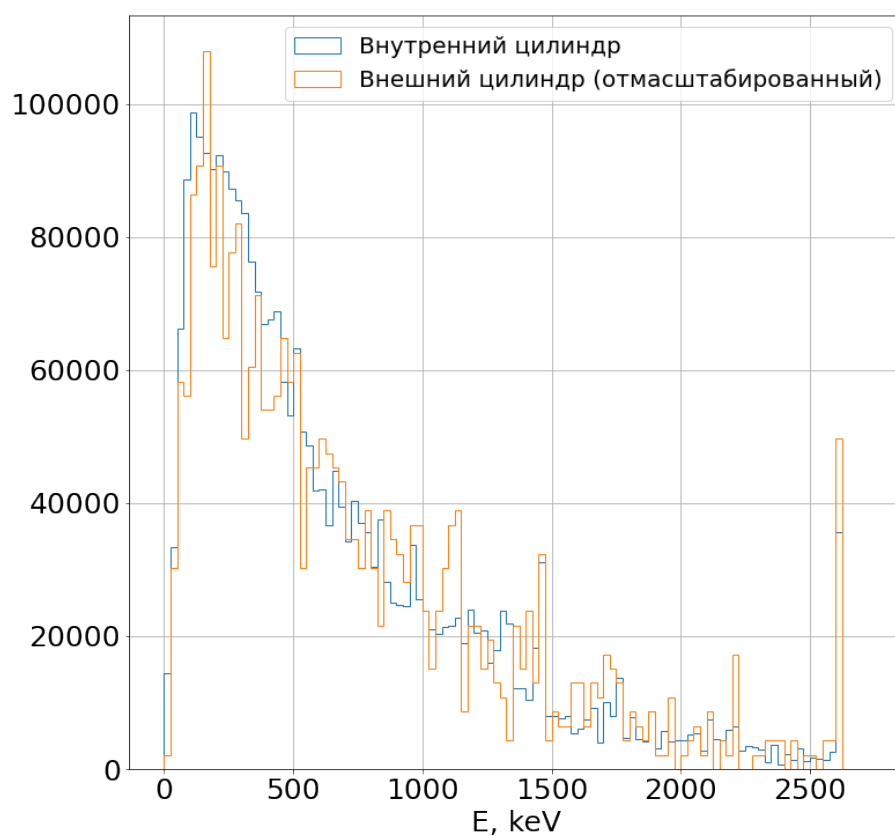


Рисунок 4 – Энергетические спектры для внутреннего и внешнего цилиндров в ксеноновой модели

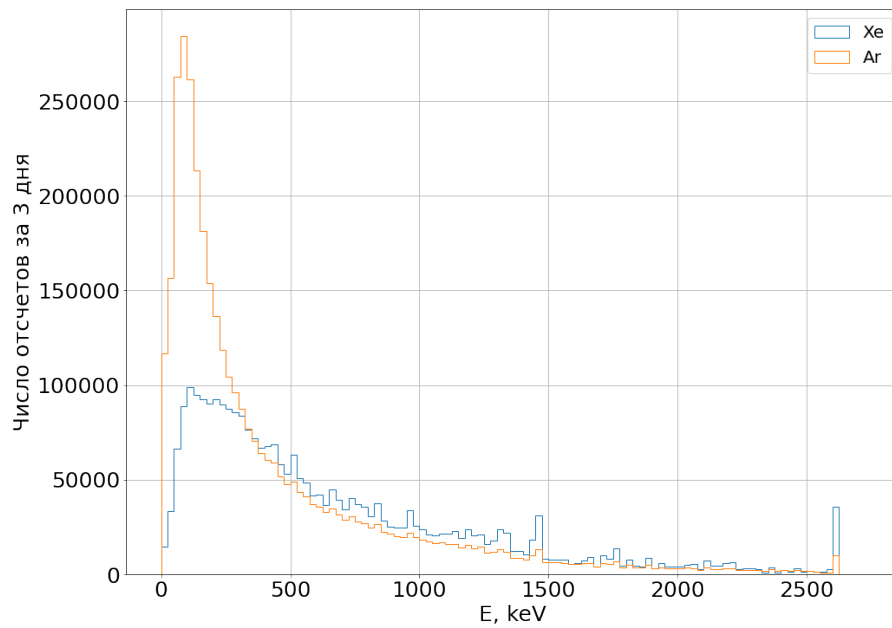


Рисунок 5 — Энергетические спектры для внутреннего цилиндра в аргоновой и ксеноновых моделях (общий график)

энергетических спектров в ксеноне и аргоне с внутреннего цилиндра представлен на рис. 5. 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.

3 Моделирование нестандартных взаимодействий в детекторе РЭД-100

3.1 $0\nu\beta\beta$ -распад

Двойной бета-распад или двухнейтринный двойной бета-распад ($2\nu\beta\beta$ -распад) был впервые предсказан Марией Гёпперт-Майер в 1935 году в работе[1]. Пара протонов одновременно претерпевает β -распад, испуская два электрона и два антинейтрино (рис. 6):

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + 2\nu^-$$

Через два года, в 1937 году, Этторе Майорана выдвинул предположение о неразличимости нейтрино и антинейтрино и в 1939 году Вендел Фьюрри предложил вариант безнейтринного двойного бета-распада с виртуальными нейтрино ($0\nu\beta\beta$ -распад) (рис. 7):

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + e^- + e^-$$

или:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z - 2) + e^+ + e^+$$

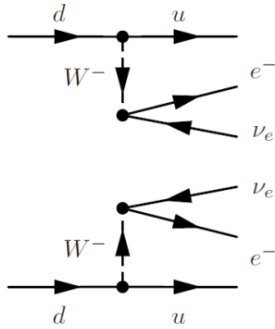


Рисунок 6 – Диаграмма Фейнмана для $2\nu\beta\beta$ -распада.

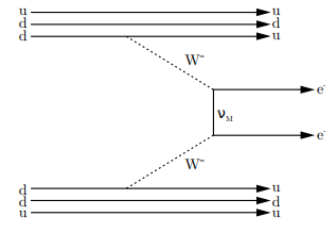


Рисунок 7 – Диаграмма Фейнмана для $0\nu\beta\beta$ -распада.

В случае безнейтринного двойного бета-распада нейтрино является виртуальной частицей, появляющейся только в промежуточном состоянии ядра. Поэтому энергия нейтрино ограничивается лишь условием, чтобы его волновая функция не была знакопеременной внутри ядра — иначе вклад

собственного промежуточного состояния в матричный элемент и вероятность перехода стремятся к нулю. Это условие ограничивает энергию нейтрино в промежуточном состоянии до величины порядка 40 МэВ (для средних ядер). Последняя величина во много раз превышает энергию нейтрино, возможную при двухнейтринном распаде – следовательно, фазовый объем промежуточного состояния при таком событии больше и вероятность распада выше [4].

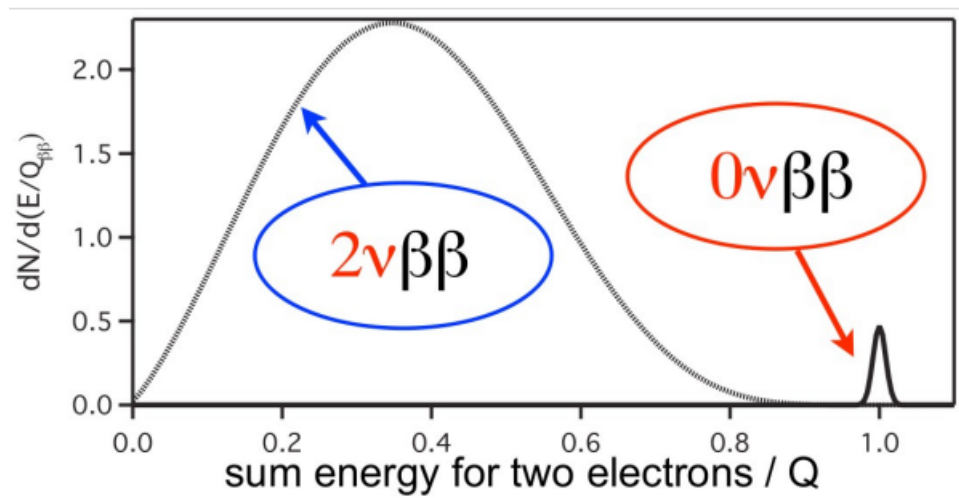


Рисунок 8 – сравнительные энергетические спектры $2\nu\beta\beta$ и $0\nu\beta\beta$ распадов ($Q_{\beta\beta} \sim 2\text{-}3$ МэВ)

Проведенный в 1955 году эксперимент американского химика Рэймонда Дэвиса по поиску антинейтрино в реакции $\bar{\nu}_e + {}_{37}\text{Cl} \rightarrow {}_{37}\text{Ar} + e^-$, там его не обнаружил, что послужило основанием полагать, что нейтрино не майорановская, а дираковская частица. После открытия нарушения Р-четности на эксперименте группы Ву (1957 г.), где была установлена асимметрия углового распределения вылетающих β -частиц при распаде ядер ${}_{60}\text{Co}$, была сформулирована теория двухкомпонентного нейтрино, в которой оно описывается двухкомпонентными волновыми функциями, представляющими собой решение уравнения Дирака для частиц с нулевой массой. Согласно данной теории, существуют только левое и правое антинейтрино, что в свою очередь приводит к несохранению чётности, так как инверсия переводит нейтрино в несуществующее состояние. Тогда же эта теория была подтверждена экспериментально. Помимо выше обозначенных мод распада, для 0

в калибровочных теориях допускается существование майорановой моды (с безмассовым голдстоуновским бозоном, возникающим при глобальном нарушении В-Л симметрии) он же $0\nu\chi 2\beta$ -распад.

3.2 Магнитный момент нейтрино

Существование у нейтрино массы влечет за собой и наличие 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. Образовавшиеся виртуальные частицы взаимодействуют с внешним электрическим полем (рис. 2), 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.

3.3 Эксперименты по поиску $0\nu\beta\beta$ -распада и исследованию магнитного момента нейтрино

Опровержение Стандартной Модели продолжает привлекать внимание ученых со всего мира. На сегодняшний день существует множество коллабораций, занимающихся поиском $0\nu\beta\beta$ -распада, например:

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 [5]. 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 жидкого сцинтиллятора (10 нс) можно распознать фоновое гамма излучение по форме сигнала. $T_{\frac{1}{2}} > 5.6 \times 10$ лет.[5]

2. Эксперимент GERDA (The GERmanium Detector Array), использующий высокочистые германиевые детекторы в качестве и рабочего вещества, и источника (обогащенный ^{76}Ge)[6]. Дополнительной защитой служат резервуары с жидким аргоном и резервуар с дистиллированной водой, которые работают как активная и пассивная защита. Подобный метод отсеечения фона показал крайне высокую эффективность по сравнению с другими экспериментами подобного класса (например, Гейдельберг-Москва). Полученный финальный предел: $T_{\frac{1}{2}} > 1.8 \times 10^{26}$ лет.

3. Эксперимент KAMLand-Zen (The KAmioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector), использующий в качестве рабочего вещества жидкий сцинтиллятор, а в качестве источника - изотоп ксенона ^{136}Xe , растворённый в нём. В качестве дополнительной активной защиты используется 1000-тонный резервуар с жидким органическим сцинтиллятором, который так

же просматривается ФЭУ. Полученный результат: $T_{\frac{1}{2}} > 1.9 \times 10^{25}$ лет.[7]

4. 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, размером 100 см x 80 см x 75 см (рисунок) полностью окружено экранирующими панелями общим весом порядка 50 тон. Защитные слои включают в себя такие 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[8]
Полученное ограничение: $\mu_{\nu_e} < 7.4 \cdot 10^{-11} \mu_B$

5. 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[9]. 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: $\mu_{\nu}^{eff} < 3.9 \cdot 10^{-11} \mu_B$ [9]

6. Эксперимент Super-Kamiokande.

Нейтринный черенковский детектор, являющийся модернизацией и идейным последователем Kamiokande-II, расположен в префектуре Гифу, Японии. Конструкция представляет из себя водный бак, заполненный 50000 тоннами воды, просматриваемый 13000 ФЭУ[10].

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

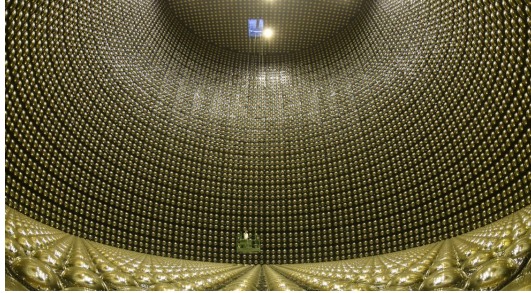


Рисунок 9 – Детектор Super-Kamiokande (вид изнутри)

3.4 Моделирование и результаты

На первом этапе работы, после ознакомления с теоретическим минимумом была написана программа упрощенного пространственного моделирования процесса внутри цилиндрического объема на языке программирования Python. Такая особенность позитронного 0-распада, как распределение возникающих при аннигиляции нейтрино четырех гамма-квантов внутри окружности радиуса 11 см (рис. 10), позволяет в упрощенной форме уместить геометрию события генерацией пяти точек: центральной – символизирующую точку инициализации распада и четырех, расположенных вокруг оной внутри окружности, попарно по разные стороны от центра.

Последнее условие обеспечивается помещением точек на две прямые, проходящие через центр окружности. Как можно заметить, расположены точки будут на одной плоскости. Добавление сгенерированных законом нормального распределения ошибок по оси z позволяет создать некоторый разброс в координатах точек, создавая пространство для приближения (в рамках функционала программы) созданной генерации к реальности отклонения частиц относительно первоначальной траектории в результа-

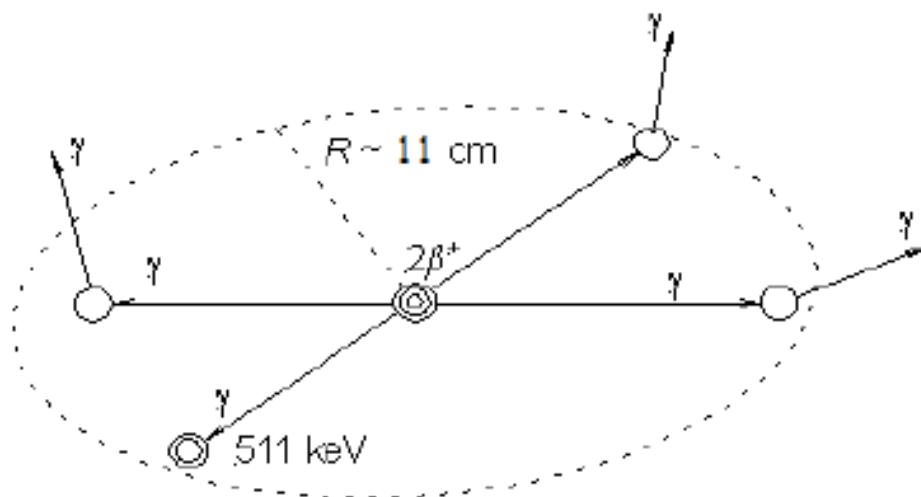


Рисунок 10 – Схематическое изображение события позитронного двойного бета-распада в детекторе, заполненном жидким ксеноном.

те взаимодействия с веществом детектора. Внутри кода программы также был реализован алгоритм фитирования созданных точек плоскостью с последующей визуализацией в виде полноценной трехмерной картины (рис. 11)

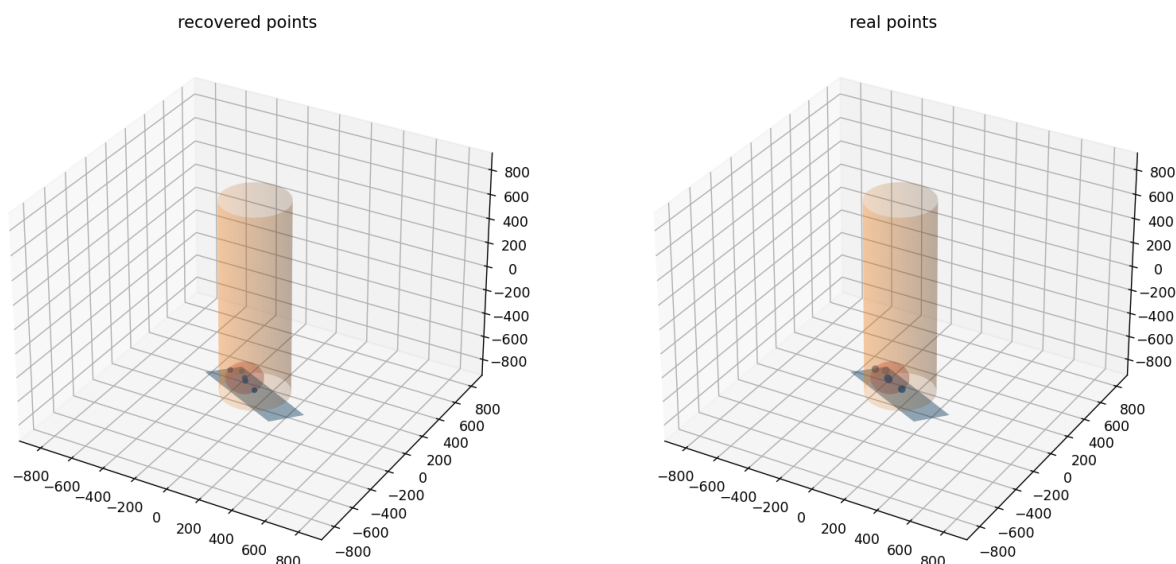


Рисунок 11 – Схематическое изображение события позитронного двойного бета-распада в детекторе, заполненном жидким ксеноном.

Введение кластеризации вызвано несколькими причинами: - С точки зрения постановки эксперимента различимость некоторых энергосвечиваний не является важной (к примеру, при взаимодействии гамма-кванта с атомом нет необходимости различать Оже-электроны); - Конечное энергетическое, временное и пространственное разрешение детектора и его ограниченный рабочий энергетический диапазон. Третий этап необходим для отслеживания параметров (времени, координаты, энергии, типа частицы) отдельных кластеров и события в детекторе. Четвертым этапом является генерация и получения списка кластеров для генерации в дальнейшем сцинтилляционных сигналов в детекторе. После генерации 3800 событий ДБПБР, была произведена их обработка с использованием вышеописанного алгоритма. Далее, из полученных данных были отобраны события, удовлетворяющие искомому пространственному распределению. Для сравнения было смоделировано 2000 точек, случайным образом распределенных внутри сферы радиуса 11 см. Для обоих наборов данных, с использованием алгоритма фитирования точек плоскостью, был произведен вторичный анализ пространственного распределения. Результаты представлены на рис. 12. Как видно из гистограмм, средние значения и их форма имеют заметные различия.

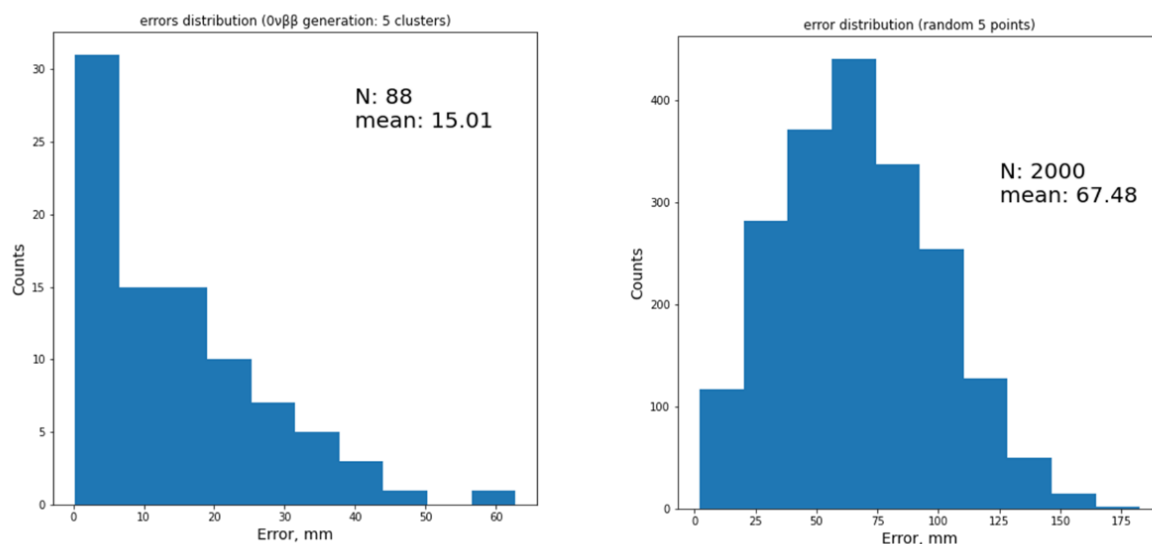


Рисунок 12 – Распределение средних значений ошибки при фитировании координат кластеров плоскостью (слева). Распределение средних значений ошибки при фитировании плоскостью координат пяти точек, случайно сгенерированных внутри сферы радиуса 11 см (справа), где N – число событий.

Также для отобранных из geant-моделирования событий было построено распределение по энергиям кластеров, а также их отклонения от среднего (511 keV) внутри события (рис. 13)

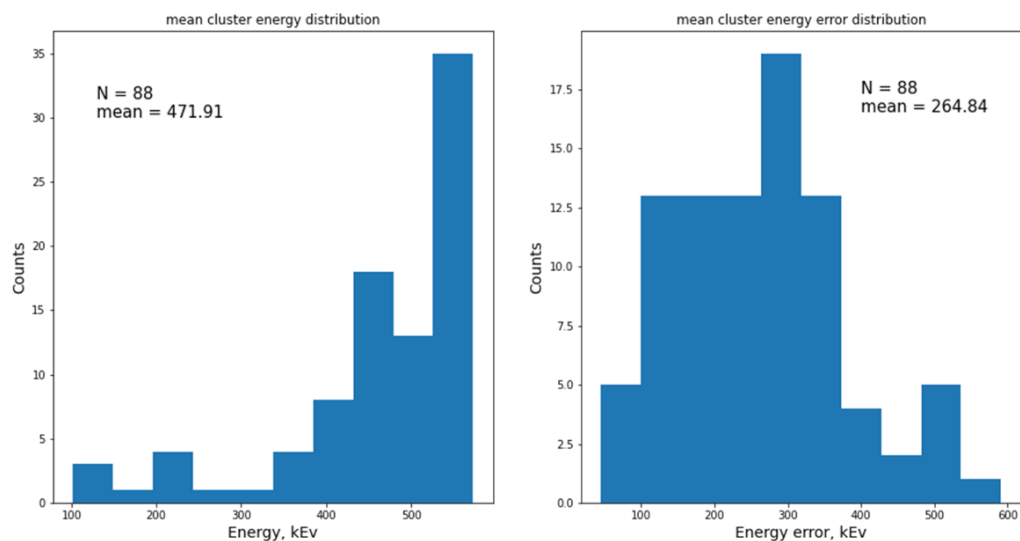


Рисунок 13 – Распределение средних значений энергии кластеров по каждому событию (слева). Распределение значений отклонения значений энергии кластеров от среднего по каждому событию (справа).

4 Заключение

В рамках научно-исследовательской работы в 8 семестре:

- Изучена процедура полной цепочки моделирования событий в детекторе РЭД-100 (как на ксеноне, так и на аргоне)
- В модели РЭД-100 в GEANT-4 произведена замена рабочего вещества на аргон
- Произведена модификация процедуры кластеризации соответствующая замене рабочего вещества
- Проведено моделирование выделения энергии от внешних фонов в детекторе РЭД-100
- Реализована процедура расчета потерь электронов ионизации при дрейфе и экстракции
- Проводится моделирование различных процессов, соответствующих взаимодействиям за пределами СМ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Prospects for observation of neutrino-nuclear neutral current coherent scattering with two-phase Xenon emission detector / D. Y. Akimov [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2013. — Oct. — Vol. 8, no. 10. — P10023–P10023.
- 2 The RED-100 two-phase emission detector / D. Y. Akimov [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. — 2017. — Mar. — Vol. 60, no. 2. — P. 175–181. — ISSN 1608-3180.
- 3 Status of the RED-100 experiment / D. Akimov, A. Berdnikova, V. Belov, [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2017. — June. — No. 12.
- 4 *Lazarenko V. R.* DOUBLE BETA DECAY AND THE PROPERTIES OF THE NEUTRINO // Soviet Physics Uspekhi. — 1967. — ИЮНЬ. — Т. 9, № 6. — С. 860.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 *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>.

- 9 The Main Results of the Borexino Experiment / A. Derbin [и др.]. — 2016. — arXiv: 1605.06795 [hep-ex]. — URL: <https://arxiv.org/abs/1605.06795>.
- 10 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.