

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

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ
БЕЗНЕЙТРИННОГО ДВОЙНОГО БЕТА-РАСПАДА В
ДЕТЕКТОРЕ РЭД-100**

Научный руководитель

Разуваева О. Е.

Студент

Коськин Ю. И.

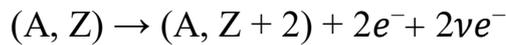
Москва 2023

СОДЕРЖАНИЕ

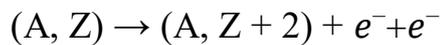
Введение.....	3
Детектор РЭД-100.....	4
Моделирование геометрии события и пути ее восстановления.....	6
Алгоритм кластеризации.....	8
Программа Ants2.....	9
Заключение.....	11
Список литературы.....	13

ВВЕДЕНИЕ

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:



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):



или:



Фейнмановские диаграммы соответствующих процессов приведены на рис. 1 и рис.2

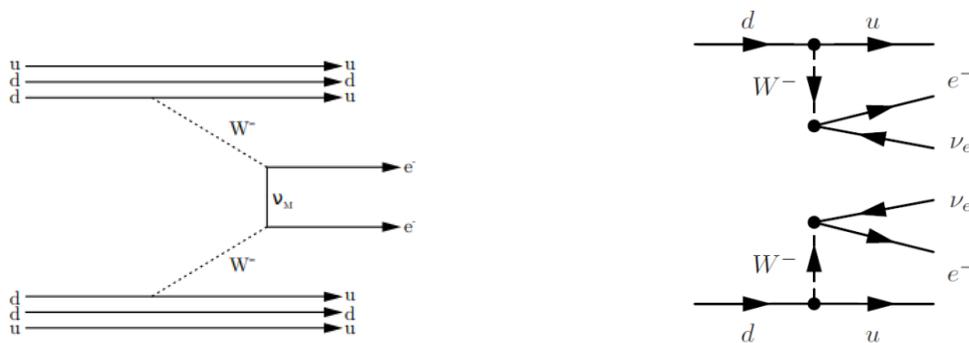


Рисунок 1 (слева) – Диаграмма Фейнмана для $0\nu\beta\beta$ -распада.

Рисунок 2 (справа) – Диаграмма Фейнмана для $2\nu\beta\beta$ -распада.

В рамках проделанной научной исследовательской работы был рассмотрен

принцип процесса, его теоретическое обоснование и история его исследования.

Детектор РЭД-100

РЭД-100 представляет собой двухфазный эмиссионный детектор (рис. 4) на жидком ксеноне. 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).[2]

При взаимодействии элементарной частицы с ксеноном испускаются фотоны сцинтилляции (S1) и электроны ионизации [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.

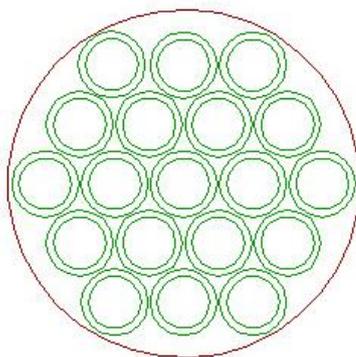


Рисунок 3 – Схема расположения ФЭУ в матрице (вид сверху)

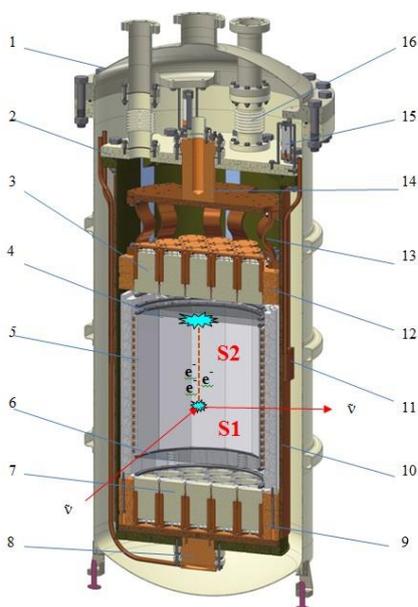


Рисунок 4 – Принцип работы и устройство детектора РЭД-100.

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 теплоъемников с термосифонами, 12 медная обойма верхней матрицы ФЭУ, 13 гибкий тепловой мост, 14 верхний центральный теплоъемник с медным диском, на котором конденсируется ксенон, 15 теплоизолирующий подвес, 16 сильфонная тепловая развязка для вывода кабелей; e^- электроны ионизации, ν антинейтрино, передающее энергию ядру отдачи, S1 - сцинтилляционная вспышка, S2 - электролюминесцентная вспышка.

Моделирование геометрии события и пути ее восстановления

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 $0\nu\beta\beta$ -распада, как распределение возникающих при аннигиляции нейтрино четырех гамма-квантов внутри окружности радиуса ~ 11 см (рис. 5), позволяет в упрощенной форме уместить геометрию события генерацией пяти точек: центральной – символизирующую точку инициализации распада и четырех, расположенных вокруг одной внутри окружности, попарно по разные стороны от центра.

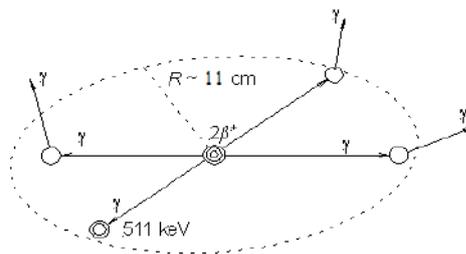


Рисунок 5 – Схематическое изображение события позитронного двойного бета-распада в детекторе, заполненном жидким ксеноном.

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 результате взаимодействия с веществом детектора.

Внутри кода программы также был реализован алгоритм фитирования созданных точек плоскостью с последующей визуализацией в виде полноценной трехмерной картины (рис. 6)

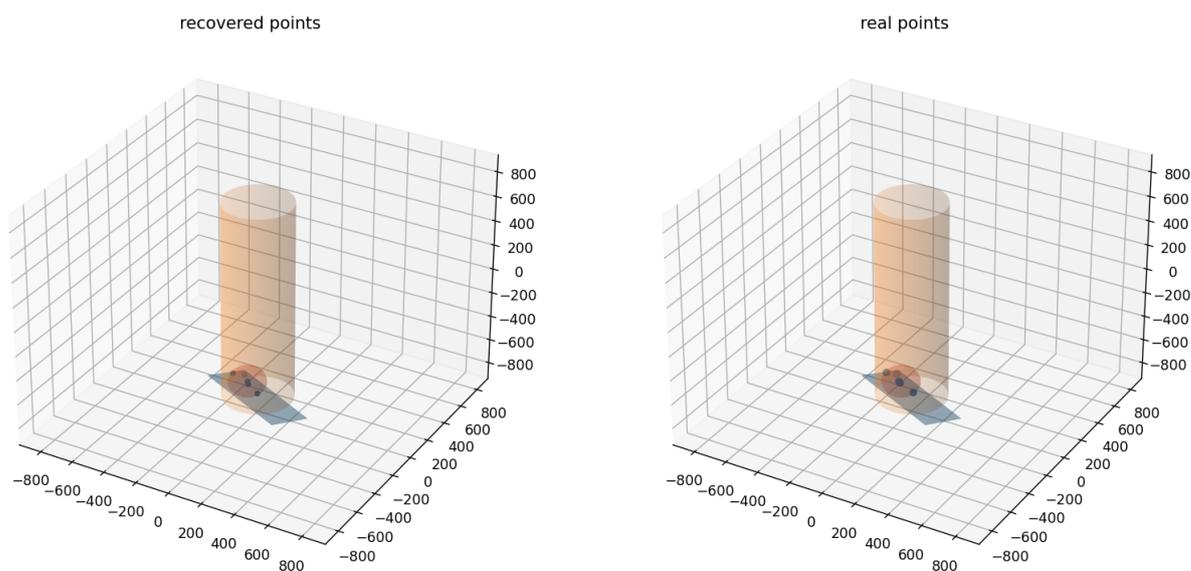


Рисунок 6 – Визуализация результата работы программы моделирования точек на плоскости.

Алгоритм кластеризации

В рамках второго этапа работы было осуществлено знакомство со средой Geant4, задание конфигурации детектора внутри нее, реализацией необходимой физики и алгоритмами генерации различных физических процессов на языке программирования C++. Особое место в моей научной работе занимает алгоритм кластеризации созданной машиной 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 $0\nu\beta\beta$ -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 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 посредством 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 [4]

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 отсечение 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.

Введение кластеризации вызвано несколькими причинами:

- С точки зрения постановки эксперимента различимость некоторых энерговыделений 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.

Программа Ants2

Для пространственного моделирования световыходов и исследования регистрации фотоумножителями фотонов при различных условиях в работе

используется программа Ants2. Функционал приложения позволяет задать геометрию детектора с применением различных материалов (рис. 7) и влиянием их физических свойств на движение фотонов в рамках эксперимента.

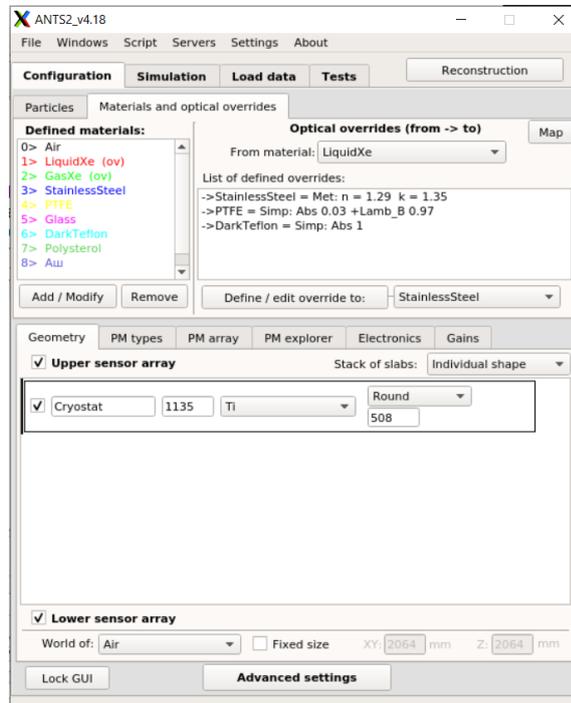


Рисунок 7 – Интерфейс задания структуры детектора в программе Ants2.

С помощью настройки различных параметров генерации фотонов, например: координата генерации, первичная/вторичная сцинтилляция, количество фотонов на событие и т.д., можно исследовать модель реакции ФЭУ на различные события в детекторе. (рис. 8).

После генерации и сохранения событий в root файл их можно реконструировать, например, с использованием алгоритма пересекающихся сеток (contracting grids). Для осуществления этой процедуры есть опция загрузки lrf (light response function), которая отражает вероятность регистрации конкретным ФЭУ фотона в зависимости от расстояния от центра первого до точки возникновения второго (в плоскости XY). Наличие этих функций возможно после обработки экспериментальных данных с детектора,

или посчитанные программой на основе сгенерированных ею же событий.

На выходе получается файл, содержащий информацию о восстановлении фотонов по известным lrf. На этапе ознакомления с алгоритмом работы пакета и координатного восстановления в принципе, было осуществлено измерение точности восстановления, график зависимости реконструированного квадрата радиуса от известного нам моделированного значения прилагается (рис. 9).

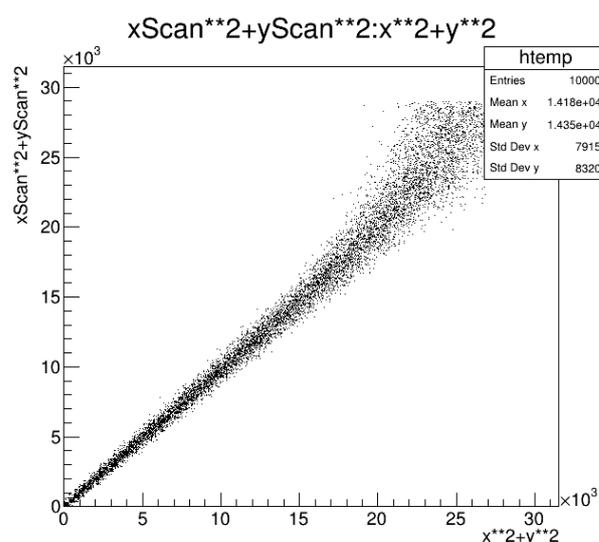
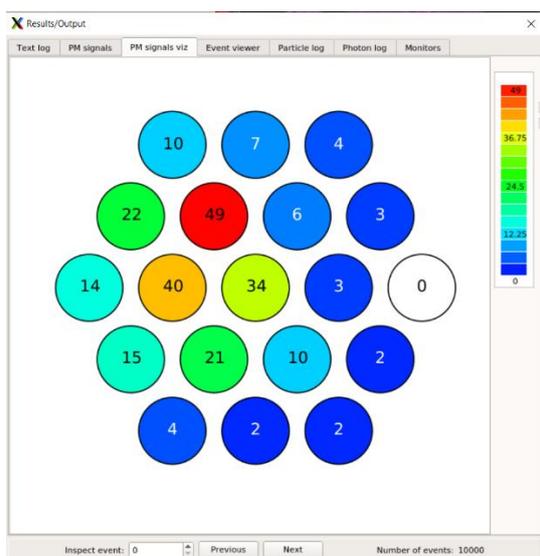


Рисунок 8 (слева) – Визуализация результатов моделирования 10000 событий в программе Ants2. Числа в окружностях – количество зарегистрированных фотонов каждым ФЭУ в матрице соответственно.

Рисунок 9 (справа) – График зависимости восстановленной координаты событий от известной при генерации координаты.

Заключение

В рамках научно-исследовательской работы в 5 семестре было произведено ознакомление с детектором РЭД-100, исследованы общие принципы работы

и техническая структура. Изучена общая информация об исследуемом процессе двойного безнейтринного бета-распада, написана программа упрощенного геометрического моделирования распада на языке программирования Python. Приобретены навыки работы с программой кластеризации безнейтринного двойного бета-распада, программными пакетами Geant4 и Ants2. В дальнейшем планируется работа над модифицированием алгоритма кластеризации и более подробное изучение процесса безнейтринного двойного бета-распада.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] M. Goeppert-Mayer. Double Beta Disintegration/M. Goeppert-Mayer//Phys. Rev., vol. 48, p. 512, 1035.
- [2] Noble Gas Detectors / E. Aprile [et al.]. | Wiley-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, Weinheim, 10/2006.
- [3] Разуваева О. Е. Выпускная квалификационная работа магистра // Москва, 2019
- [4] Козлова Е. С. Выпускная квалификационная работа магистра // Москва, 2018