

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

УДК 539.1

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДРЕЙФА ЭЛЕКТРОНОВ В  
ДЕТЕКТОРЕ РЭД-100

Научный руководитель  
(Старший преподаватель)

\_\_\_\_\_ И. Н. Мачулин

Научный консультант  
(к.ф.-м.н)

\_\_\_\_\_ Г. Д. Долганов

Студент

\_\_\_\_\_ Д. А. Кораблев

Москва 2024

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Эксперимент РЭД-100</b>	<b>4</b>
1.1 Конфигурация эксперимента . . . . .	4
1.2 Принцип регистрации . . . . .	5
<b>2 Моделирование дрейфа электронов</b>	<b>7</b>
2.1 Выбор геометрии . . . . .	7
2.2 Расчет электрического поля . . . . .	9
2.3 Моделирование дрейфа электрона . . . . .	10
<b>3 Результаты моделирования</b>	<b>11</b>
3.1 Анализ времени дрейфа . . . . .	11
<b>4 Заключение</b>	<b>16</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>17</b>

# ВВЕДЕНИЕ

В современной физике элементарных частиц одной из важнейших задач является исследование свойств нейтрино. Особый интерес представляет процесс когерентного упругого рассеяния нейтрино на атомных ядрах (CE $\nu$ NS) [1]. Это явление, при котором нейтрино низких энергий взаимодействует не с отдельными нуклонами, а со всем ядром целиком. Сечение такого взаимодействия имеет порядок  $10^{-38}$  см<sup>2</sup>, что позволяет рассматривать данный процесс как альтернативный способ детектирования нейтрино [2].

Однако регистрация таких событий — довольно сложная задача из-за малой энергии отдачи ядра. Для этого требуются детекторы с предельно низкой чувствительностью к фоновому сигналу и высоким энергетическим разрешением. Одними из возможных типов детекторов для регистрации данных событий являются двухфазные эмиссионные детекторы на благородных газах.

Ключевой фактор, определяющий качество работы такого детектора, — это то, насколько эффективно и точно мы можем собрать ионизационный заряд, образовавшийся при взаимодействии частицы. Электроны должны дрейфовать через часть детектора, заполненную веществом в жидкой фазе, затем выйти в газовую область и создать световой сигнал. Для того, чтобы корректно реконструировать события, необходимо получать предсказуемые результаты. Любые искажения электрического поля на этом пути могут привести к потере или неоднородности светового сигнала или ошибкам в определении координат события.

По этой причине этап моделирования электронного дрейфа в рабочей области детектора является ключевым для анализа формирования выходного сигнала. В рамках данной работы проводилось моделирование дрейфа электронов в газовой фазе для того чтобы определить влияние неоднородности поля вблизи анодной сетки.

# 1. ЭКСПЕРИМЕНТ РЭД-100

Эксперимент **РЭД-100** [3] — это двухфазный эмиссионный детектор, нацеленный на распознавание  $\text{CE}\nu\text{NS}$ .

## 1.1 Конфигурация эксперимента

Установка РЭД-100 располагалась в непосредственной близости от активной зоны реактора ВВЭР-1000 на Калининской АЭС. Дело в том, что реактор является мощным источником антинейтрино, что позволяет компенсировать редкость взаимодействия нейтрино с веществом большим потоком частиц.

Сам детектор — это большой криостат (Рисунок 1), внутри которого находится благородный газ в жидком и газообразном состоянии. В начальной версии это был ксенон, но сейчас используется аргон, так как он дешевле и обладает большей энергией отдачи ядра. Масса активного вещества составляет около 100 кг.

Чтобы внешний фон не вносил вклад в измерения, детектор окружен защитой: 5 сантиметров меди и более полуметра воды.

## Нейтринный детектор РЭД-100

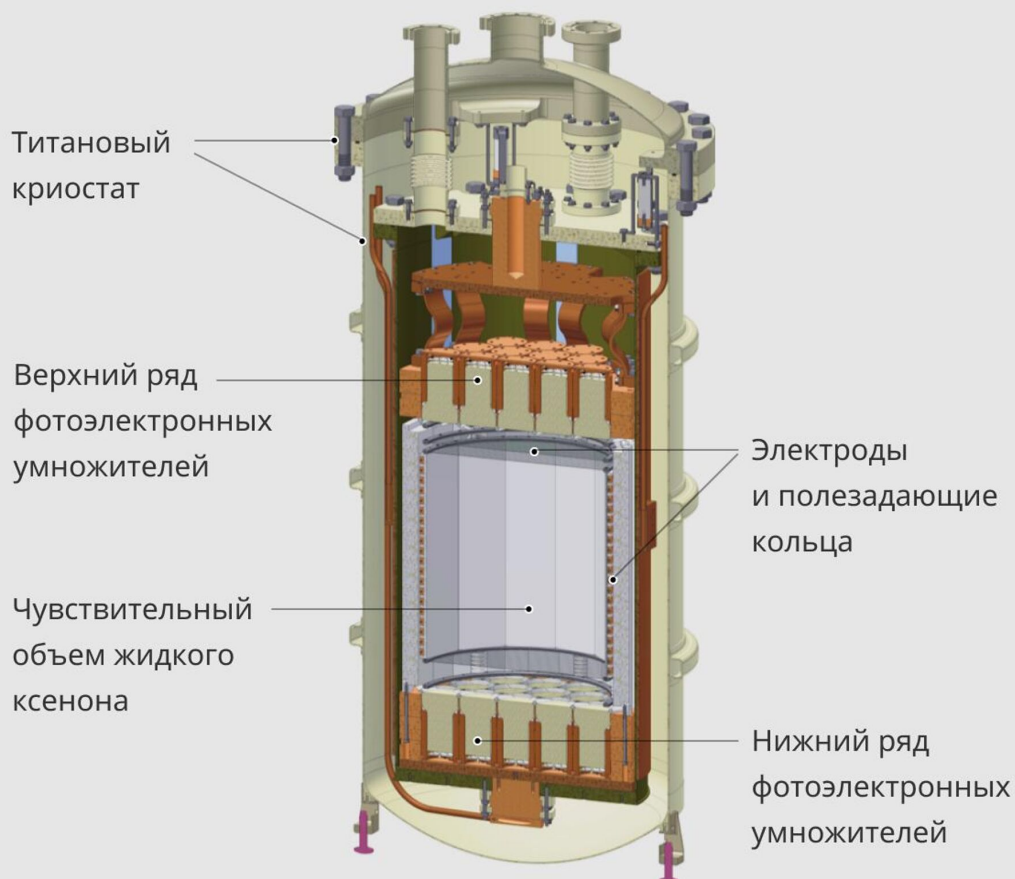


Рисунок 1 — Конструкция детектора RED-100

### 1.2 Принцип регистрации

Работает детектор по следующему принципу:

1. Когда частица взаимодействует с жидким аргоном, происходит вспышка света (сцинтилляция) — это сигнал **S1**. Одновременно с этим выбиваются электроны ионизации.
2. Эти электроны не исчезают, а подхватываются электрическим полем и начинают двигаться вверх, к поверхности жидкости.
3. Достигнув поверхности, они вылетают в газовую область над жидкостью. Там из-за движения заряженных частиц происходит электролюминесценция. Это второй, гораздо более мощный сигнал — **S2**.

Оба сигнала детектируются специальными фотодатчиками (ФЭУ), расположенными сверху и снизу в объеме детектора. По задержке между первым и вторым сигналом можно опеределить глубину события (координату  $Z$ ), а по распределению света на датчиках — точку в плоскости ( $X$  и  $Y$ ).

Для создания нужных полей внутри детектора натянуты сетки (электроды): катод внизу, анод вверху и специальные гейты. Структура этих сеток определяет конфигурацию электронного поля внутри РЭД-100, а однородность электрического поля достигается засчет колец под напряжением, окружающих дрейфовый объем вещества.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДРЕЙФА ЭЛЕКТРОНОВ

Для моделирования дрейфа электронов внутри детектора РЭД-100 был выбран пакет Garfield C++ - это объектно-ориентированный программный инструмент для детального моделирования детекторов частиц, регистрирующих ионизацию в газовых и полупроводниковых средах. Пакет представляет собой развитие оригинального кода Garfield, переписанного на языке C++. Он удобен тем, что позволяет интуитивно работать с электрическими полями и физикой частиц в газовых областях.

Чтобы понять, что происходит с электронами внутри детектора, была построена упрощенная модель части детектора РЭД-100. Оптимизация модели требовалась, чтобы собрать достаточное количество статистики для моделирования, что занимает достаточно долгое время для имеющейся модели из предыдущей работы.

### 2.1 Выбор геометрии

Электроды в РЭД-100 — это не сплошные пластины, а сетки с шестиугольными звеньями. Считать поле сразу во всем детекторе занимает много времени. Поэтому было выбрано одно повторяющееся звено сетки.

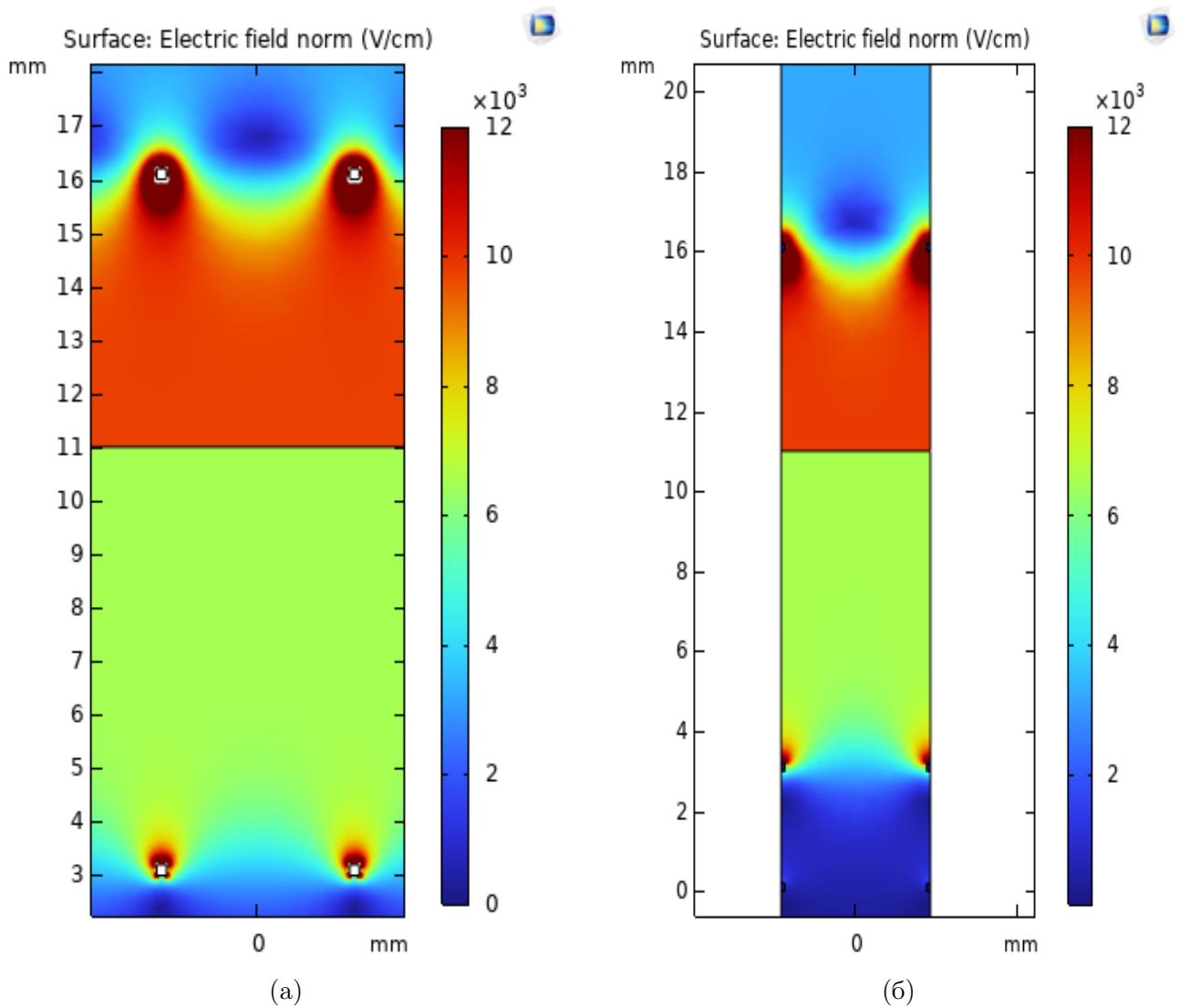


Рисунок 2 — Пример электрического поля вблизи сетки: (а) изначальная конфигурация; (б) оптимизированная конфигурация.

На Рисунке 2 можно заметить, что поле в изначальной модели совпадает с полем в оптимизированной модели с условием периодичности. Это позволило создать геометрию с меньшим числом расчетных параметров, но с той же точностью моделирования.



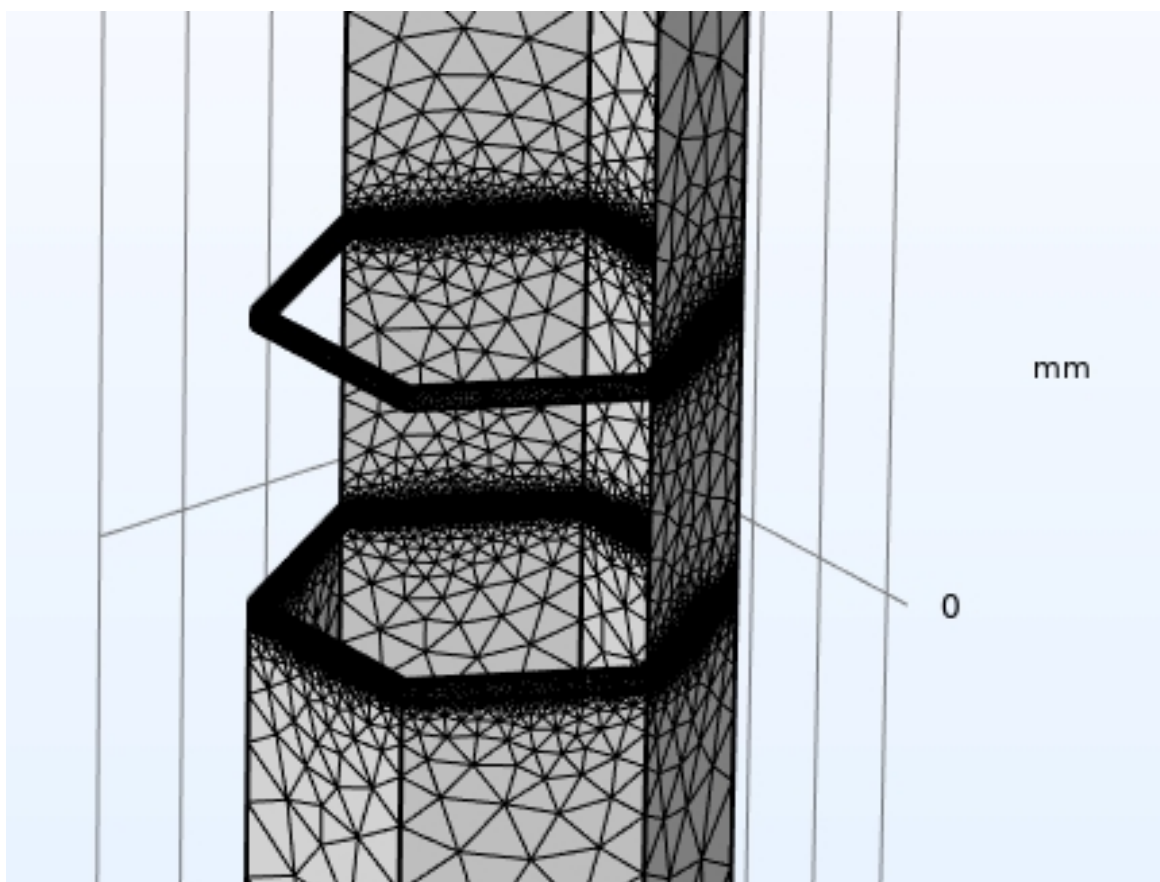


Рисунок 3 — Геометрия моделируемой области.

## 2.2 Расчет электрического поля

Первый этап — это расчет электрического поля в объеме детектора. Для этого использовалась программа **COMSOL Multiphysics**. В данном ПО была задана геометрия моделируемой области (шестиугольная призма) и реальные физические параметры детектора РЭД-100.

Таблица 1 — Изначальные параметры модели для симуляции электрического поля

Параметр	Значение
Расстояние между гейтами	3 мм
Расстояние от верхнего гейта до анода	16 мм
Расстояние от анода до земли	20 мм
Расстояние от нижнего гейта до катода	415 мм
Уровень жидкого аргона над гейтом	8 мм
Напряжение на аноде	7000 В
Напряжение на гейтах	-4000 В
Напряжение катоде	-13000 В

На выходе были получены значения электрического поля во всех точках моделиру-

емой области, что в дальнейшем позволило провести ручное моделирование.

## 2.3 Моделирование дрейфа электрона

Зная поле, можно задать движение электронов в объеме детектора. Для точного моделирования дрейфа нужно знать, как электрон ведет себя в газовой области детектора. Параметры дрейфа электрона были получены с помощью дополнительного расширения **Magboltz** для инструмента Garfield C++.

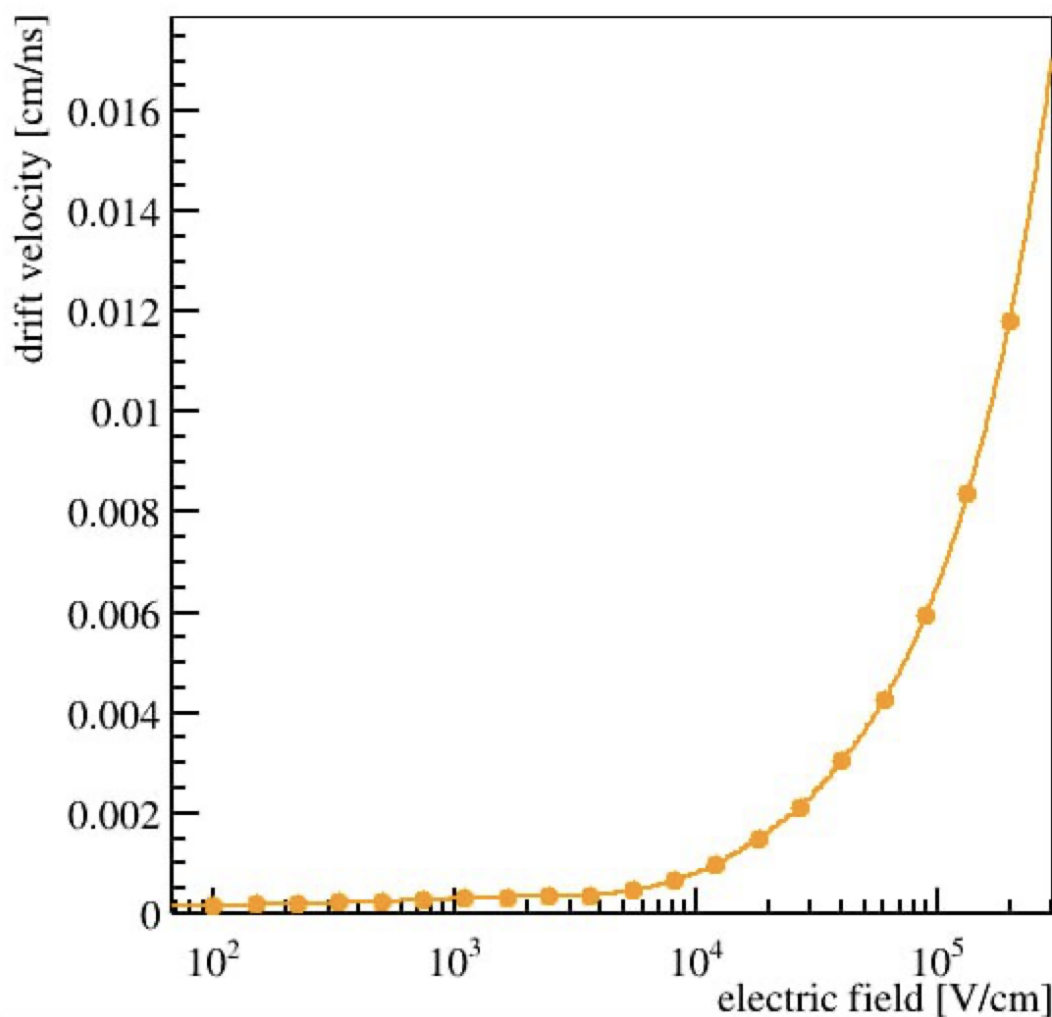


Рисунок 4 — Значение скоростей дрейфа электронов в газовом аргоне.

На Рисунке 4 с помощью пакета Magboltz была получена примерная скорость дрейфа электронов в жидком аргоне.

Объединение значений электрического поля из COMSOL и физику газа из Magboltz внутри Garfield C++ позволило получить треки дрейфующих электронов.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В связи с тем, что полученная модель детектора оказалась компактной, удалось набрать сто тысяч треков электронов.

### 3.1 Анализ времени дрейфа

Одним из важных параметров, которые нужно было оценить, являлось среднее время дрейфа электрона.

- **Среднее время дрейфа:** 877,57 нс.
- **Стандартное отклонение:** 148,62 нс.

Данные значения были получены с помощью запуска электронов, распределенных равномерно по поверхности раздела фаз.

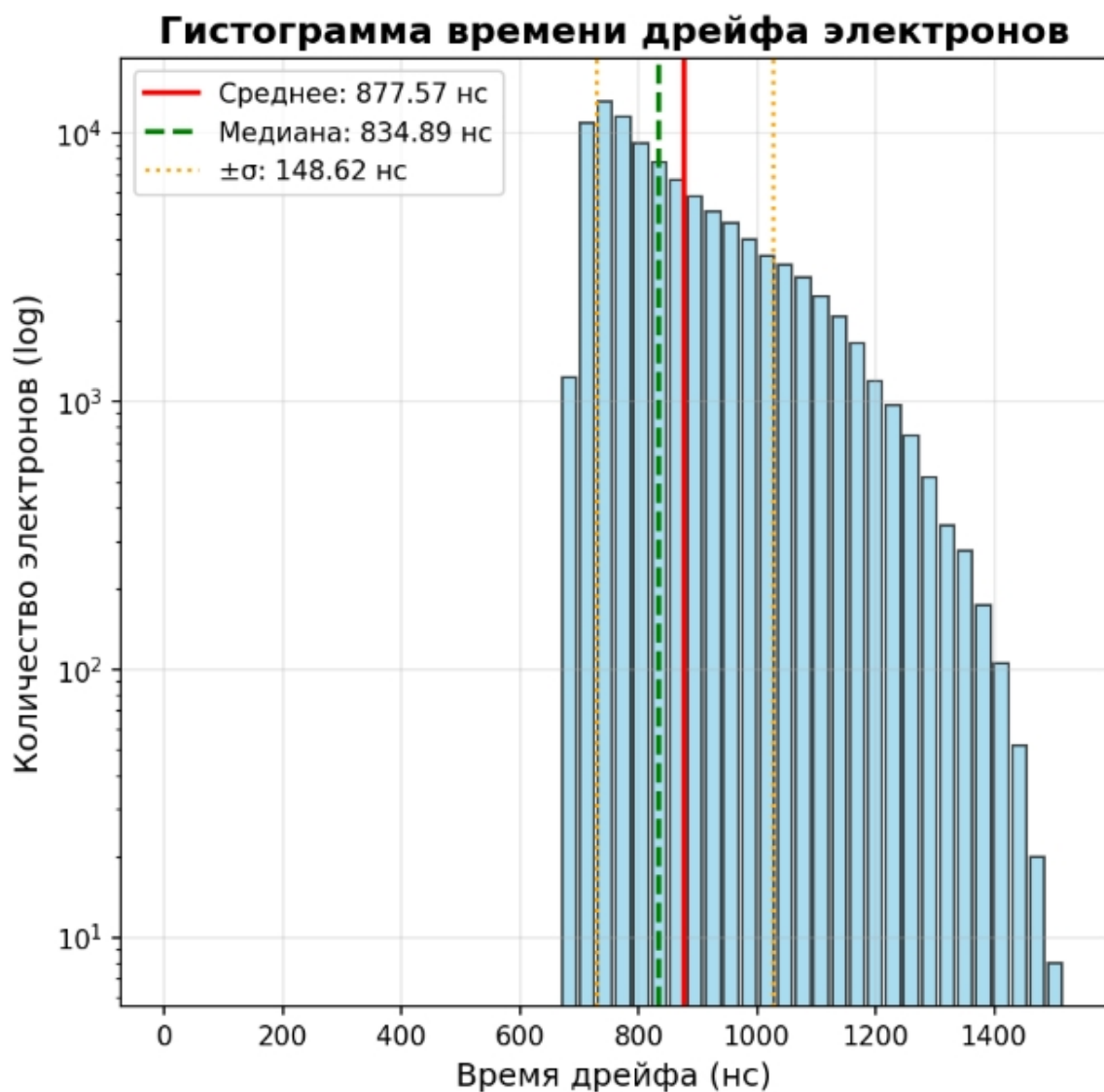


Рисунок 5 — Гистограмма распределение времени дрейфа электронов.

На Рисунке 5 можно подробнее рассмотреть распределение времен дрейфов электронов. На гистограмме справа можно заметить тяжелый хвост - это электроны, запущенные из центра ячейки. Данная область наиболее интересна, так как основная часть электронов в реальном эксперименте проходит именно через центр шестиугольной ячейки.

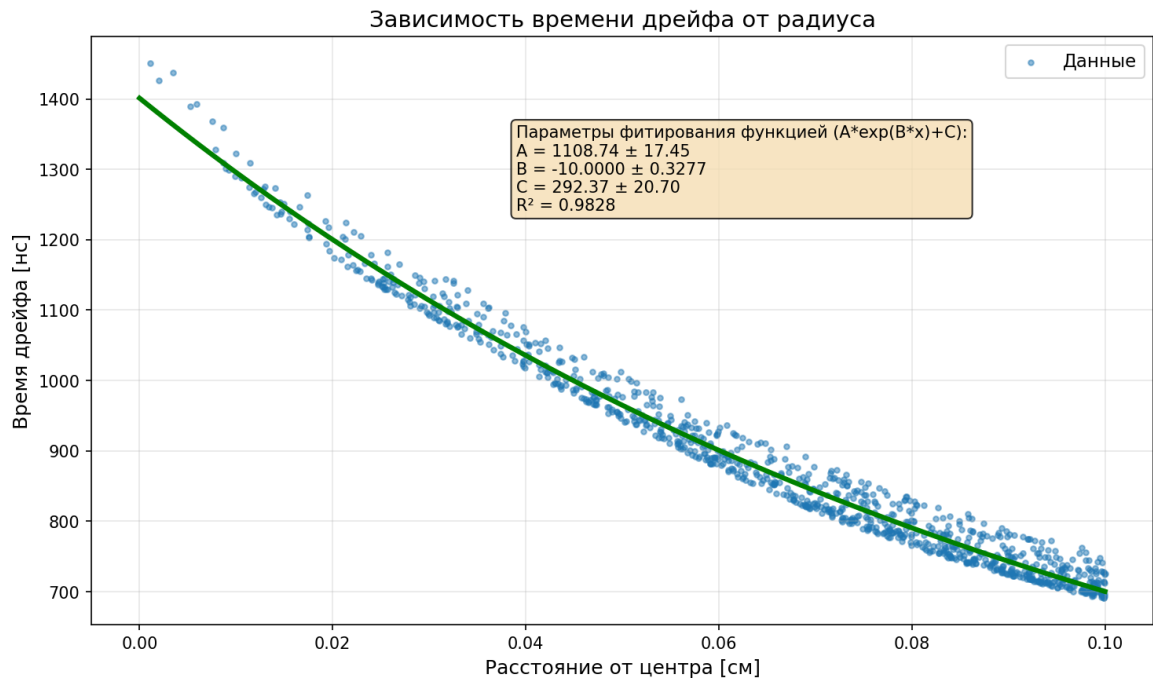


Рисунок 6 — Распределение времени дрейфа от расстояния до центра ячейки.

Также для наглядного понимания распределения времени дрейфа от расстояния до центра ячейки был построен график на рисунке 6. По нему как раз можно доказать, что наибольшее время дрейфа имеют электроны, запущенные из центра. Также было произведено фитирование данного распределения с помощью экспоненты. Значение  $R^2 = 0.9828$ , что близко к единице и говорит о том, что независимые параметры фитирования с высокой точностью описывают полученное распределение.

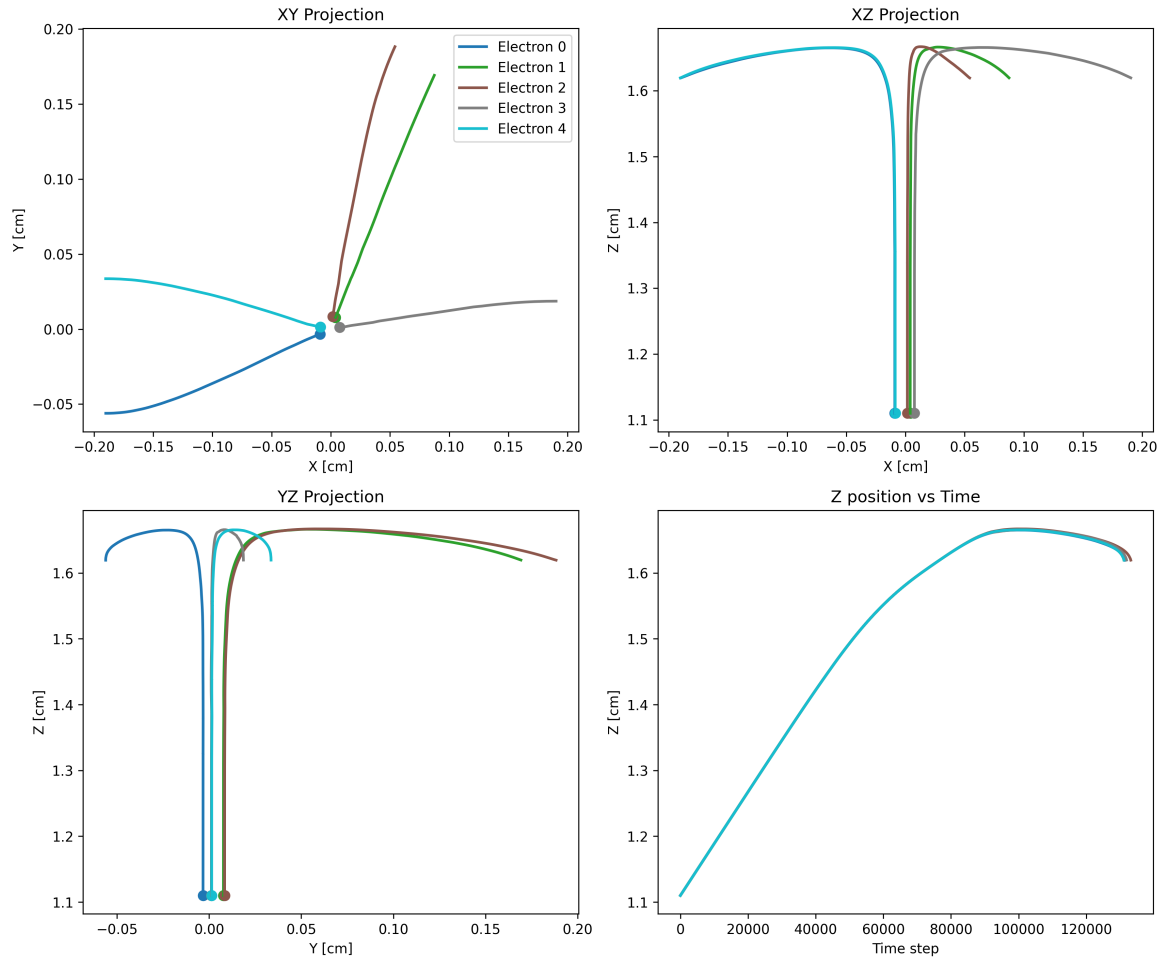


Рисунок 7 — Траектории дрейфа в разных проекциях.

На Рисунке 7 показаны траектории дрейфа электронов, запущенные из центра со случайным отклонением в плоскости  $XY$  на 1 мм.

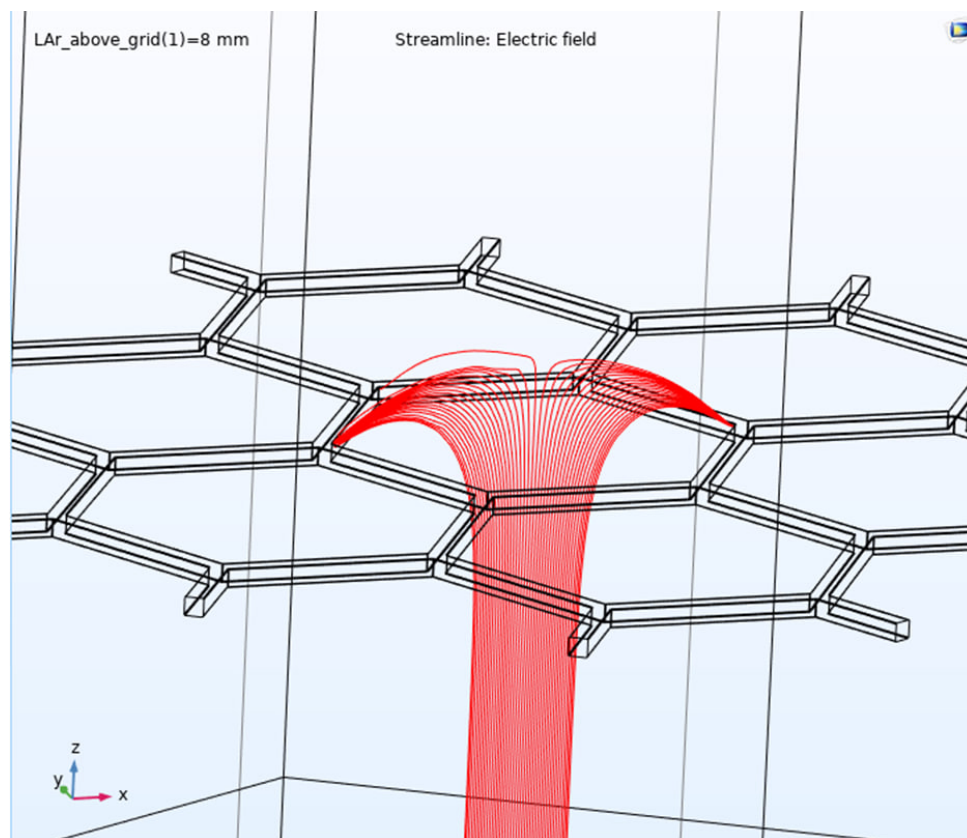


Рисунок 8 — Линии электрического поля в детектора

По графикам на Рисунке 7 видно, что они имеют зонтообразную форму, что совпадает с ожидаемым результатом на рисунке 8, полученным при моделировании в COMSOL.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено моделирование треков дрейфовых электронов, запущенных с поверхности раздела фаз.

Проведенное моделирование позволило оценить время дрейфа в газовом объеме, а также явно получить траекторию электронов.

Полученная модель позволит в дальнейшем провести эксперименты по изучению неоднородности световыхода для различных треков электронов. Также можно будет явно рассмотреть, как меняется траектория движения для различных конфигураций детектора РЭД-100.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Daniel Z. Freedman. Coherent effects of a weak neutral current. *Phys. Rev. D*, 9(5):1389–1392, March 1974.
2. N. N. Van Dessel, V. V. Pandey, H. H. Ray, and N. N. Jachowicz. Cross sections for coherent elastic and inelastic neutrino-nucleus scattering. *arXiv preprint arXiv:2007.03658*, 7 2020.
3. Yu. Akimov, D. S. Alexandrov, I. R. Alyev, R. A. Belov, V. I. Bolozdynya, A. V. Etenko, A. V. Galavanov, A. M. Glagovsky, E. V. Gusakov, Y. V. Khromov, A. M. Kiselev, S. M. Kononov, A. N. Kornoukhov, V. G. Kovalenko, A. S. Kozlova, E. V. Kumpan, A. V. Lukyashin, A. V. Pinchuk, A. E. Razuvaeva, O. G. Rudik, D. V. Shakirov, A. E. Simakov, G. V. Sosnovtsev, V. and A. Vasin, A. The red-100 experiment. *JINST*, 17(11):T11011, November 2022. Submitted 30 Sep 2022 (v1), revised 14 Nov 2022 (v2).