

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования**

**«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**

---

**Кафедра физики элементарных частиц**

**Отчет по НИРС на тему: «Моделирование фона от Ar39 в детекторе РЭД-100»**

***Место выполнения:***

НИЯУ МИФИ, «Лаборатория экспериментальной ядерной физики»

***Студент Б20-105:*** Бугрей П. С.

(группа)

***Руководитель работы:*** Белов В.А.

***Оценка руководителя:***

\_\_\_ из 50

\_\_\_\_\_

**Москва – 2025 г.**

## **Аннотация**

В ходе научно-исследовательской работы студента была обновлена GEANT4-модель RED100, написаны bash-скрипты и макросы для упрощения моделирования и анализа результатов, а также выполнен расчёт фона от Ar39 с использованием GEANT4-модели RED100.

Работа проводилась на базе Лаборатории экспериментальной ядерной физики, НИЯУ МИФИ.

## **Abstract**

During the student's research work, the GEANT4 model of RED100 was updated, bash scripts and macros were written to simplify modeling and analysis of results, and the background calculation from Ar39 was performed using the GEANT4 model of RED100.

The work was carried out at the Laboratory of Experimental Nuclear Physics, National Research Nuclear University MEPhI.

## Содержание

<b>1. Введение</b> .....	4
<b>2. РЭД-100</b> .....	5
2.1 Процессы, происходящие в благородных газах под воздействием излучения .....	5
2.2 Принцип работы двухфазного детектора .....	6
2.3 Упругое когерентное рассеяние нейтрино (УКРН) .....	7
2.4 Схема РЭД-100.....	9
<b>3. <math>\beta</math>-распад <math>^{39}\text{Ar}</math></b> .....	11
<b>4. Описание пакетов GEANT4 и NEST</b> .....	12
3.1 Geant4 .....	12
3.2 NEST.....	14
<b>5. Изменения в модели RED100 и вспомогательные программы ...</b>	15
4.1 Добавление новой информации о событиях .....	15
4.2 Макрос и вспомогательная программа для моделирования большой статистики .....	15
<b>6. Моделирование и анализ фоновых сигналов от распада <math>^{39}\text{Ar}</math> .....</b>	17
<b>7. Заключение</b> .....	20
<b>8. Список литературы</b> .....	21

## 1. Введение

В настоящее время ядерная физика и физика элементарных частиц требуют комплексные системы для анализа модельных и реальных данных. Особенно востребованы крупномасштабные, точные и всесторонние моделирования детекторов частиц, используемых в подобных экспериментах. Из-за постоянно растущих размеров, сложности и чувствительности детекторов, а также появления доступных, высокопроизводительных и недорогих компьютерных систем спрос на моделирование детекторов частиц с каждым годом растёт. Подобные тенденции так же наблюдаются в таких дисциплинах, как: ядерная медицина, радиационная физика, материаловедение и любая другая область, в которой важно взаимодействие частиц с веществом.

В ответ на это были разработаны новые инструментарии объектно-ориентированного моделирования, такие как Geant4 и NEST. В Geant4 содержится много связанных программных компонентов, дающих набор обширных и разнообразных инструментов, которые могут применяться в различных ситуациях. Они варьируются от простых разовых исследований основных явлений и геометрии до полномасштабного моделирования детекторов для экспериментов на Большом адронном коллайдере и других объектах. Однако для процессов с низким энерговыделением требуются более точные модели, чем те, которые прописаны в Geant4.

Пакет NEST содержит в себе набор сложных, полуэмпирических схем взаимодействия частиц с благородными газами (Ксенон, Аргон, и др.). NEST можно использовать как самостоятельно, так и вместе с Geant4, заменяя его модели сцинтилляции и электролюминесценции благородных газов на свои. Модели NEST особенно полезны при взаимодействиях с низким энерговыделением, так как Geant4 и его модели создавались в первую очередь для ускорительных экспериментов с высоким энерговыделением.

## 2. РЭД-100

### 2.1. Процессы, происходящие в благородных газах под воздействием излучения

Процессы, которые происходят при столкновении любой частицы с любой энергией с объемом сжиженного благородного газа, можно описать следующим образом[9]:

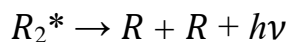
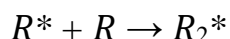
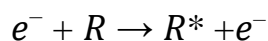
– Частица взаимодействует с атомами вещества, вызывая их возбуждение или ионизацию. После ионизации атома образуется электронно-ионная пара. При возбуждении происходит переход электрона в состояние с более высокой энергией, затем он может вернуться в исходное состояние через каскадный процесс, приводящий к испусканию фотонов с определенными энергиями или Оже-электронов и фононов.

– После ионизации вторичные электроны, продолжая движение, могут ионизировать и возбуждать другие атомы среды.

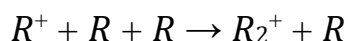
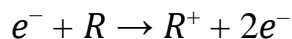
– Так же они могут рекомбинировать, если нет приложенного электрического поля, если же электрическое поле будет, то часть электронов может избежать рекомбинации.

Таким образом, можно представить описанные выше процессы в виде:

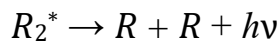
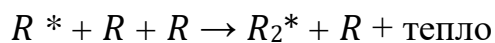
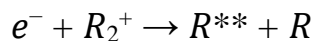
а) Возбуждение:



б) Ионизация:



в) Рекомбинация:



Хотя у всех частиц есть общий принцип, механизм процессов внутри рабочего вещества зависит от типа частицы, попавшей туда. Например, нейтрино и WIMP взаимодействуют с ядром, передавая ему энергию и создавая ядро отдачи. Это приводит к образованию положительно заряженного иона с низким эффективным зарядом. При перемещении ион будет постоянно менять свой заряд, из-за обмена электронами с другими атомами. Однако из-за размеров, схожих с размерами атомов окружающей среды, ион не только возбуждает и ионизирует среду, но и теряет значительную часть своей энергии при столкновениях в процессе движения.

У гамма-квантов процессы взаимодействия с веществом другие, такие как фотоэффект и комптоновское рассеяние. Они оба образуют вторичные электроны, у которых будут свои взаимодействия с атомами окружающей среды.

В итоге распределение начальной энергии будет очень сильно зависеть от типа частицы, так как у каждой частицы свой набор процессов, по средствам которых она взаимодействует со средой.

## **2.2 Принцип работы двухфазного детектора**

В двухфазном детекторе используется рабочее вещество как в жидкой, так и в газообразной фазе[1]. В жидкой фазе возникает сцинтилляционная вспышка, а в газовой фазе, куда электроны ионизации вытягиваются электрическим полем, наблюдается электролюминесцентная вспышка. По данным сигналам мы можем определить координату и момент взаимодействия, а также энергию частицы. Преимущества такой системы включают получение более детальной информации о событии и расширенные возможности восстановления происшествия с использованием различных сигналов. Недостатками являются сложность конструкции, поддержание стабильных условий (давление и температура) внутри детектора, а также высокие затраты на разработку.

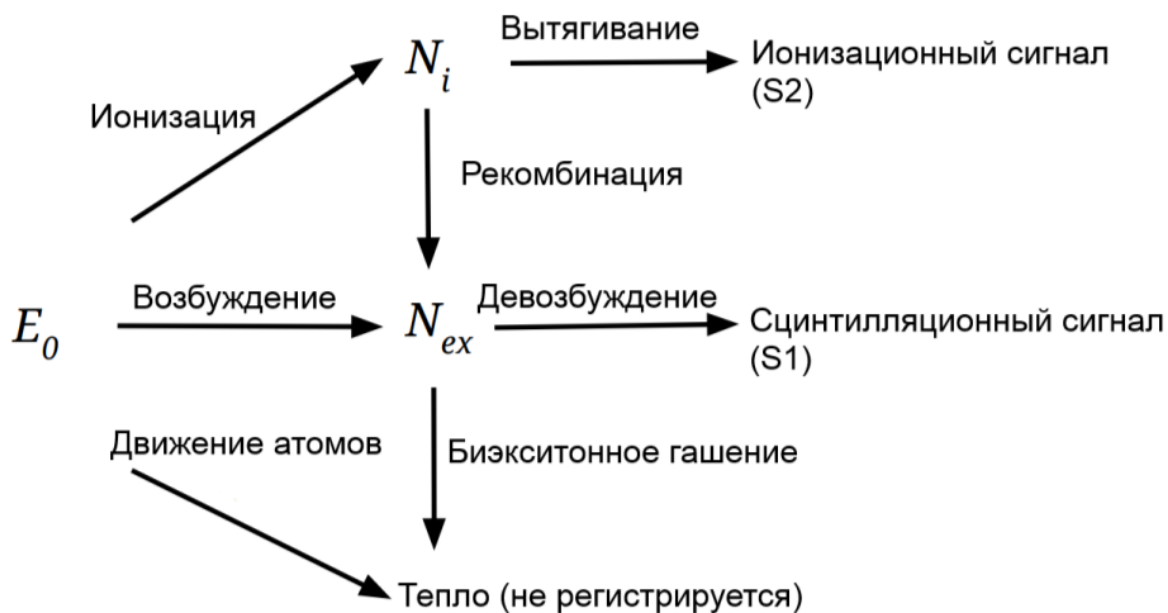


Рисунок 2.2 — Схема процессов в двухфазном детекторе на благородном газе.

Процесс формирования сигнала в двухфазной среде следующий:

1. При взаимодействии частицы со средой происходит возбуждение и ионизация, что приводит к появлению сцинтилляционного сигнала (S1), который запускает процесс регистрации события.

2. Электроны ионизации, под воздействием электрического поля, перемещаются к поверхности и проникают через потенциальный барьер в газовую фазу. Здесь они приобретают энергию от электрического поля и образуют возбужденные состояния, распад которых порождает интенсивный электролюминесцентный сигнал (S2).

### 2.3 Упругое когерентное рассеяние нейтрино (УКРН)

УКРН - это процесс, который был предсказан 50 лет назад[7]. Он заключается в том, что нейтрино (или антинейтрино) упруго рассеивается на ансамбле нуклонов ядра путем обмена виртуальным  $Z^0$ -бозоном и передачи части своей энергии.

В случае, когда нейтрино передаёт ядру малый импульс, характерный размер области может превышать размер ядра, это происходит из-за того, что, согласно соотношению неопределенности Гейзенберга, нейтрино с низкой

энергией взаимодействуют одновременно со всеми нуклонами ядра. Для того, чтобы процессу УКРН протекал эффективно, энергия нейтрино должна быть не больше 50 МэВ, иначе условие когерентности будет выполняться не для всех углов рассеяния. Подобные нейтрино можно получить либо от ядерных реакторов, либо от сильноточного ускорителя, с которого пучок будет выводиться и сбрасываться в мишень полного поглощения.

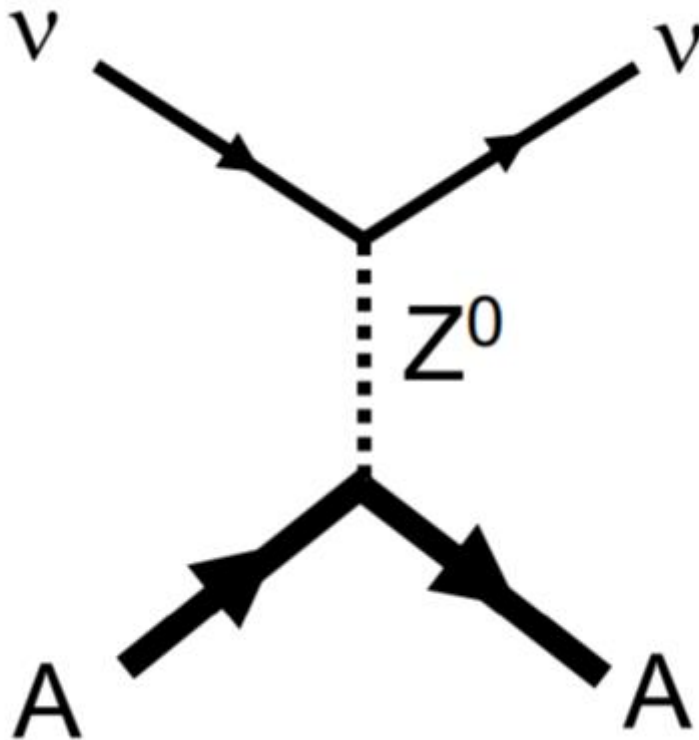


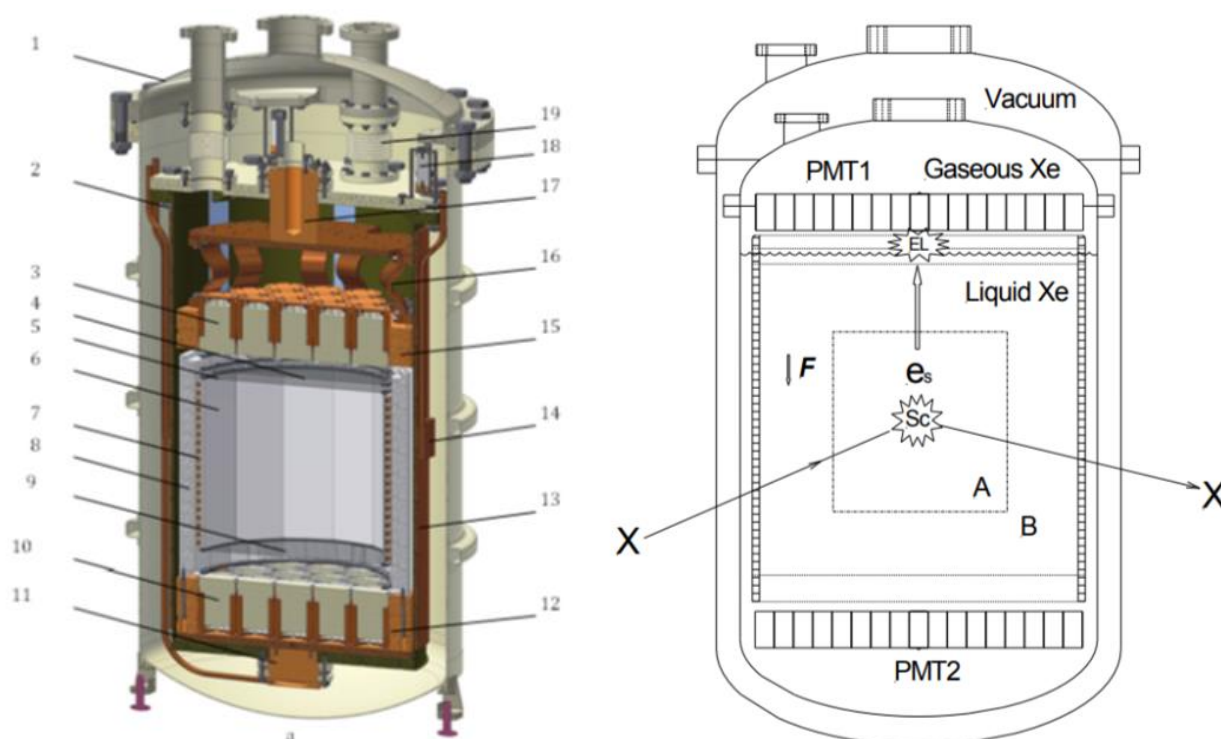
Рисунок 2.3.1 — Диаграмма Фейнмана для УКРН.

Процесс УКРН играет важную роль в изучении процессов, связанных с формированием Вселенной и эволюцией звезд. Отличия измеренного сечения взаимодействия УКРН от предсказаний в Стандартной Модели может свидетельствовать о том, что есть ещё какая-то новая физика за рамками Стандартной Модели, подобные результаты могут помочь найти новые, ранее не известные явления. Также есть потенциал для использования УКРН в изучении таких вещей, как ядерный форм-фактор и магнитный момент нейтрино.



Упругое когерентное рассеяние атмосферных и солнечных нейтрино может быть фоном для будущих экспериментов по поиску темной материи в виде массивных слабовазаимодействующих частиц - вимпов. Поэтому экспериментальные данные о величине сечения УКРН могут использоваться для повышения чувствительности таких экспериментов. Также УКРН может быть использован для разработки новых технологий компактных детекторов, которые будут применяться для мониторинга состояния активной зоны ядерных реакторов.

## 2.4 Схема РЭД-100



РЭД-100 – это двухфазный эмиссионный детектор, работающий на поверхности Земли, у которого в рабочем объёме 100 кг жидкого ксенона[4]. На рис. 2.4.2: А - это рабочий объём, В – это внешний слой, который отсекается геометрическими ограничениями при анализе.

Для работы детектора необходимо постоянно поддерживать сжиженный благородный газ охлаждённым, поэтому в конструкцию был добавлен вакуумно-герметичный титановый криостат (1,2 на рис. 2.4.2). Внутри этого криостата находится структура из электродов, которая создаёт однородное

электрическое поле в жидком ксеноне. Этот объем сверху ограничен эмиссионным электродом (5 на рис. 2.4.1), сбоку поле-формирующими кольцами (7 на рис. 2.4.1), а снизу катодом (9 на рис. 2.4.1). Также на 19 мм выше эмиссионного электрода расположен Анод (4 на рис. 2.4.1). Граница жидкой и газообразной фазы находится между эмиссионным электродом и анодом.

РЭД-100 активно используется для изучения упругого когерентного рассеяния нейтрино (УКРН).

Главным преимуществом этого детектора, отличающим его от многих других двухфазных эмиссионных жидко-ксеноновых детекторов, которые могут использоваться только в условиях с низким уровнем фона от космических лучей, РЭД-100 адаптирован к работе в условиях наземной лаборатории.

Всего у РЭД-100 было три основных сеанса работы:

1) Весной в 2018-ом и 2019-ом годах в Лаборатории экспериментальной ядерной физики НИЯУ МИФИ проводились два калибровочных сеанса, целями которых были: проверка работоспособности детектора, отработка процедуры управления детектором и предварительные калибровки.

2) В 2021-2022 годах на четвёртом блоке КАЭС (Калининской атомной электростанции) на расстоянии 19 метров под реактором блока проводились физические сеансы. Подобное расположение позволяло не только близко расположиться к источнику нейтрино, но и давало дополнительную защиту от космического излучения самим реактором и зданием энергоблока.

По итогам сеанса на Калининской АЭС было принято решение к следующему эксперименту заменить ксенон на аргон. Что в свою очередь требует оценки фона, от изотопов аргона, в частности  $^{39}\text{Ar}$ .

### **3. $\beta$ -распад $^{39}\text{Ar}$**

$\beta$ -распад — один из трёх основных типов радиоактивного распада (наряду с  $\alpha$ -распадом и  $\gamma$ -излучением), при котором происходит преобразование одного нуклида в другой с изменением заряда ядра на единицу при почти неизменной массовом числе.

Существует три типа  $\beta$ -распада:

- 1)  $\beta^-$ -распад:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
- 2)  $\beta^+$ -распад:  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
- 3) Электронный захват:  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$

В 1-ом и 2-ом случае энергия  $\beta$ -распада распределяется между  $\beta$ -частицей, нейтрино и дочерним ядром, что приводит к непрерывному энергетическому спектру испускаемых электронов/позитронов, в отличие от дискретных энергий при  $\alpha$ -распаде.

$^{39}\text{Ar}$  — это  $\beta^-$ -радиоактивный изотоп аргона с периодом полураспада 269 лет. Этот изотоп встречается в природе в следовых количествах, образуясь в атмосфере в результате взаимодействия космических лучей с стабильным изотопом  $^{40}\text{Ar}$ . У  $^{39}\text{Ar}$  всего один канал распада:

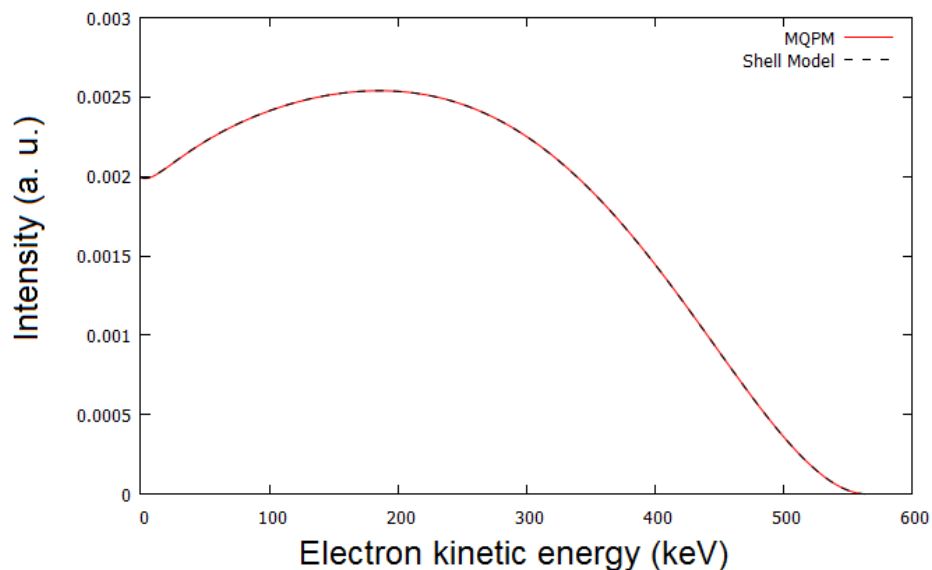
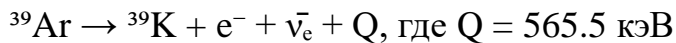


Рисунок 3.1 — Аналитический  $\beta^-$ -спектр электронов от распада  $^{39}\text{Ar}$ [11].

#### 4. Описание пакетов GEANT4 и NEST

#### 4.1. GEANT4

GEANT4 — это пакет, содержащий в себе набор инструментов для моделирования процессов, происходящих при прохождении частиц через вещество[3]. Он включает в себя полный набор функций, включая отслеживание, геометрию, физические модели и хиты. Так же он охватывает широкий спектр физических процессов, таких как электромагнитные, адронные и оптические процессы. В нём описан большой набор долгоживущих частиц, материалов и элементов в широком диапазоне энергий, начиная, в некоторых случаях, с 250 эВ в других простирается до диапазона энергий ТэВ. Данный пакет был разработан и сконструирован для таких вещей, как демонстрация используемых физических моделей, обработка сложной геометрии и обеспечение легкой адаптации для использования в различных наборах приложений. Его инструментарий является результатом коллективного труда физиков и инженеров-программистов со всего мира.

Написан GEANT4 был на языке программирования C++, при его создании использовались программная инженерия и технология объектно-ориентированного программирования. GEANT4 нашёл применение в очень широком диапазоне областей: в ядерной физике, в физике элементарных частиц, в конструировании ускорителей, в медицинской и космической физике.

Пакет GEANT4 разрабатывался с учетом программных потребностей современных экспериментов. Типичная система программ, написанных при помощи GEANT4 содержит в себе: генератор событий, моделирование детектора, реконструкцию и анализ, которые могут использоваться в комбинации или по отдельности.

GEANT4 является набором библиотек и классов, используя которые можно описать такие аспекты компьютерного моделирования, как:

1. Частицы, их типы и свойства.
2. Генерация первичных частиц.

3. Физические процессы, происходящие с частицами.
4. Получение информации о каждом событии, треках и шаге частицы, а также ее хранение.
5. Создание геометрической модели системы.
6. Материалы, из которых состоят элементы системы.
7. Задание чувствительных областей в геометрии системы, которые позволят анализировать состояние системы в момент прохождения через эти чувствительные области частиц.
8. Визуализация геометрии и треков частиц.

Программы, написанные при помощи GEANT4, компилируются следующим образом: сначала описывается геометрия системы, потом происходит расчёт сечений всех возможных взаимодействий для каждой частицы, с каждым материалом, затем запускаются заданные пользователем частицы и создаются треки. Полученные треки разбиваются на комбинацию шагов. Далее по таблице сечений происходит выбор и реализация одного из заданных процессов взаимодействия на каждом шаге движения. Таким образом частица будет продолжать движение, пока полностью не потеряет энергию. Если в процессе образуются вторичные частицы, то для них будут сгенерированы новые треки. Моделирование будет продолжаться, пока не будут обработаны треки всех частиц. На каждом этапе моделирования у программиста есть возможность вызывать свои дополнительные функции, которые смогут получить всю информацию о состоянии и движении частицы. Полученная информация может быть использована в дальнейшем для построения зависимостей.

## 4.2. NEST

NEST – это библиотека для GEANT4, разработка которой началась в 2012 году[5]. Данная библиотека заменяет собой класс G4Scintillation и позволяет полноценно моделировать детекторы на благородных газах. Модели, использовавшиеся в NEST, основывалась на принципе распределения энергии, показанном на рис. 2.2: энергосодержание в среде распределяется между двумя процессами:

1. Образование возбуждённых молекул - экситонов ( $N_{ex}$ ) в результате процессов возбуждения и рекомбинации.
2. Образование электронно-ионных пар ( $N_i$ ). Их сумма определяет полное количество квантов  $N_q$  - как экситонов, так и электрон-ионных пар, образующихся при выделении энергии (с учётом того, что часть энергии теряется в виде тепла и не идёт на образование сигнала).

В первой версии NEST в результате работы возвращалось количество сцинтилляционных фотонов  $N_\gamma$  (S1) и количество электронов ионизации  $N_e$ , посчитанное по теоретической модели Томаса-Аймеля или Доке-Биркса. Далее электроны ионизации вытягиваются в газовую фазу и создают электролюминесцентный сигнал (S2):

$$e = (1 - r) * N_i$$

$$N_\gamma = (N_q - N_e) * P,$$

где  $P$  - это поправка на биэкситонное возбуждение для ядер отдачи,  $r$  - это коэффициент рекомбинации, зависящий от длины трека.

Во 2-ой версии NEST стал самостоятельным пакетом, который теперь мог использоваться отдельно от GEANT4, что позволило производить предварительное моделирование быстрее. Так же модели среднего световыхода и среднего зарядовыхода были заменены на полностью эмпирические, но не противоречащие теоретическим результатам, так же были обновлены модели скоростей дрейфа электронов в жидкости и газе,

рекомбинационных флуктуаций, и т.д. В отличие от NEST 1.0, NEST 2.0 работает не только с ксеноном, но и с другими благородными газами, в частности с аргоном.

Главное отличие старой версии от новой – это то, что в новой версии почти не осталось теоретических моделей. В новой версии полуэмпирическая модель предсказывает среднее количество сцинтилляционных фотонов и электронов ионизации, затем происходит учёт флуктуаций и рекомбинаций, после чего возвращается итоговое количество фотонов и электронов, формирующих сигналы S1 и S2.

## **5. Изменения в модели RED100 и вспомогательные программы**

### **5.1 Добавление новой информации о событиях**

В класс OneStep для каждого поля типа std::string было добавлено соответствующее поле с хэшем вычисленным при помощи алгоритма Пирсона, это было необходимо, так как отборы по строковым переменным в ROOT не всегда работают корректно.

Так же в класс REDMCEventCollection было добавлено поле fRunSeed для возможности воспроизведения результатов моделирования.

### **5.2 Макрос и вспомогательная программа для моделирования большой статистики**

Для моделирования распадов  $^{39}\text{Ar}$  был написан макрос Ar39.mac, который содержит набор инструкций для работы Geant4-модели:

1. `/RED100/source/type gps` — выбирает в качестве источника частиц стандартный **General Particle Source (GPS)**.
2. `/gps/particle ion` — задает тип испускаемой частицы.
3. `/gps/ion 18 39 0 0.0` — определяет параметры иона. Формат: `/gps/ion <Z> <A> <Q> <E>`, где  $Z=18$  — это Аргон (Ar),  $A=39$  означает изотоп Аргон-

39,  $Q=0$  означает, что это нейтральный атом, 0.0 означает, что ядро находится в основном (невозбужденном) состоянии.

4. `/gps/energy 0 keV` — задает кинетическую энергию испускаемой частицы.

5. `/gps/pos/type Volume` — определяет геометрический тип источника. Volume означает, что частицы будут рождаться не в точке или на поверхности, а во всем заданном объеме, случайным образом.

6. `/gps/pos/shape Cylinder` — задает форму объема источника. Cylinder — цилиндр.

7. `/gps/pos/centre 0.0 0.0 0.0` — координаты центра цилиндра в мировой системе координат.

8. `/gps/pos/radius 200 mm` — задаёт внешний радиус цилиндра.

9. `/gps/pos/inner_radius 0 cm` — внутренний радиус. 0 cm означает, что цилиндр полнотелый, а не полый.

10. `/gps/pos/halfz 210 mm` — половина высоты цилиндра вдоль его оси (Z).

11. `/gps/pos/confine LiqXe1` — ключевая команда. Она ограничивает рождение частиц только той частью объема цилиндра, которая пересекается с физическим объемом LiqXe1.

12. `/gps/ang/type iso` — определяет угловое распределение испускаемых частиц. iso (isotropic) — изотропное распределение.

13. `/process/had/rdm/thresholdForVeryLongDecayTime 1.0e+60 year` — устанавливает значение  $10^{60}$  year, как максимальное среднее время жизни частицы, для которой будет разыгрываться распад, все частицы с равным или большим средним временем жизни будут считаться стабильными. Эта команда гарантирует, что все известные распады будут разыграны в симуляции.



14. `/run/beamOn 1000000` — эта команда запускает симуляцию 1000000 независимых событий.

Согласно этому макросу Geant4 моделирует атомы  $^{39}\text{Ar}$ , равномерно распределённые по активной части жидкого аргона, а затем разыгрывает их распад. Цель этого моделирования — получить распределение событий по количеству электронов в области УКРН, где количество электронов ионизации  $< 10$ . Данное распределение очень сложно получить аналитически, поэтому мы используем Монте-Карло моделирование.

Далее для ускорения моделирования большой статистики был написан bash-скрипт `run_parallel.sh` который запускает несколько параллельных моделирований с меньшей статистикой и уникальным зерном генерации, а затем объединяет результаты всех моделирований в один root-файл.

## 6. Моделирование и анализ фоновых сигналов от распада $^{39}\text{Ar}$

При помощи `run_parallel.sh` была смоделирована статистика  $10^6$  событий распада  $^{39}\text{Ar}$  и при помощи ROOT построены распределения:

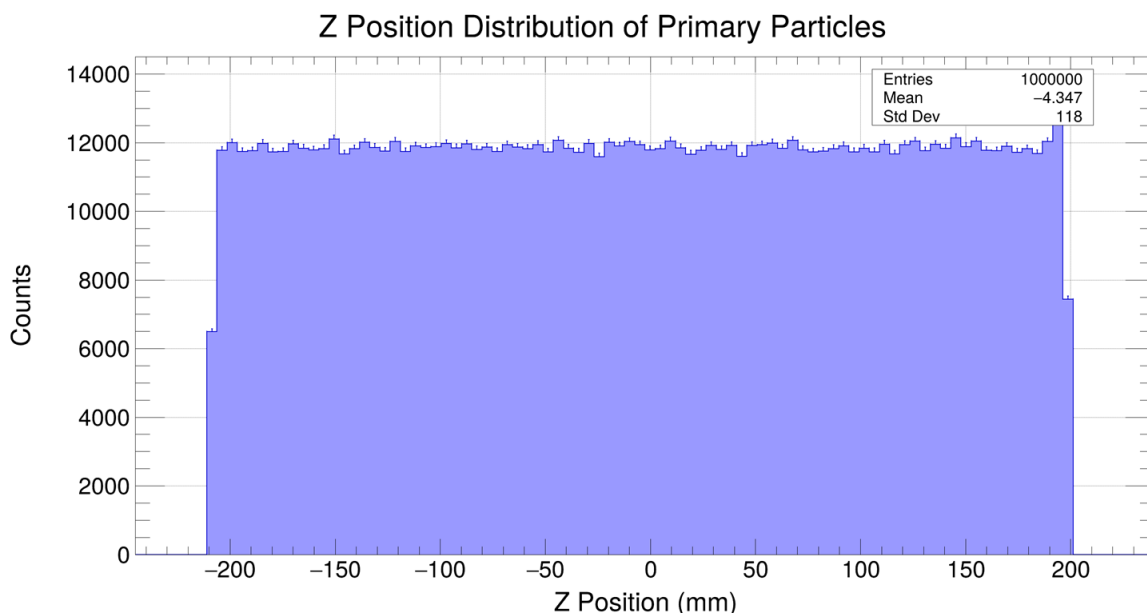


Рисунок 6.1 — Распределение атомов  $^{39}\text{Ar}$  по Z в активной части жидкого аргона.

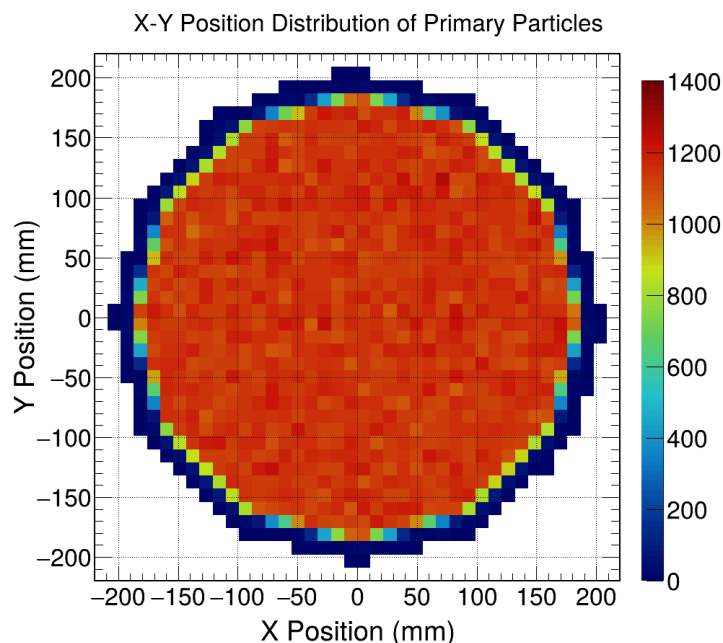


Рисунок 6.2 — Распределение атомов  $^{39}\text{Ar}$  по X:Y в активной части жидкого аргона.

Из гистограмм на рис. 6.1 и рис. 6.2 Можно сделать вывод, что что атомы  $^{39}\text{Ar}$  действительно распределены равномерно по активной части жидкого аргона.

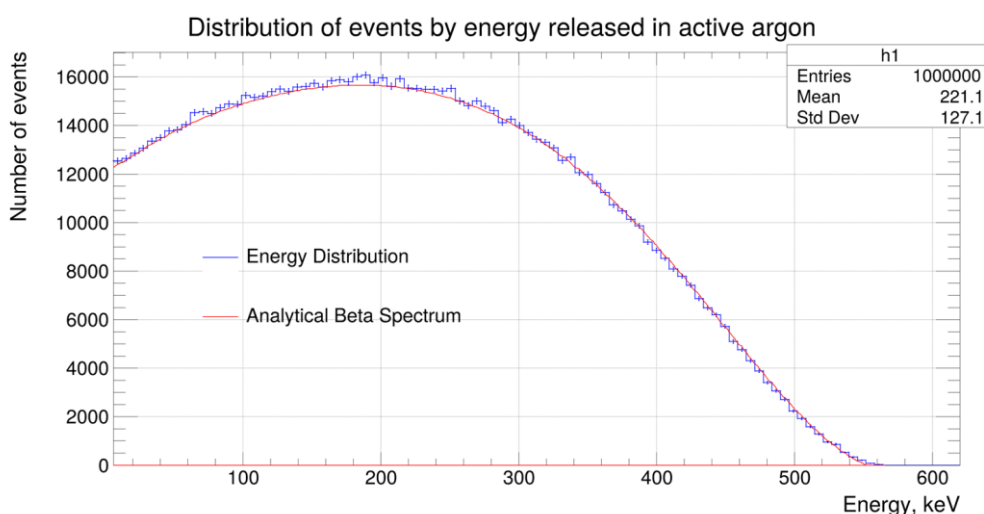


Рисунок 6.3 — Распределение событий по выделившейся энергии в активной части жидкого аргона.

Аналитическое распределение событий по выделившейся энергии было получено из  $\beta$ -спектра электронов от распада  $^{39}\text{Ar}$  на рис. 3.1. Для этого из рис. 3.1 поточечно был извлечён спектр в текстовый файл b\_spectrum.txt. Затем на основе этих точек был построен TGraph, который был нормирован на интеграл (чтобы нивелировать погрешность при извлечении спектра из

картинки), затем спектр был масштабирован по оси  $Y$  в  $k$  раз, где  $k = N\_events * Width\_bin$ , где  $N\_events$  — число событий на гистограмме ( $10^6$ ), а  $Width\_bin$  — ширина бина (6.2) на гистограмме. Из рис. 6.3 видно, что распределение событий по выделившейся энергии соответствует аналитическому расчёту. А среднее значение спектра 221.1 кэВ близко к теоретическому 218.8 кэВ ( $\delta \approx 1\%$ ). После того, как была проверена корректность моделирования, было построено искомое распределение событий по количеству образованных электронов ионизации в области УКРН ( $<10$  электронов).

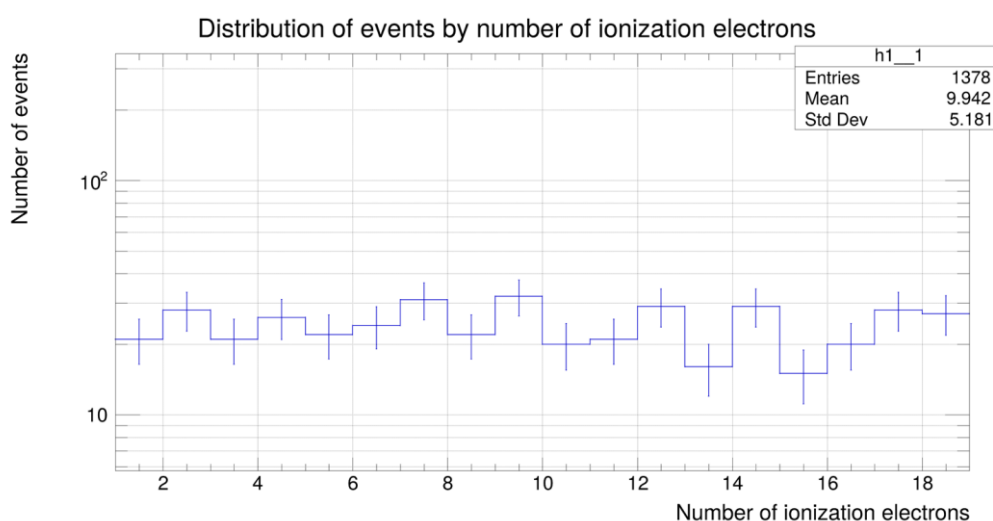


Рисунок 6.4 — Распределение событий по количеству образованных электронов ионизации.

Распределение на рис. 6.4 в первом приближении равномерное, что соответствует ожиданиям.

## Заключение

В данной работы были изучены пакеты GEANT4 и NEST, код и конструкция детектора РЭД-100, было добавлено больше информации в root-файлы, получаемые после моделирования, написаны вспомогательные программы для ускорения моделирования и анализа, а так же смоделирован распад  $10^6$  атомов  $^{39}\text{Ar}$ . Информация о событиях сохранялась в виде деревьев в root-файлах.

Далее на основе полученных данных были построены распределения по координате и энергосодержанию в активной части жидкого аргона, чтобы удостовериться в корректности проведённого моделирования.

В итоге было получено распределение событий по выделившейся энергии в активной части жидкого аргона, которое соответствует аналитическому расчёту и распределение событий по количеству образованных электронов ионизации, которое соответствует ожидаемому.

В дальнейшем планируется сравнить полученное распределение событий по количеству образованных электронов ионизации от распадов атомов  $^{39}\text{Ar}$  с ожидаемым сигналом от УКРН.

## Список литературы

1. Козлова Е. С., Моделирование сцинтилляционного и электролюминесцентного откликов детекторов на сжиженных благородных газах, Диссертационная работа, 2023.
2. Brun, R. GEANT. Detector description and simulation tool. User'Guide / R. Burn et al.– CERN. Geneva. Switzerland, 1993.
3. GEANT4 – a simulation toolkit / S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — july. — Vol. 506, no. 3. — Pp. 250–303.
4. Akimov D.Yu., Belov V.A., Bolozdynya A.I. et al. (The RED-100 Collaboration) First ground-level laboratory test of the two-phase xenon emission detector RED-100 // Journal of Instrumentation. – 2020. – Vol. 15, Iss. 2. – P. P02020. – DOI: 10.1088/1748-0221/15/02/P02020.
5. Szydagis M., .... A review of NEST models for liquid xenon and an exhaustive comparison with other approaches // Frontiers in Detector Science and Technology. – 2024. – Vol. 2. – Art. 1480975. – DOI: 10.3389/fdest.2024.1480975
6. J. Mock, ..., N. Walsh et al. Modeling Pulse Characteristics in Xenon with NEST, JINST 9 T04002 2014.
7. D. Yu. Akimov, ..., A.V. Khromov et al. Prospects for observation of neutrino-nuclear neutral current coherent scattering with two-phase Xenon emission detector. 2013, Journal of Instrumentation 8(10).
8. Хромов А. В., Двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100 для исследования упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах ксенона, Диссертационная работа на соискание степени канд. физ.-мат. наук., 2019.
9. A. I. Bolozdynya, ..., T. Doke et al. Noble Gas Detectors, 2006 ISBN Wiley 345 pages.
10. Акимов Д.Ю., ..., Калибровка и характеристика детектора RED-100 на Калининской атомной электростанции // Journal of Instrumentation. – 2024. – T. 19. – T11004. DOI: 10.1088/1748-0221/19/11/T11004.
11. Kostensalo J., Suhonen J., Zuber K. Spectral shapes of forbidden argon  $\beta$  decays as background component for rare-event searches // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. – 2018. – Vol. 45, Iss. 2. – P. 025202. – DOI: 10.1088/1361-6471/aa958e.