

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

УДК 531.3, 539.1.05

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Моделирование взаимодействий в нейтринном детекторе  
с помощью GEANT4

Руководитель НИР

д.ф.-м.н.,

ведущий научный сотрудник,

НИ Ц “Курчатовский институт” – ИФВЭ

\_\_\_\_\_ А. А. Соколов

Студент

\_\_\_\_\_ О. Д. Гавва

Москва 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	3
<b>1. Сцинтилляционный детектор</b>	
1.1 Принцип работы сцинтилляционного детектора	5
1.2 Принцип регистрации частиц в сцинтилляционном детекторе	5
1.3 Принцип светосбора в сцинтилляционном детекторе	8
<b>2. Описание пакета GEANT4</b>	10
<b>3. Моделирование детектора в GEANT4</b>	
3.1 Описание геометрии сцинтилляционного детектора	14
3.2 Этапы моделирования сцинтилляционного детектора в GEANT4	14
3.3 Визуализация детектора	17
<b>4. Моделирование прохождения частиц через детектор</b>	
4.1 Моделирование прохождения частиц через детектор в GEANT4	19
4.2 Примеры отклика детектора из полистирола	20
<b>5. Моделирование и регистрация нейтринных взаимодействий с помощью GEANT4</b>	
5.1 Заряженные и нейтральные токи	26
5.2 Моделирование нейтринных взаимодействий в детекторе	27
<b>Заключение</b>	30
<b>Список литературы</b>	31

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** На сегодняшний день одной из наиболее актуальных тем исследований в современной физике является изучение свойств нейтрино. Основной причиной этого можно считать невозможность описать наличие массы и осцилляций нейтрино с помощью Стандартной Модели частиц. Измерение параметров нейтрино, параметров нейтринных взаимодействий возможно, в частности, в ускорительных экспериментах. Здесь нейтринный пучок, формируемый с помощью ускорителя, падает на детектор, в котором регистрируются взаимодействия нейтрино. Изучая соответствующие события, можно выделить взаимодействия различных типов нейтрино ( $\nu_\mu$ ,  $\nu_e$ ,  $\nu_\tau$ ), различные типы их взаимодействий (взаимодействия через заряженный ток, через нейтральный ток). Статистический анализ измеренных событий позволит извлечь значения параметров матрицы смешивания нейтрино.

**Целью данной работы** является моделирование нейтринных взаимодействий в детекторе с помощью программного комплекса GEANT4.

Современные эксперименты по физике элементарных частиц и ядерной физике создают огромные проблемы при создании сложных, но надежных программных сред и приложений. Особое значение имеет постоянно растущий спрос на крупномасштабное, точное и всестороннее моделирование детекторов частиц, используемых в этих экспериментах. Спрос обусловлен растущими размерами, сложностью и чувствительностью детекторов и подпитывается доступностью недорогих высокопроизводительных компьютерных систем, на которых становится возможным более масштабное и сложное моделирование. Подобные соображения возникают и в других дисциплинах, таких как: радиационная физика, космонавтика, ядерная медицина и, по сути, в любой области, где взаимодействие частиц в веществе играет роль.

В ответ на это был разработан новый инструментарий объектно-ориентированного моделирования GEANT4. Инструментарий предоставляет разнообразный, обширный, но связный набор программных компонентов, которые можно использовать в различных условиях. Они варьируются от простых разовых исследований основных явлений и геометрии до полномасштабного моделирования детекторов для экспериментов на Большом адронном коллайдере и других объектах.

В данной работе будет описано моделирование взаимодействий в нейтринном детекторе с помощью пакета GEANT4.

# 1. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР

## 1.1 ПРИНЦИП РАБОТЫ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА

Сцинтилляционный детектор представляет собой сцинтиллятор, в котором ионизирующие частицы вызывают вспышку люминесценции, фотоэлектрического тока, и электронной системы, регистрирующей эти электрические импульсы. В простейшем случае вспышка света от сцинтиллятора затухает по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 e^{-t/\tau},$$

где  $I_0$  – амплитуда светового импульса, а  $\tau$  – время затухания свечения сцинтиллятора. Амплитуда зависит от энергии, поглощенной сцинтиллятором, - чем больше величина поглощенной энергии, тем выше амплитуда. Время затухания определяется типом сцинтиллятора, его внутренними характеристиками и процессами, протекающими во время преобразования высокой энергии частицы ионизирующего излучения в оптические фотоны. Идеальный сцинтиллятор должен иметь бесконечно малое время затухания свечения.

## 1.2 ПРИНЦИП РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЦ В СЦИНТИЛЛЯЦИОННОМ ДЕТЕКТОРЕ

Сцинтилляционный счетчик имеет две функции: он конвертирует вызываемое ионизирующими частицами возбуждение прозрачного материала в свет и проводит этот свет к фотокатоду. Механизм сцинтилляций совершенно различен для неорганических кристаллических сцинтилляторов и для органических сцинтилляторов, которые применяются в виде кристаллов, жидкостей и полимеризованных твердых тел.

Неорганические сцинтилляторы – это кристаллы, которые легированы центрами активации («цветными» центрами). Схема энергетических уровней для этого случая изображена на рис.1. Ионизирующие частицы образуют

свободные электроны, свободные дырки и экситоны (пары электрон - дырка). Эти возбужденные состояния распространяются в кристаллической решетке до тех пор, пока не встретят центр активации А. Он переводится в возбужденное состояние А\*, которое путем испускания квантов видимого света перейдет в основное состояние А.

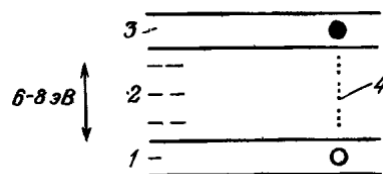


Рис.1. Зонная структура неорганических кристаллов. 1 – валентная зона; 2 – центры активатора; 3 – зона проводимости; 4 – экситоны.

Время высвечивания сцинтиллятора определяется временем жизни стабильного состояния А\*, которое зависит от температуры как  $\exp(-E_1/kT)$ , где  $E_1$  – энергия возбуждения состояния А\*.

В противоположность кристаллическим сцинтилляторам органические сцинтилляторы имеют очень короткое время высвечивания порядка нескольких наносекунд. Механизм сцинтилляций здесь не является эффектом решетки, а основан на возбуждении молекулярных уровней в основном флуоресцирующем материале, которое снимается путем испускания УФ-квантов. Поскольку длина поглощения УФ-квантов в большинстве прозрачных материалов мала (порядка нескольких миллиметров), световой сигнал удастся зарегистрировать только благодаря тому, что в сцинтиллятор добавляется примесь, в которой УФ-кванты превращаются в кванты видимого света (сместитель спектра). Этот второй флуоресцирующий материал выбирается таким образом, что его спектр поглощения соответствует спектру высвечивания основного сцинтиллятора, а длины волн его собственного излучения хорошо соответствуют спектральной чувствительности фотокатода. Оба активных компонента сцинтиллятора либо растворяются в органической жидкости, либо смешиваются с

мономером, образуя полимеризованный материал. Полимеризация может обеспечить любую желаемую форму материала. Наиболее часто употребляемой формой являются пластины, которые выпускаются толщиной от 0.5 до 30 мм и плотностью до  $2 \times 2 \text{ м}^2$ . Важными характеристиками сцинтиллятора являются световой выход и характерная длина поглощения.

Таблица 1. Характеристики некоторых сцинтилляторов

Сцинтиллятор	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\lambda_{\text{max}}$ , нм	выход, %	$\tau_f   \tau_s, \text{нс}(\%)$	примечание
<b>Орган. кристаллы</b>					
Антрацен ( $C_{14}H_{10}$ )	1.25	450	4	30 400	Макс.выход, непрочен
Стильбен ( $C_{14}H_{12}$ )	1.16	410	2.5	6 400 (20 ÷ 50)	большие рамеры
<b>Орган. жидк.</b>					
Толуол + РОРОР(1.5 г/л)	0.9	430	3	3	большие объемы
Ксилол + p-терфенил (5 г/л)	0.9	400	2	2	вреден кислород
<b>Пластмассы</b>					
Полистирол+ 36 г/л p-терфенил	0.9	360	1.2	3	рад. стойк. в 30-50 р.> чем у орг.кристал.
PS + 16 г/л тетра- фенилбутадиев	0.9	480	1.5	5	
<b>Неорг. крист.</b>					
$NaI(Tl)$	3.7	410	8 ÷ 13%	230	эталон выхода; гигроскопичен
$ZnS(Ag)$	4.1	450	28	100 10 <sup>4</sup>	рекорд выхода; порошок
$CsI(Tl)$	4.5	560	6	10 <sup>3</sup>	$X_0 = 1.9 \text{ см}$
$YAlO_3(Ce)$	5.6	350	5	28 10 <sup>4</sup>	быстрый
$BaF_2$	4.9	220 310	3	<1 620	очень быстрый
BGO ( $Bi_4Ge_3O_{12}$ )	7.1	490	2.5	60 300	очень плотный
PWO ( $PbWO_4$ )	8.3	420	0.1	4 50	$X_0 = 0.9 \text{ см}$
<b>Газ</b>					
$He+$ (на окне ФЭУ) дифенилстильбен		5	~ 1 от $NaI$	1-10 $\tau \propto 1/P$	при P=1 атм

В таблице 1 приведены некоторые характеристики для ряда материалов, используемых в качестве основного флуоресцирующего вещества и смесителей спектров. В качестве связующего материала для пластических сцинтилляторов используют полимеры из ароматических соединений или алифатические материалы. Ароматические сцинтилляторы

имеют примерно в два раза больший световой выход, чем алифатические, однако последние дешевле и более легко обрабатываются механически.

Пластические сцинтилляторы широко используются в больших калориметрах в форме длинных (порядка метров) и тонких (порядка миллиметров) полос. Здесь важно, чтобы световой выход был как можно более однороден вдоль всей длины, особенно когда свет собирается на фотокатод только на одном конце полосы. Ослабление света от сцинтиллятора вследствие эффекта самопоглощения наблюдается главным образом на коротковолновом участке спектра излучения.

### **1.3 ПРИНЦИП СВЕТОСБОРА В СЦИНТИЛЯЦИОННОМ ДЕТЕКТОРЕ**

Для сбора света от сцинтиллятора к фотокатоду в основном используются адиабатические световоды. Голубой свет распространяется вдоль пластического сцинтиллятора за счет многократного полного внутреннего отражения от поверхностей. Для полистирола показатель преломления  $n = 1.581$ , т.е. будут отражаться все лучи, распространяющиеся в пределах угла  $\pm 39^\circ$  относительно нормали. Обычно прямоугольные лобовые поверхности сцинтиллятора с поперечным сечением  $F$  соединяются с поверхностью фотокатода площадью  $f$  при помощи изогнутых полос из прозрачного пластика, причем радиус кривизны таких полос значительно больше, чем их толщина. Таким путем обеспечивается падение света на поверхность полос под углом относительно нормали, большим угла полного внутреннего отражения  $\alpha_g$ . Согласно теореме Луивилля, доля света, достигающая фотокатода, меньше  $f/F$ .

Временное разрешение собранных таким образом сцинтилляционных счетчиков определяется двумя величинами: временным разбросом пробега электронов в ФЭУ и многообразием путей распространения света в сцинтиляторе и в светопроводе. Вклад второй величины зависит главным



образом от размеров сцинтиллятора; для больших счетчиков с характерным размером ( $\sim 2$  м) он становится определяющим.

Альтернативный метод сбора света основан на методе Гарвина, разработанном для использования в адронном калориметре. Принцип этого метода заключается в том, что голубой свет от сместителя спектра (например, РОРОР) выходит из сцинтиллятора и через некоторый воздушный зазор освещает пластинку из органического стекла, активированного сместителем спектра. Этот флуоресцентный материал поглощает голубой свет и испускает изотропно зеленый флуоресцентный свет с длиной волны примерно 480 нм. Некоторая часть (10-15%) зеленого света благодаря полному внутреннему отражению остается в пластине и достигает закрепленного на ее торце фотокатода. Такие зеленые пластины в настоящее время нашли широкое применение в экспериментах при высоких энергиях.

Этот метод зеленых пластин может применяться для сбора света с больших счетчиков с помощью небольшого числа (порядка 4) ФЭУ. Дальнейшее применение метода зеленых пластин заключается в том, что свет собирается со счетчиков в виде сэндвичей свинец – сцинтиллятор. Недостатком сбора флуоресцентного света таким образом является то, что отклик в этом случае имеет две компоненты, среднее время жизни которых составляет 18 и 620 нс.

## 2. ОПИСАНИЕ ПАКЕТА GEANT4

GEANT4 — это набор инструментов для моделирования прохождения частиц через вещество. Он включает в себя полный набор функций, включая отслеживание, геометрию, физические модели и хиты. Предлагаемые физические процессы охватывают широкий спектр, включая электромагнитные, адронные и оптические процессы, 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. Он был разработан и сконструирован для демонстрации используемых физических моделей, обработки сложной геометрии и обеспечения легкой адаптации для оптимального использования в различных наборах приложений. Инструментарий является результатом международного сотрудничества физиков и инженеров-программистов. GEANT4 был создан с использованием программной инженерии и объектно-ориентированной технологии и реализован на языке программирования C++. Он имеет широкое применение в различных областях физики: в физике элементарных частиц, ядерной физике, конструкции ускорителей, космической технике и медицинской физике.

GEANT4 разработан с учетом потребностей программного обеспечения современных экспериментов. Типичная программная система содержит компоненты — генератор событий, моделирование детектора, реконструкцию и анализ, — которые можно использовать по отдельности или в комбинации.

GEANT4 подразумевает собой набор библиотек и классов, при помощи которых можно описать следующие аспекты компьютерного моделирования:

1. Тип и свойства используемых частиц. Например, класс *G4ParticleDefinition* позволяет задать такие свойства частицы как масса, спин, моды распада и т.д., а с помощью класса *G4DynamicParticle* возможно

реализовать такие динамические характеристики частиц, как энергия, момент количества движения, поляризация и другое.

2. Генерация первичных частиц. За создание первичных частиц отвечает класс *G4PrimaryGeneratorAction*, в котором существует возможность задавать тип, свойства, а также форму пучка.

3. Физические процессы, обуславливающие взаимодействие частиц. За данный аспект отвечает класс *G4PhysicsList*. В нем создаются все частицы, а также процессы, которые могут с ними происходить. Так как создание такого пакета является очень сложной процедурой, где нужно учитывать массу деталей, то обычно используют готовые пакеты, специализированные для определенных целей.

4. Получение информации о каждом событии, треках и ее хранение. Класс *G4Event* содержит информацию о каждом событии в процессе моделирования. Класс *G4Step* позволяет получить информацию о каждом шаге моделирования.

5. Задание геометрии системы. Основной класс, отвечающий за геометрию системы - это *G4DetectorConstruction*. Данный класс позволяет создавать компьютерную модель реального объекта, со всеми присущими ему свойствами, такими как размер, материал, относительное расположение частей и т.д.

6. Материалы, из которых состоит геометрия системы. Здесь пользователю предоставлен широкий простор для реализации нужных ему материалов, так как в GEANT4 предусмотрена возможность создавать материалы, начиная с создания элементов (класс *G4Element*). Далее из созданных элементов создается сам материал. Материал можно создавать несколькими способами, например, из элементов создать молекулы или смесь нескольких элементов с определенным весовым коэффициентом.

7. Задание чувствительных областей геометрии, при попадании частиц, в которые будет происходить анализ их движения. Эти операции можно определить посредством класса *G4SensitiveDetector*.

8. Визуализация. В GEANT4 существует возможность визуализировать геометрию и треки частиц в процессе моделирования с помощью следующих графических систем OpenGL, OpenInventor, HepRep, DAWN, VRML, RayTracer, ASCIITree. Выше приведены лишь основные аспекты компьютерного моделирования и соответствующие им классы.

В GEANT4 учитываются следующие физические процессы:

1. Электромагнитные взаимодействия:

- Процессы с участием гамма-квантов: фотоэффект (*G4PhotoElectricEffect*), комптоновское рассеяние (*G4ComptonScattering*), образование электрон-позитронных пар (*G4GammaConversion*), образование мюонных пар (*G4GammaConversionToMuons*), комптоновское рассеяние линейно поляризованных гамма-квантов (*G4PolarizedCompton*), рэлеевское рассеяние)

- Процессы, общие для всех заряженных частиц: многократное рассеяние (*G4MultipleScattering*), переходное излучение (*G4TransitionRadiation*), сцинтилляционный эффект (*G4Scintillation*), эффект Черенкова (*G4Cerenkov*), фотоабсорбционная ионизационная модель (*G4PAIModel*)

- Процессы с участием электронов и позитронов: ионизация (*G4eIonization*), тормозное излучение (*G4eBremsstrahlung*), аннигиляция позитронов в гамма-кванты (*G4eplusAnnihilation*), аннигиляция в мюоны (*G4eplusAnnihilationToMuPair*), синхротронное излучение (*G4SynchrotronRadiation*)

- Процессы с участием мюонов: ионизация (*G4MuIonization*), тормозное излучение (*G4MuBremsstrahlung*), мюонные фотоядерные взаимодействия, образование электрон-позитронных пар (*G4MuPairProduction*)

- Процессы с участием заряженных адронов: ионизация (*G4hIonisation*)

2. Процессы с участием адронов, сильное взаимодействие (лептон-адронные взаимодействия, сечения фотоядерных и электроядерных реакций, когерентное упругое рассеяние, взаимодействия тормозящихся частиц), а также множество узкоспециализированных моделей специфических физических процессов.

Компиляция программ, написанных средствами комплекса GEANT4, проходит по следующему сценарию: на первом этапе описывается геометрия системы, рассчитываются сечения взаимодействия всех используемых частиц, со всеми используемыми материалами, затем следует запуск определённого пользователем числа частиц - создание трека. При этом, пролёт частицы разбивается на события. По рассчитанной таблице сечений на каждом шаге движения проходит выбор и реализация одного из заданных процессов взаимодействия. Частица продолжает движение до полной потери энергии, если программистом не задана остановка частицы после какого-либо взаимодействия. При образовании в процессе моделирования вторичной частицы, далее идёт создание её трека по такому же сценарию, а затем программа возвращается к первичной частице. Моделирование не будет завершено пока не обработаны все частицы. На каждом из основных этапов программист может вызвать свою дополнительную функцию, при этом ей будет известна вся информация о состоянии и движении частицы: её конечная и потерянная энергия, координаты и многое другое. Эта информация и используется в дальнейшем для построения зависимостей.

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА В GEANT4

#### 3.1 ОПИСАНИЕ ГЕОМЕТРИИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА

Детектор, регистрирующий события взаимодействия нейтрино, состоит из последовательно чередующихся X- и Y-плоскостей. Общее количество плоскостей – 1332. Первая плоскость детектора - X-плоскость. X-плоскость состоит из 166 вертикально расположенных сцинтилляционных баров. Y-плоскость содержит 166 горизонтально расположенных баров. Каждый бар представляет собой сцинтилляционный параллелепипед размером 30 x 30 x 4996.6 мм обернутый майларом толщиной 50 мкм. В центре сцинтиллятора находится WLS фибер диаметром 1.5 мм. Таким образом полный физический размер бара составляет 30.1 x 30.1 x 4996.6 мм. На рисунке 2 представлен схематический вид детектора.

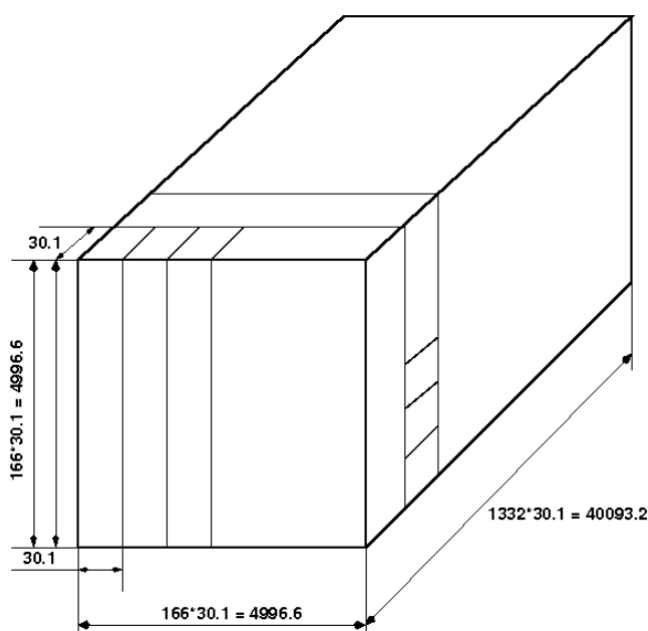


Рис.2. Схематический вид детектора с размерами.

#### 3.2 ЭТАПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА В GEANT4

Для проведения моделирования была написана программа, описывающая данный сцинтилляционный детектор. Описание детектора

происходит в файле DetectorConstruction.cc. Сначала определяется конструктор класса World, он принимает значения ширины, высоты, глубины и материала, данный класс создает материнский объем, в котором будут располагаться элементы установки.

```
G4Box* solidWorld = new G4Box("World", xWorld, yWorld, zWorld);
```

```
G4LogicalVolume* logicWorld = new G4LogicalVolume (solidWorld,  
world_mat, "World");
```

```
G4VPhysicalVolume* physWorld = new G4PVPlacement(0, G4ThreeVector(),  
logicWorld, "World", 0, false, 0, true);
```

#### Листинг 1. Задание параметров класса World

После описания материнского объема установки, необходимо описать последовательно чередующиеся X- и Y-плоскости, которые в свою очередь состоят из сцинтилляционных баров с заданными параметрами.

```
G4Material* scint_mat = nist->FindOrBuildMaterial("G4_POLYSTYRENE"); //  
материал сцинтиллятора
```

```
G4Material* obol_mat = nist->FindOrBuildMaterial("G4_MYLAR"); //  
наружная оболочка сцинтиллятора
```

```
G4int Nbars = 1332; // количество плоскостей
```

```
G4int Nplanes = 166; // количество баров
```

```
G4double bar_size_x = 3;
```

```
G4double bar_size_x1 = 3.01;
```

```
for(G4int i=0; i<Nplanes; i++)
```

```
{
```

```
    for(G4int j=0; j<Nbars; j++)
```

```
        {
```

*// описание сцинтилляторов*

```
G4Box *solidScintillator = new G4Box("solidScintillator", 30.*mm, 4996.6*mm,  
30.*mm);
```

```
G4LogicalVolume *logicScintillator = new G4LogicalVolume(solidScintillator,  
scint_mat, "logicScintillator");
```

```
G4VPhysicalVolume *physScintillator = new G4PVPlacement(0, G4ThreeVector(-  
476.*cm+2*bar_size1*j*cm, 0*cm, -20.*cm + 4*bar_size1*i*cm),  
logicScintillator, "physScintillator", logicScintillator3, false, 0, true);
```

```
G4Box *solidScintillator2 = new G4Box("solidScintillator2", 4996.6*mm,  
30.*mm, 30.*mm);
```

```
G4LogicalVolume *logicScintillator2 = new G4LogicalVolume(solidScintillator2,  
scint_mat, "logicScintillator2");
```

```
G4VPhysicalVolume *physScintillator2 = new G4PVPlacement(0,  
G4ThreeVector(0.*cm, -476.*cm+2*bar_size1*j*cm, -26.*cm +  
4*bar_size1*i*cm), logicScintillator2, "physScintillator2", logicScintillator3,  
false, 0, true);
```

*//описание WLS фибера*

```
G4Orb *solidWLS= new G4Orb("solidScintillator", 1.5*mm);
```

```
G4LogicalVolume *logicWLS = new G4LogicalVolume(solidWLS, scint_mat,  
"logicWLS");
```

```
G4VPhysicalVolume *physWLS = new G4PVPlacement(0, G4ThreeVector(0*cm,  
0*cm, 0*cm), logicWLS, "physScintillator", logicScintillator, false, 0, true);
```

```
}
```

```
}
```

Листинг 2. Описание свойств плоскостей и баров.



### 3.3 ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА

После изучения используемых конфигураций с помощью программного пакета GEANT4 была воссоздана визуализация геометрии детектора согласно рисункам 3, 4. На рисунке 5 представлен тот же детектор, но меньших размеров и параметров.

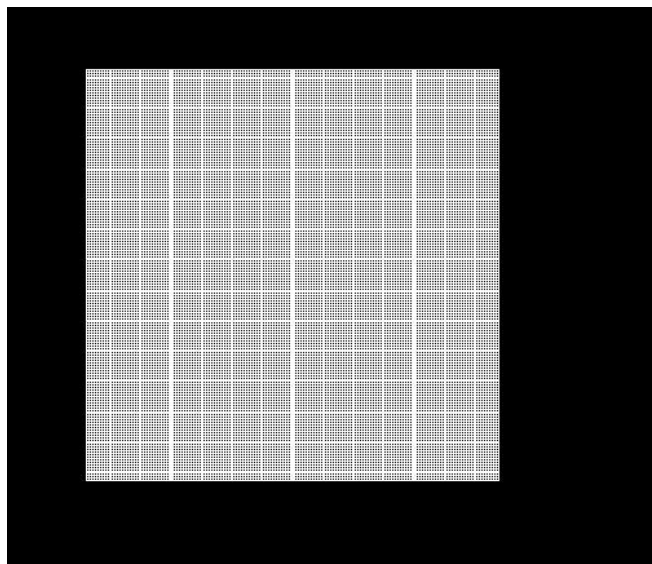


Рис.3. Визуализация детектора (вид сверху)

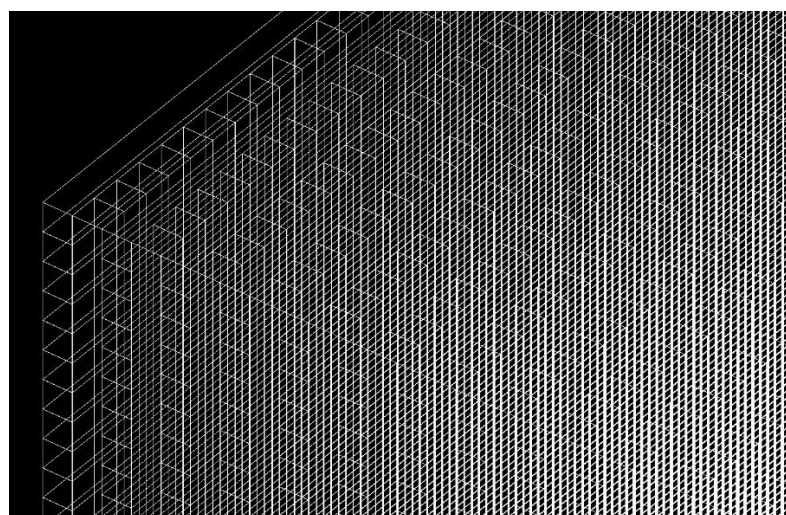


Рис.4. Визуализация детектора (вид сбоку)

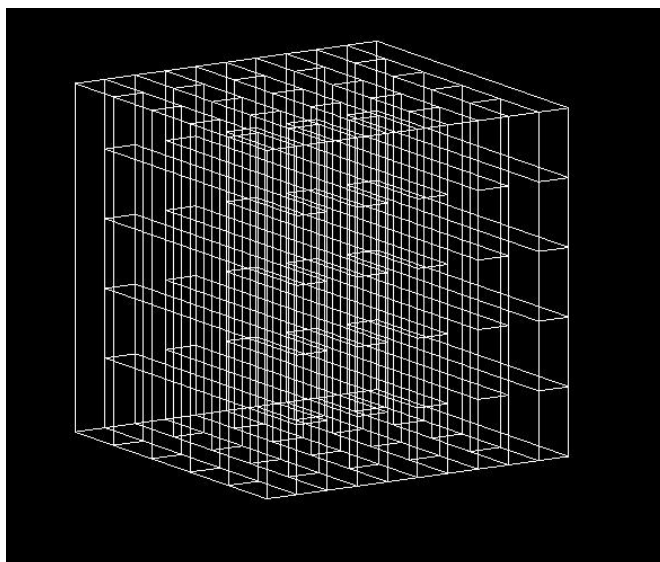


Рис.5. Визуализация того же детектора меньших размеров и параметров

## 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ДЕТЕКТОР

### 4.1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ДЕТЕКТОР В GEANT4

После моделирования геометрии детектора необходимо создать моделирование прохождения через него частиц. При прохождении частицы через вещество, в результате ее взаимодействия проявляются следы, которые можно измерить, в данном случае с помощью сцинтилляций. Эти следы регистрируются, усиливаются, преобразуются и оцифровываются. На их основе восстанавливается картина события.

События взаимодействия частиц в веществе детектора генерируются с использованием пакета GEANT4. Для этого в коде моделирования необходимо запустить нужную частицу в точку взаимодействия, равномерно распределенную по всему детектору. При взаимодействии частиц, образованных в таких событиях, с веществом выделяется энергия, конвертируемая в фотоны. Образованные фотоны регистрируются в барах детектора. Каждый бар имеет два фотоприемника (на обоих концах). Монте Карло генерирует количество фотоэлектронов на каждом из фотоприемников.

```
PrimaryGeneratorAction::PrimaryGeneratorAction()  
  
{  
  
fParticleGun = new G4ParticleGun(1);  
  
G4ParticleTable* particleTable = G4ParticleTable::GetParticleTable();  
  
G4String particleName = "mu-";  
  
G4ParticleDefinition* particle = particleTable->FindParticle("mu-");  
  
fParticleGun->SetParticleDefinition(particle);
```

```

fParticleGun->SetParticleMomentumDirection(G4ThreeVector(0.,0.,0.));

fParticleGun->SetParticleEnergy(1*GeV);

}

```

Листинг 3. Моделирование прохождения частицы через детектор на примере мюона.

Визуализация моделирования прохождения отрицательного мюона через детектор показана на рис.6.

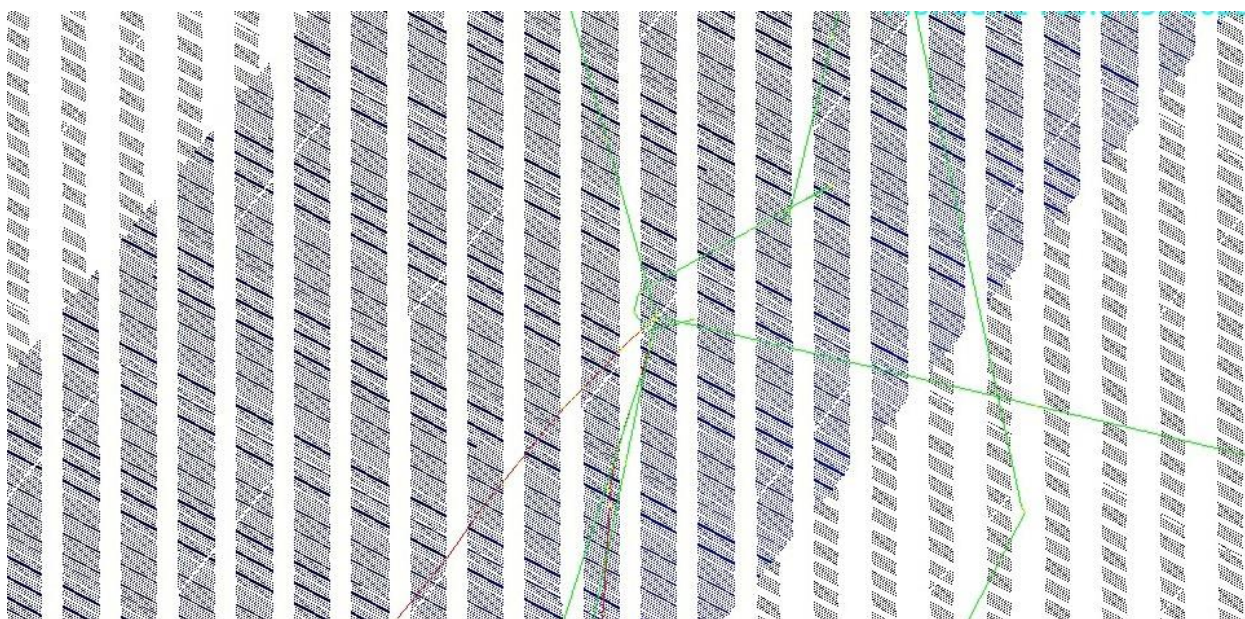


Рис.6. Моделирование прохождения отрицательного мюона через детектор

Красный трек это мюонный трек который регистрируется в детекторе, а зеленые треки это треки нейтральных частиц, которые “не высвечиваются” в детекторе.

## 4.2 ПРИМЕРЫ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРА ИЗ ПОЛИСТИРОЛА

Рассмотрим также регистрацию частиц различного типа детектором из полистирола с отличающейся геометрией. В качестве детектора использовался монолит из полистирола с размерами  $500 \times 500 \times 4000 \text{ см}^3$ . В качестве отклика детектора использовалось энерговыделение в кубиках размером  $3 \times 3 \times 3 \text{ см}^3$ , которое “проектировалось” на плоскости XZ и YZ.

Сигнал от кубика регистрировался при энергосодержании в нем  $> 1$  МэВ. Ниже будут показаны проекции на плоскости XZ и YZ треков различного типа, зарегистрированных детектором. Все картинки будут приведены при бинировании и отбору по энергосодержанию: бина размером  $3 \times 3$  см<sup>2</sup> и энергосодержание  $> 1$  МэВ. Числа на осях соответствуют сантиметрам. Сначала будут приведены картинки, полученные для отдельных частиц различного типа ( $e$ ,  $\mu$ ,  $\pi^\pm$ ,  $\pi^0$ ,  $p$  и  $n$ ), образованных в  $\nu_\mu N$  взаимодействиях с импульсом нейтрино  $P = 2$  ГэВ. Средние импульсы этих частиц в таких взаимодействиях, полученные в генераторе GENIE таковы:

для  $e$  и  $\mu$  – 1 ГэВ;

для  $p$  и  $n$  – 0.6 ГэВ;

для  $\pi^\pm$  и  $\pi^0$  – 0.4 ГэВ.

Приведенные величины соответствуют  $P_z$ . Чтобы иметь в разных проекциях немного разный наклон исходного трека, добавлялся  $P_x = 50$  МэВ. Полученные частицы помещались в центр детектора (точка с координатами 0.,0.,0).

На рисунке 7 представлены проекции для взаимодействия электронов в материале детектора.

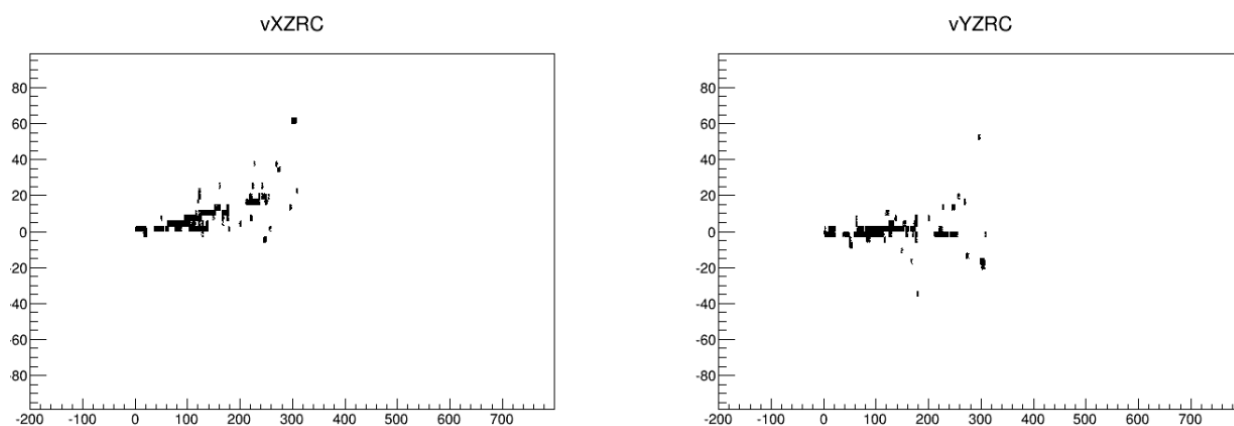


Рис.7. Взаимодействие электронов.

На рисунке 8 представлены проекции для взаимодействия позитронов в материале детектора. В общем-то, они не отличаются (как следовало ожидать) от картинок с электронами.

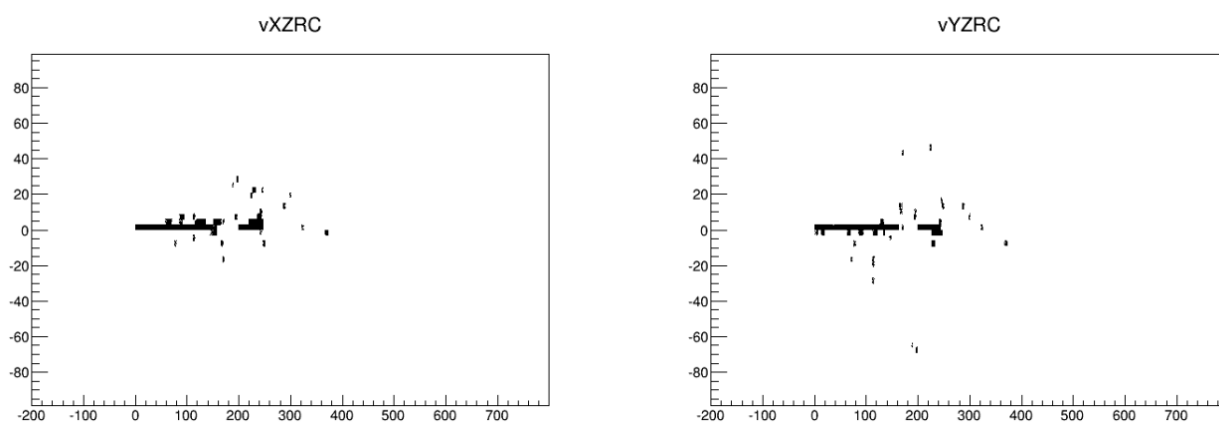


Рис.8. Взаимодействие позитронов.

На рисунке 9 представлены проекции для взаимодействия  $\pi^0$ .

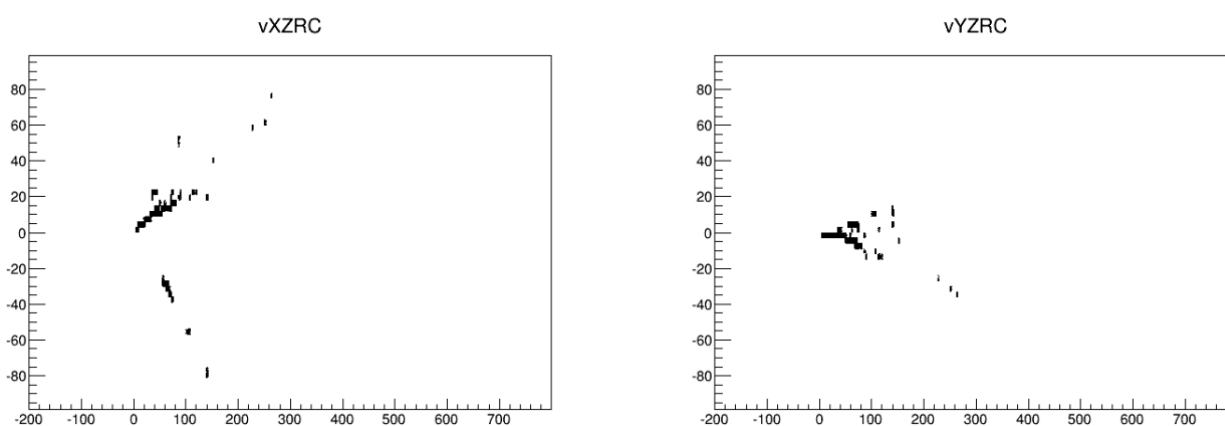


Рис.9. Взаимодействие  $\pi^0$ .

На рисунках 10,11 представлены проекции для взаимодействия  $\pi^-$ .

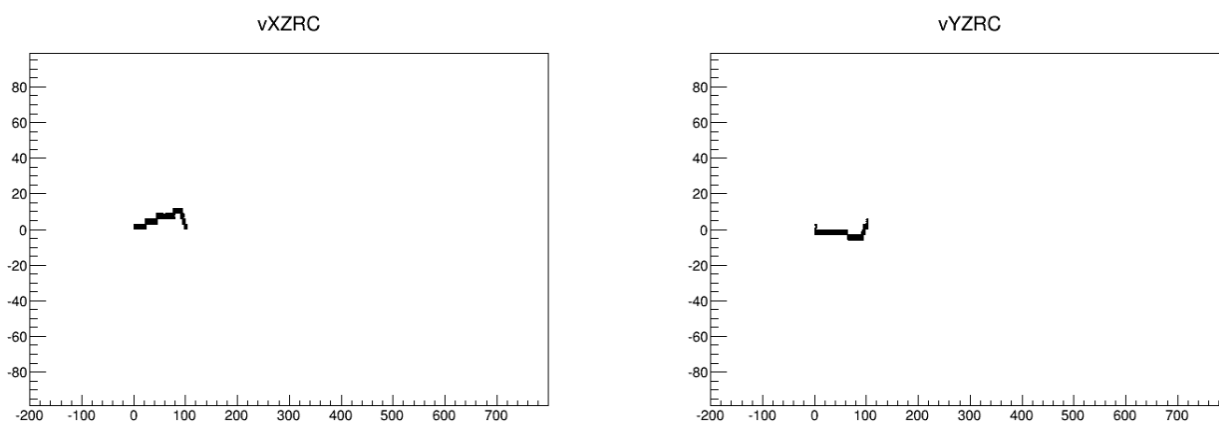


Рис.10. Взаимодействие  $\pi^-$ .

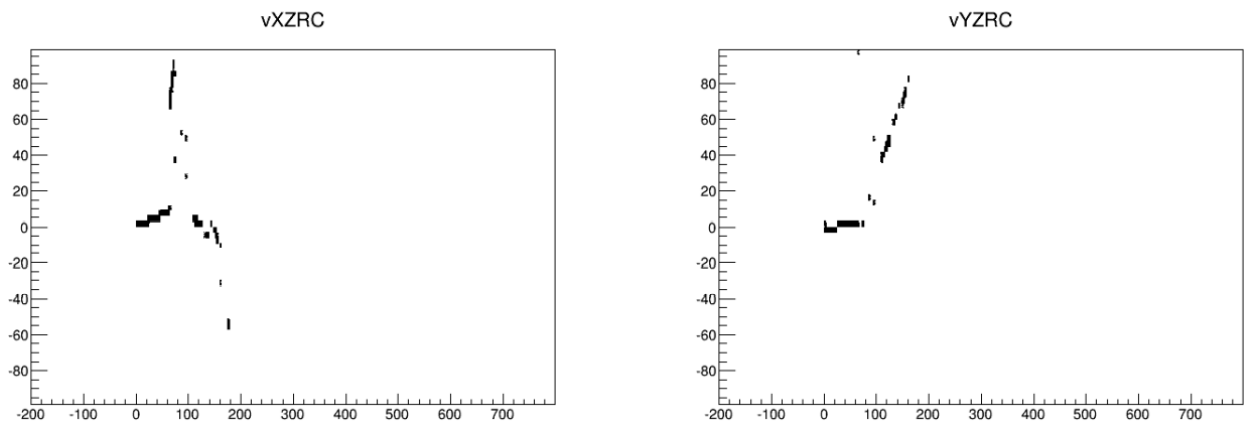


Рис.11. Взаимодействие  $\pi^-$ .

Видно, что  $\pi^-$  испытывают как просто ионизационные потери (рис.10), так и перезарядку (рис.11).

Взаимодействия  $\pi^+$  приведены на рисунках 12,13. И их поведение похоже на поведение  $\pi^-$ .

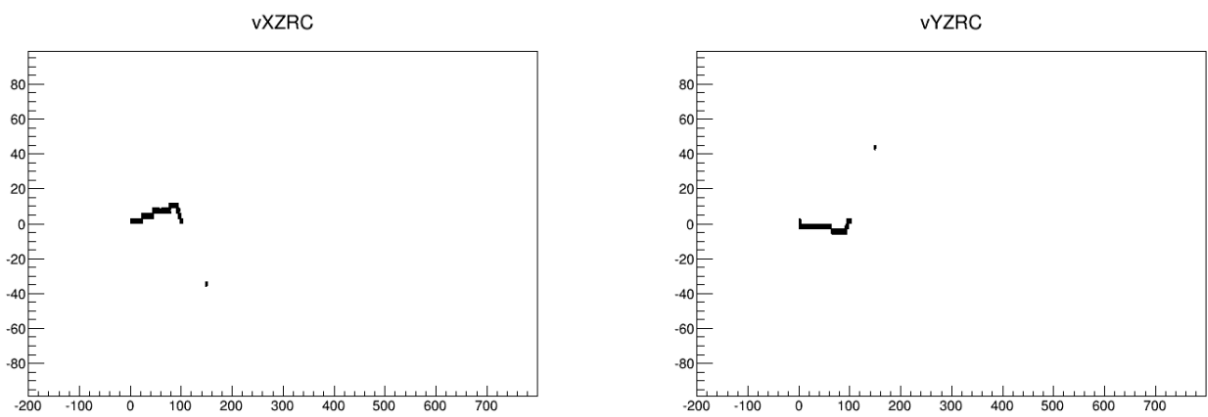


Рис.12. Взаимодействие  $\pi^+$ .

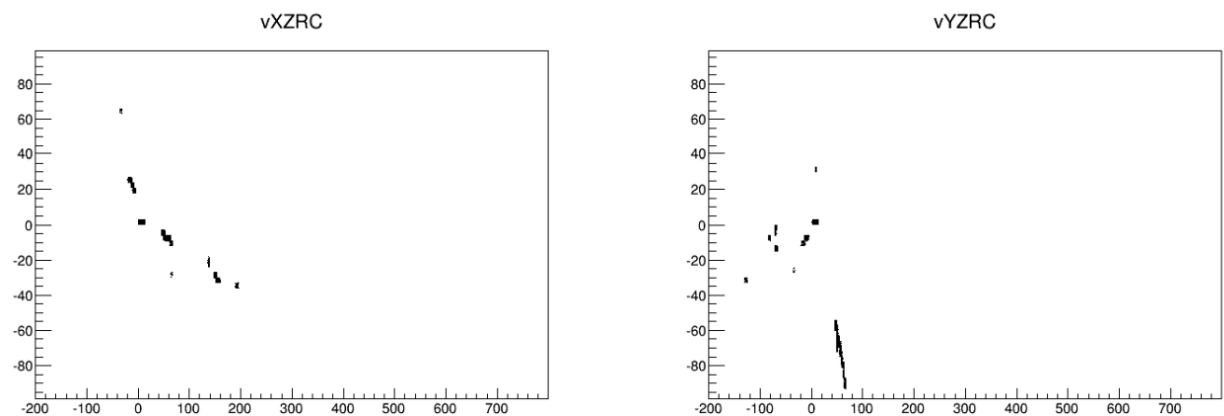


Рис.13. Взаимодействие  $\pi^+$ .

Наиболее хорошо, конечно выглядят мюоны. На рисунке 14 приведены картинки для взаимодействия  $\mu^-$ . Взаимодействия для  $\mu^+$  выглядят совершенно аналогично.

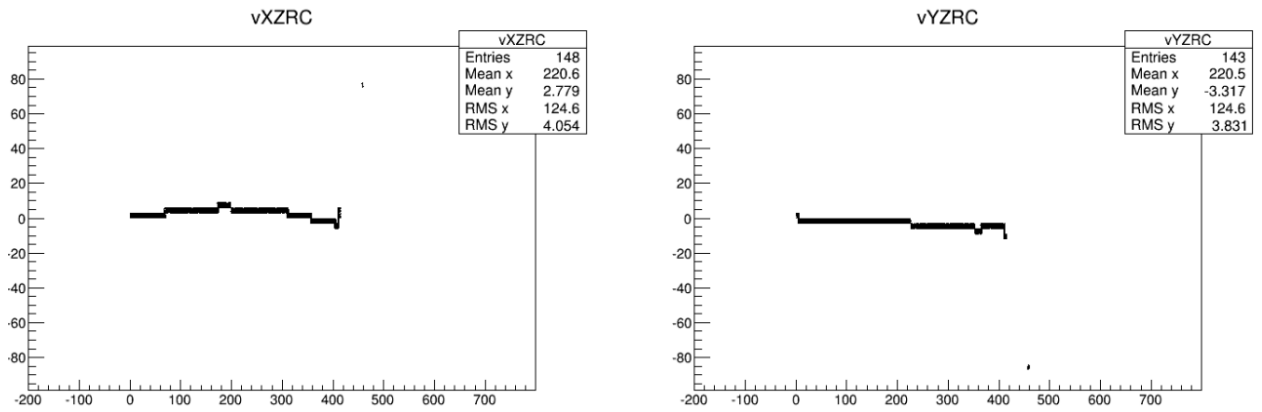


Рис.14. Взаимодействие  $\mu^-$ .

Хорошо видны остановки мюонов и их распад.

На рисунке 15 приведены примеры взаимодействия протонов.

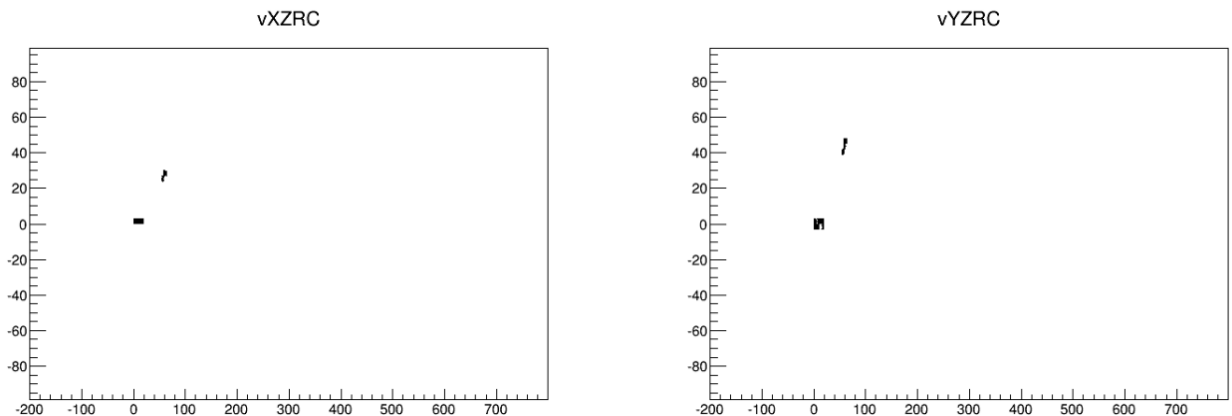


Рис.15. Взаимодействие протона.

В основном протоны дают очень короткий трек и не более чем в 10% событий наблюдается вторичное взаимодействие. Такой короткий трек обусловлен, по всей видимости, тем, что протоны с импульсом 0.6 ГэВ имеют кинетическую энергию  $\sim 170$  МэВ:

$$T_{kin} = \sqrt{M^2 + P^2} - M ,$$



и практически сразу находятся в районе пика Брэгга, что приводит в большому ионизационным потерям.

На рисунке 16 приведены примеры взаимодействия нейтронов.

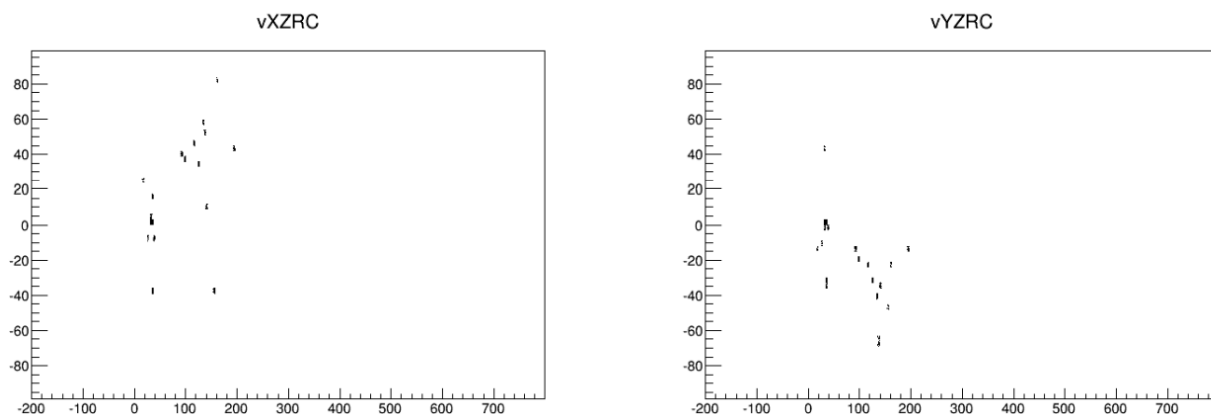


Рис.16 Взаимодействие нейтрона.

Картинки выглядят очень интересно. Необходимо проследить, какие взаимодействия происходят с нейтроном (и возможными вторичными продуктами). Конечно, можно предположить, что нейтрон “бродит” в детекторе, испытывая упругие соударения с ядрами и иногда вызывая адронные взаимодействия и ионизацию.

## 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРИННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ С ПОМОЩЬЮ GEANT4

### 5.1 ЗАРЯЖЕННЫЕ И НЕЙТРАЛЬНЫЕ ТОКИ

В 1960-х годах была построена единая теория слабого электромагнитного взаимодействия, которая получила замечательные экспериментальные подтверждения в 1970-х и 80-х годах. Теория электромагнитного взаимодействия – квантовая электродинамика – стала при этом одной из ветвей единой теории так называемого электрослабого взаимодействия. Другой ветвью этой единой теории стала теория слабого взаимодействия.

Хорошо известно, что электромагнитное взаимодействие обусловлено взаимодействием электромагнитного тока с фотонами. Аналогично этому слабое взаимодействие обусловлено взаимодействием слабых токов с так называемыми промежуточными бозонами:  $W^\pm$ ,  $Z^0$ . Главное отличие слабого взаимодействия от электромагнитного заключается в том, что фотон безмассовый, а промежуточные векторные бозоны очень тяжелые: они примерно в 100 раз тяжелее протона.

Слабые токи, испускающие и поглощающие  $W$ -бозоны, называются заряженными токами, поскольку они меняют заряды входящих в них частиц. Примером таких токов является распад мюона  $\mu \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_\mu$ , путем обмена виртуальным  $W$ -бозоном.

Источником  $Z^0$ -бозонов являются нейтральные токи, в которых входящие и выходящие частицы одинаковы. Нейтральные токи дают, например, рассеяние  $\nu_\mu e \rightarrow \nu_\mu e$ .

Как заряженные, так и нейтральные токи содержат лептонную и адронную части. В настоящее время известно шесть лептонов, которые естественным образом разбиваются на три пары: электрон, мюон, тау-лептон

и соответствующие им электронное, мюонное и тау- нейтрино. В заряженный лептонный ток  $j_l$  каждый из лептонов входит со своим нейтрино:

$$j_l = \overline{e}v_e + \overline{\mu}v_\mu + \overline{\tau}v_\tau.$$

Этот ток испускает  $W^+$ -бозоны и поглощает  $W^-$ -бозоны. Эрмитово-сопряженный ток

$$j_l^+ = \bar{\nu}_e e + \bar{\nu}_\mu \mu + \bar{\nu}_\tau \tau$$

испускает  $W^-$ -бозоны и поглощает  $W^+$ -бозоны. Указанные выше лептонные токи описывают одновременно процессы как с участием лептонов ( $e^-$ ,  $\mu^-$ ,  $\tau^-$ ,  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ ) так и с участием антилептонов ( $e^+$ ,  $\mu^+$ ,  $\tau^+$ ,  $\bar{\nu}_e$ ,  $\bar{\nu}_\mu$ ,  $\bar{\nu}_\tau$ ), что обусловлено свойствами входящих в них операторов. Так, например, оператор  $\bar{e}$  рождает электрон и уничтожает позитрон, а оператор  $e$  рождает позитрон и уничтожает электрон. Аналогично действуют и операторы других частиц.

## 5.2 МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРИННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ДЕТЕКТОРЕ

Мы рассматриваем регистрацию в детекторе нейтринных реакций различных типов  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ . Импульс нейтрино равен 2 ГэВ.

В программе GEANT4 не предусмотрено моделирование взаимодействий нейтрино с нуклонами (ядрами), поэтому для розыгрыша событий от таких взаимодействий необходимо получать 4-х импульсы частиц, образованных в реакции, из других источников. Для получения 4-х импульсов частиц использовалась программа GENIE. Используя полученные параметры реакций, была промоделирована регистрация в детекторе нейтринных реакций взаимодействия  $\nu_\mu N$ ,  $\nu_e N$  через заряженный ток и реакций  $\nu_{\mu,e} N$  через нейтральный ток, проиллюстрированная на рисунках 17,18,19.

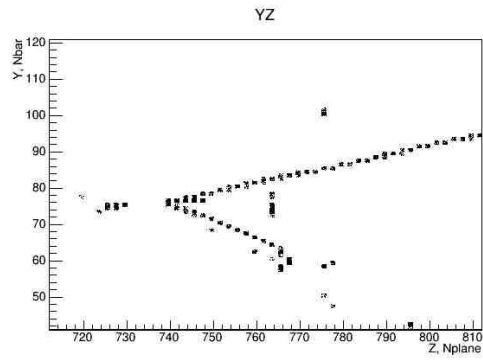
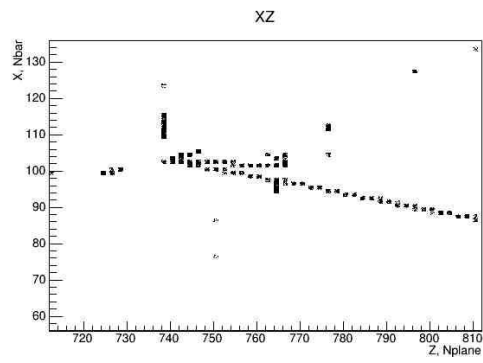


Рис.17. Реакция взаимодействия  $\nu_\mu N$  через заряженный ток.

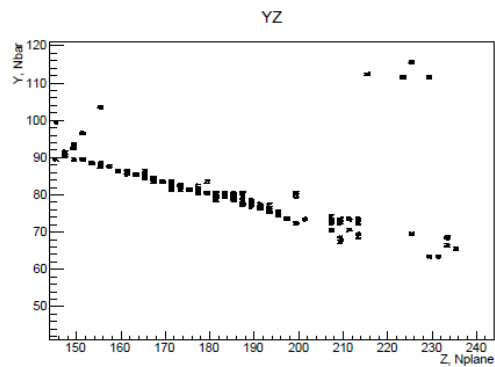
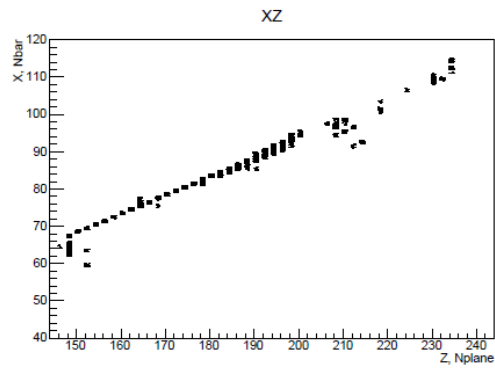


Рис.18. Реакция взаимодействия  $\nu_e N$  через заряженный ток.

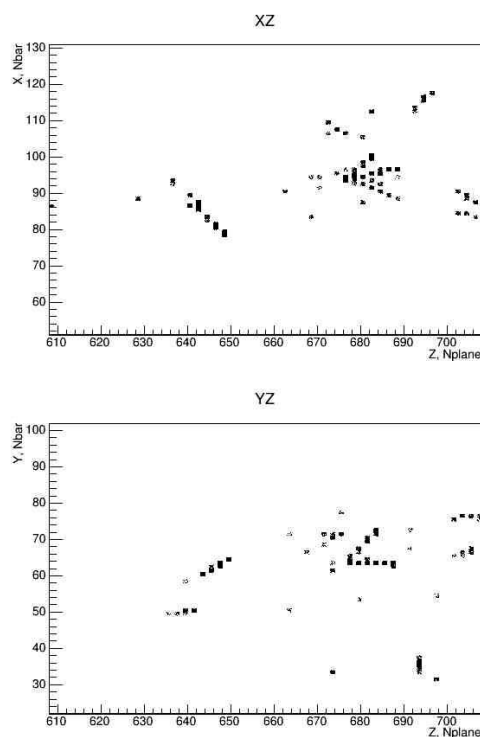


Рис.19. Реакция взаимодействия  $\nu_{\mu,e}N$  через нейтральный ток.

Визуальная оценка показывает, что вид реакций взаимодействия  $\nu_{\mu}N$ ,  $\nu_eN$  через заряженный ток и реакций  $\nu_{\mu,e}N$  через нейтральный ток, зарегистрированных в детекторе, значительно различается, что позволит провести разделение различных типов нейтринных взаимодействий в рассмотренном детекторе.

Изучая соответствующие события, в эксперименте по изучению нейтринных осцилляций можно выделить взаимодействия различных типов нейтрино ( $\nu_{\mu}$ ,  $\nu_e$ ,  $\nu_{\tau}$ ), различные типы их взаимодействий (взаимодействия через заряженный ток, через нейтральный ток). Статистический анализ измеренных событий позволит извлечь значения параметров матрицы смешивания нейтрино.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы:

- установлен программный комплекс GEANT4 на персональный компьютер (операционная система Ubuntu);
- освоены основные элементы работы с этим пакетом;
- создана геометрия нейтринного сцинтилляционного детектора;
- промоделировано прохождение и регистрация в детекторе частиц различных типов;
- промоделирована регистрация в детекторе нейтринных реакций различных типов  $\nu_{\mu}N$ ,  $\nu_eN$  через заряженный ток и через нейтральный ток.

Визуальная оценка показывает, что вид реакций взаимодействия  $\nu_{\mu}N$ ,  $\nu_eN$  через заряженный ток и реакций  $\nu_{\mu,e}N$  через нейтральный ток, зарегистрированных в детекторе, значительно различается, что позволит провести разделение различных типов нейтринных взаимодействий в рассмотренном детекторе. Таким образом, проведение нейтринного эксперимента на подобном детекторе позволит провести исследование, например, нейтринных осцилляций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Окунь Л.В., “Лептоны и кварки”, II издание, Москва “Наука”, 1990.  
– 325 стр.
2. Клайнкнехт К., “Детекторы корпускулярных излучений”: пер. с нем. –  
Москва: Мир, 1990. – 224 с.
3. Brun, R. GEANT. Detector description and simulation tool. User'Guide / R.  
Burn et al.– CERN. Geneva. Switzerland, 1993.– 465 p.
4. Allison J. Geant4 Developments and Applications, IEEE Trans. Nucl. Sci.,  
2006.