

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

УДК 539.1.074.23

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Моделирование детектора переходного излучения на основе GaAs с
помощью программного пакета Geant4**

Научный руководитель

доцент

Студент

_____ В. О. Тихомиров

_____ А. Н. Морозихин

Москва 2021

Предисловие

В 2021 году, на территории Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН), проводился тест детектора переходного излучения - TestBeam2021. Данный эксперимент проводился с целью изучить возможность разделения каонов и протонов в пределах TeV энергий с помощью детектора на основе GaAs. Для этого было произведено детальное изучение радиаторов и геометрии детектора. Для исследований был использован протонный пучок ускорителя SPS, который после рассеяния на специальных мишенях становился электронно-пионным.

Как уже говорилось эксперимент проводился с целью изучения возможности разделения частиц с помощью GaAs. В основе этого лежит различие γ -фактора для каждого типа частиц, что приводит к рождению фотонов переходного излучения различных энергий.

В данной работе представлены промежуточные результаты моделирования детектора переходного излучения на основе GaAs с помощью программного пакета Geant4.

Отчет состоит из четырех глав, за которыми следует список изученной в процессе работы литературы и материалов, используемых в процессе моделирования. **Главы 1-2** носят вводный характер и описывают основные принципы, лежащие в основе работы полупроводниковых детекторов, а также формируют представление о физике процесса переходного излучения. **Глава 3** описывает всю проделанную на данный момент работу. Полученные результаты представлены в **Главе 4**, где, также, представлен их краткий анализ. В **Главах 6-7** подводятся промежуточные итоги, а также формируются план дальнейшей работы.

Содержание

Цель и задача	3
1 Переходное излучение	4
1.1 Физика процесса	4
2 Полупроводниковые детекторы	6
2.1 Введение	6
2.2 Принцип работы полупроводникового детектора	6
2.3 GaAs - полупроводник	7
2.4 TimePix3	8
2.5 Заключение к Главе 2	9
3 Geant4 моделирование детектора переходного излучения	10
3.1 Введение	10
3.2 Изучение геометрии детектора	10
3.2.1 Конфигурации эксперимента TestBeam2021	10
3.2.2 Описание геометрии в программном пакете Geant4	11
3.3 Заключение к Главе 3	13
4 Результаты моделирования	14
4.1 Представление результатов	14
4.2 Заключение к Главе 4	19
5 Заключение и выводы	20
Список используемых источников	20

Цель и задачи

Основной целью и задачей представленной работы является описание эксперимента проведенного в 2021 в ЦЕРН с помощью программного пакета Geant4. Произвести полное моделирование, получить необходимые результаты обработать их и сопоставить полученным реальным данным. Написание данной модели, в дальнейшем, должно упростить создание новых систем по регистрации ПИ, включающих в себя пиксельные детекторы на основе *GaAs*.

Также одной из основных задач является подробное изучение данного типа детектора, с целью дальнейшего совершенствования процесса моделирования.

1 Переходное излучение

Фотоны переходного излучения (ПИ) испускаются, когда релятивистская частица пересекает неоднородную среду, в частности, границу между материалами с различными диэлектрическими проницаемостями - эффект, впервые предсказанный и описанный Гинзбургом и Франком в 1945 году.

Явление изучалось в последующие десятилетия, пока особенно не привлекло внимание ученых. Экспериментаторы показали возможность создания функциональных детекторов переходного излучения (TRDs) в начале 70-х годов, что привело к активному их использованию. Сегодня используются различные TRD, в основном в экспериментах по физике высоких энергий (ATLAS, ALICE), а также и в космических астрофизических экспериментах (PAMELA, AMS).

1.1 Физика процесса

Энергия, излучаемая, когда частица с зарядом Ze пересекает границу между вакуумом и средой с плазменной частотой ω_p , равна:

$$I = \frac{\alpha z^2 \gamma \hbar \omega_p}{3}, \quad (1.1)$$

где

$$\hbar \omega_p = \frac{\sqrt{4N_e r_e^3 m_e c^2}}{\alpha} \quad (1.2)$$

Здесь N_e - концентрация электронов в среде, r_e - классический радиус электрона. Для полипропилена $\hbar \omega_p = 20eV$

Таким образом, это излучение дает возможность идентифицировать высоко релятивистские частицы, где черенковское излучение или измерения ионизации уже не дают высокой степени классификации. Угловое распределение переходного распределения имеет широкий пик при $\theta = 1/\gamma$, где θ - угол отложенный от направления движения излучающей частицы. Излучение от одной пленки непосредственно зависит от квадрата разности

ω_p двух сред. При этом среднее число излучаемых фотонов:

$$\langle N \rangle \approx \frac{\alpha \gamma \hbar \omega_p}{\hbar \langle \omega \rangle} \quad (1.3)$$

откуда видно, что число фотонов пропорционально $\alpha \gamma$, где $\alpha = 1/137$, а γ - соответствующий γ -фактор. Как факт, энергетический спектр энергий фотонов переходного излучения имеет широкий пик около $10 - 35 \text{ keV}$.

2 Полупроводниковые детекторы

2.1 Введение

Полупроводниковые детекторы ядерных излучений (ППД) находят в настоящее время все большее и большее применение в физике высоких энергий - разнообразных научных исследованиях, прикладной технике.

Основное применение ППД в физике высоких энергий на ускорителях в настоящее время связано с их использованием в трековых приборах, расположенных в непосредственной близости к области взаимодействий частиц. Для таких детекторов одной из важнейших характеристик является радиационная стойкость, отчего становится возможным регистрация ядерных излучений.

2.2 Принцип работы полупроводникового детектора

В проводимом эксперименте использовался полупроводниковый пиксельный полупроводниковый детектор. Данный тип детекторов основан на работе обычного полупроводникового детектора. Далее рассмотрим основные особенности пиксельных детекторов.

Линейные размеры для такого типа детекторов обычно находятся в диапазоне $50 - 100 \mu m$. В структуре пиксельных детекторов типа $p^+ - n$ чувствительная толщина в большинстве случаев не превышает $500 \mu m$, однако такая толщина является не достаточно эффективной для регистрации высокоэнергетических квантов рентгеновского излучения. Типовая структура полупроводникового пиксельного детектора изображена на рисунке 1.

В качестве рабочего вещества полупроводниковых детекторов использую широкий спектр материалов, среди которых, самыми распространёнными являются детекторы на основе Si и Ge .

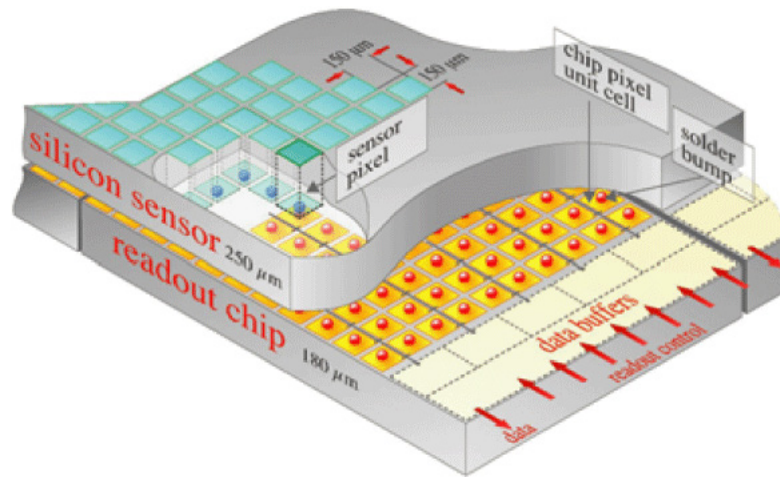


Рисунок 1 — Схема устройства пиксельного детектора

2.3 GaAs - полупроводник

Среди используемых соединений для полупроводниковых детекторов также используется *GaAs*. Далее речь пойдет об его основных свойствах. Интерес к данному соединению мотивирован использованием детектора именно с таким соединением в эксперименте.

Арсенид галлия (*GaAs*) обладает самой высокой подвижностью электронов, однако время их жизни очень мало, поэтому в спектрометрии используют достаточно тонкие детекторы. Важными преимуществами *GaAs* являются однородность свойств материала и изготовление образцов большой площади, по сравнению с другими типами соединений.

Детекторы на основе *GaAs* рассчитаны на использование в области энергий $E_\gamma \leq 100 \text{ keV}$. Считается, что фотоны с энергиями $10 - 30 \text{ keV}$ поглощаются в *GaAs* эффективнее, чем в *CdTe* (другое распространенное соединение).

В целом большой интерес к *GaAs* для детектирования частиц высоких энергий проявляется в CERN, хотя данное соединение не обладает высокой радиационной стойкостью. После облучения детектора на основе данного соединения протонами с импульсом $20 \text{ GeV}/c$ потоком $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ эффективность сбора заряда на детекторе падал в два раза.

2.4 TIMEPIX3

Для различных областей применения на базе CERN был разработан детектор на основе чипа TimePix3 (рисунок 2 - в центре изображения, крупным планом чувствительная область детектора). Данный чип и соответсвуй-

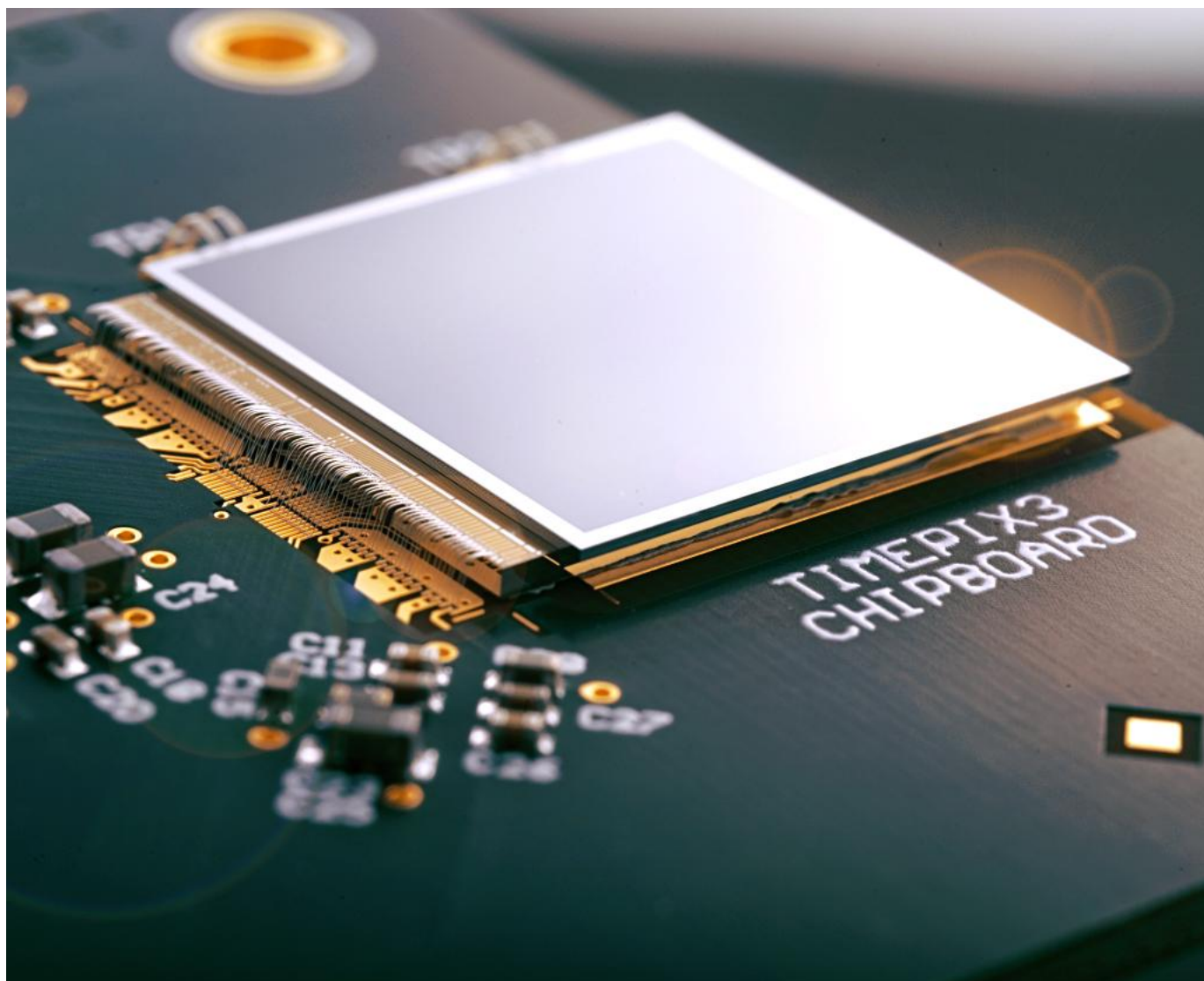


Рисунок 2 — Изображение TimePix3

щий детектор на его основе содержит 256×256 квадратных пикселей с шагом в $55 \mu m$ на площади $1.4 \times 1.4 \text{ cm}$. Толщина чувствительной области детектора $500 \mu m$. В каждый пиксель входят малошумящий усилитель, дискриминатор с регулируемым порогом и счетчик, аккумулирующий количество попаданий частиц в пиксель в течении определенного, задаваемого программно, времени.

2.5 Заключение к Главе 2

Полупроводниковые детекторы имеют широкое применение в различных областях науки и техники. Вариативность исполнения формирует набор из универсальных детекторов, подходящих для работы с любым типом излучения, большого спектра энергий, способных работать даже в самых неблагоприятных условиях (высокий радиационный фон). Характерная для пиксельных детекторов высокая разрешающая способность, сама по себе, организация пиксельного детектора способствуют решению различных задач, в том числе и идентификацию частиц основываясь на регистрируемом переходном излучении. Именно поэтому данный тип детекторов составляет большой интерес для научного сообщества.

3 GEANT4 моделирование детектора переходного излучения

Geant4 - набор инструментов, включающий в себя пакет программ для моделирования прохождения частиц через вещество, включает в себя все необходимые инструменты для гибкого описания геометрии, а также широкий набор физических моделей для различного типа симуляций.

3.1 Введение

Интерес к моделированию экспериментов с помощью программного пакета Geant4 заключается в том, чтобы, в какой то мере, упростить различные вычисления связанные с построением новых прототипов детекторов с использованием данных экспериментов по тестированию отдельных их частей.

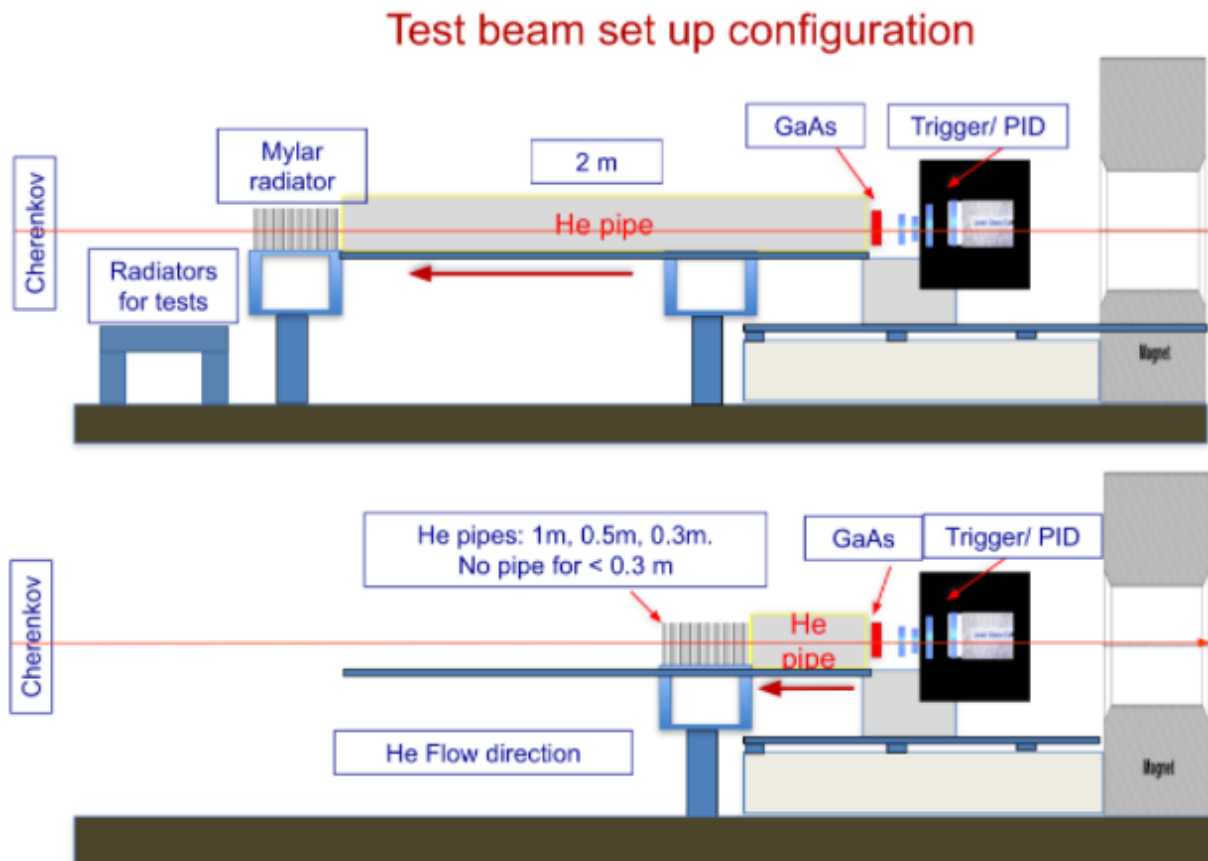
В 2021 году, на базе Центра Международных Ядерных исследований был поставлен эксперимент по изучению и тестированию возможности идентификации релятивистских частиц с помощью полупроводникового детектора на основе *GaAs*. Моделирование работы данного детектора имеет большую ценность для постановки дальнейших экспериментов, а также для анализа уже полученных результатов.

3.2 Изучение геометрии детектора

Как уже говорилось в упомянутом эксперименте использовался детектор с рабочим веществом *GaAs* на основе чипа TimePix3. Геометрия искомого детектора была описана в **Главе 2 TimePix3**.

3.2.1 Конфигурации эксперимента TESTBEAM2021

В течении эксперимента для набора данных использовалось несколько конфигураций, представленных на рисунке **3**.



Radiators for tests:

1. Mylar (50/3) **50 μm , 3 mm gap**
2. Polyethylene (27/0.5) **27 μm , 0.5 mm gap**
3. Polyethylene (35/0.5) **35 μm , 0.5 mm gap**
4. Polypropylene (15.5/0.2) **15.5 μm , 0.21 mm gap**
5. Dummy: **Special**, 500 (17.5mm), 300 (10.5mm), 100 (3.5 mm)
6. Dummy for Mylar 6-7 mm PE

Beams

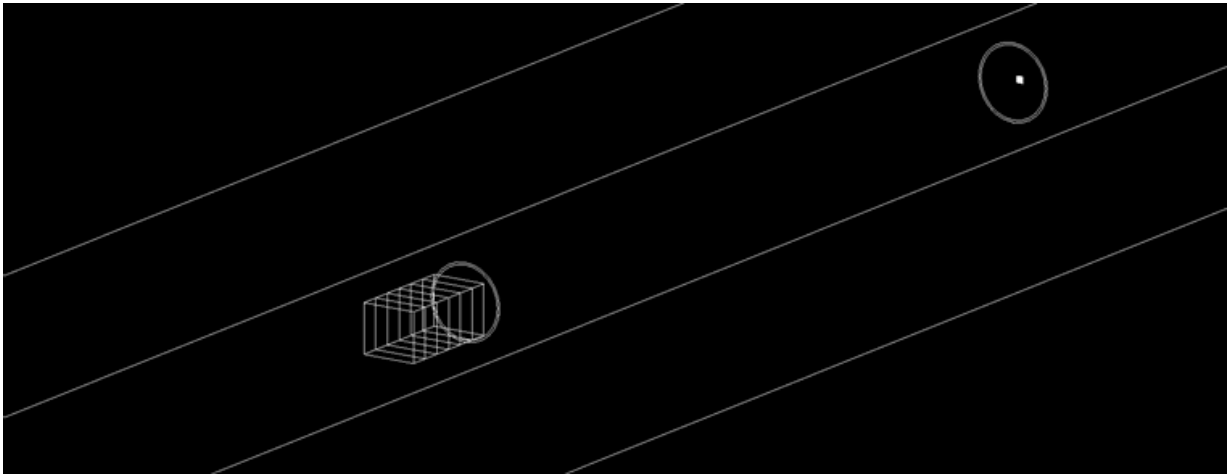
- 20 GeV electrons and pions

Рисунок 3 – конфигурации эксперимента

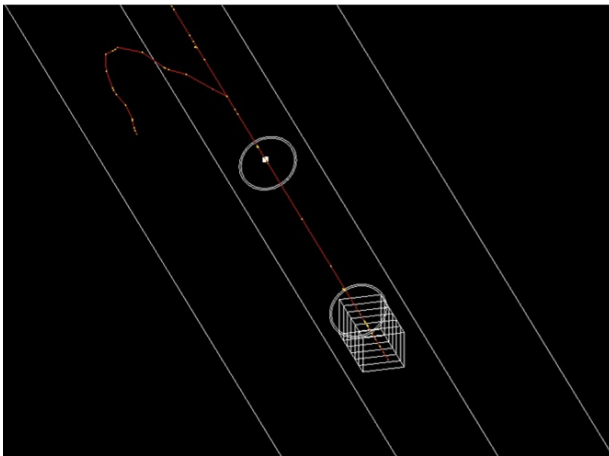
Использовались различные типы радиаторов и длины труб наполненных гелием. Вариативность конфигураций обусловлена стремлением к подробному изучению возможностей искомого детектора.

3.2.2 Описание геометрии в программном пакете GEANT4

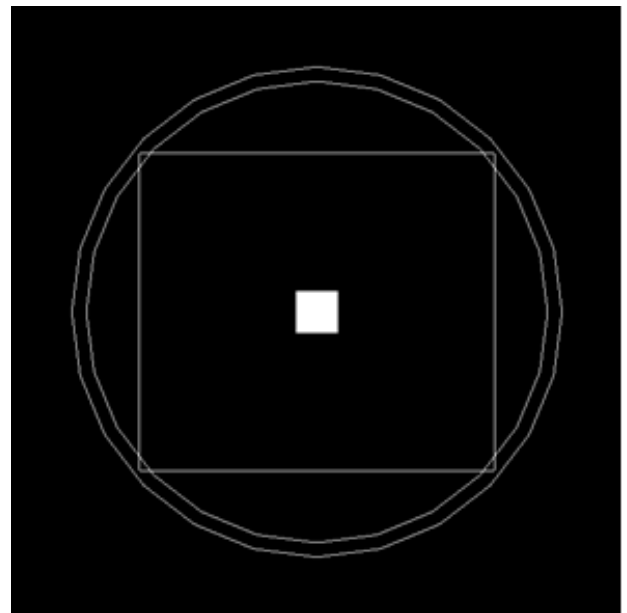
После изучения используемых конфигураций с помощью программно пакета была воссоздана геометрия установки (рисунки 4 а)б)в)).



а



б



в

Рисунок 4 — Визуализация геометрии.

На рисунке а) общий план геометрии описанной в Geant4;

На рисунке б) представлена визуализация одного из событий моделирования;

3.3 Заключение к Главе 3

Конфигурация эксперимента учитывает множество физических процессов, основной задачей при создании Geant4 модели эксперимента является передать и сформировать идентичные эксперименту условия эксперимента и постараться однозначно верно определить все необходимые параметры.

В процессе работы над предварительным экапом к получению результатов была проделана большая работа по анализу большинства ключевых особенностей как программного пакета Geant4, так и самого эксперимента. Была задана геометрия детектора, сформирован физический пакет учитывающий все необходимые для получения верных результатов процессы. Сформирован процесс сбора и отбора информации с чувствительной части детектора, а также описан метод их частичной обработки. Под частичной обработкой подразумевается отсутствие, на данном этапе, сравнения с данными эксперимента, а также не стандартизированность метода обработки, а значит сложность сравнения с аналогичными результатами. Данный недостаток, само собой, будет устранен в ближайшее время.

4 Результаты моделирования

После описания геометрии, формирования физического пакета, а также описание метода сбора информации наступает этап обработки и анализа полученных результатов.

4.1 Представление результатов

Для промежуточной оценки верности проводимого моделирования были получены следующие результаты:

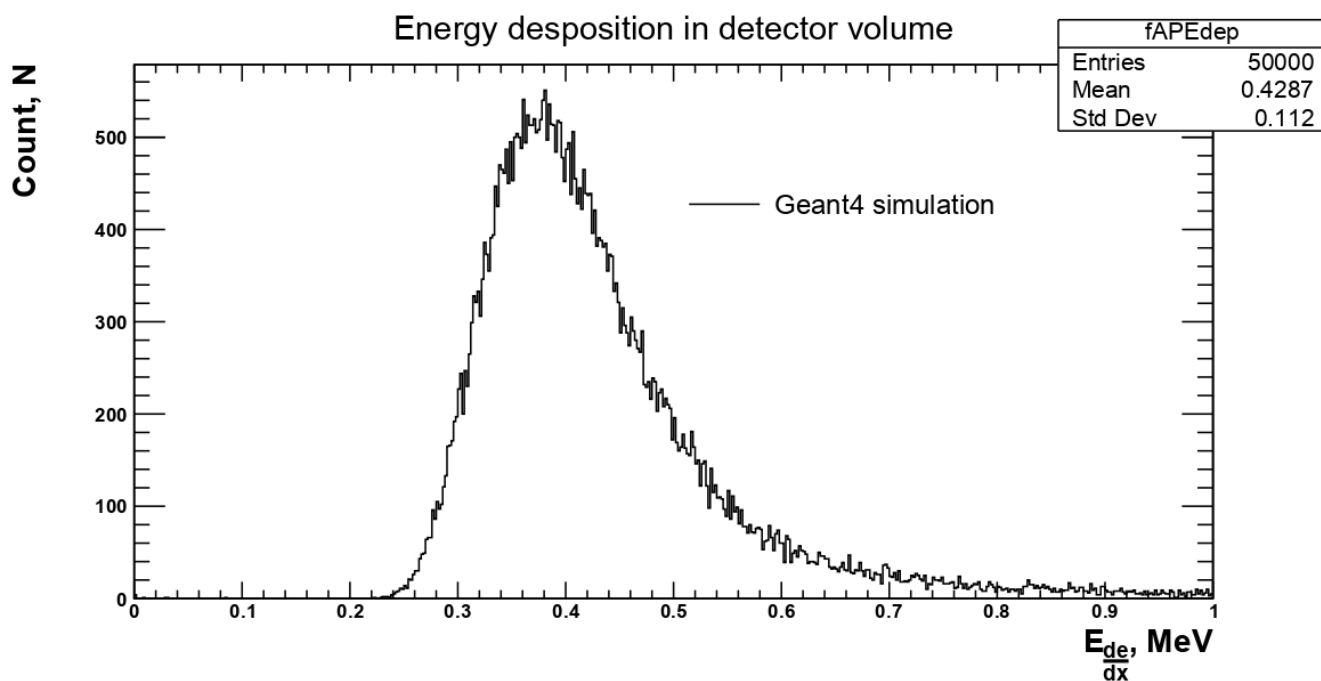


Рисунок 5 — Энерговыделение всех частиц в объеме детектора

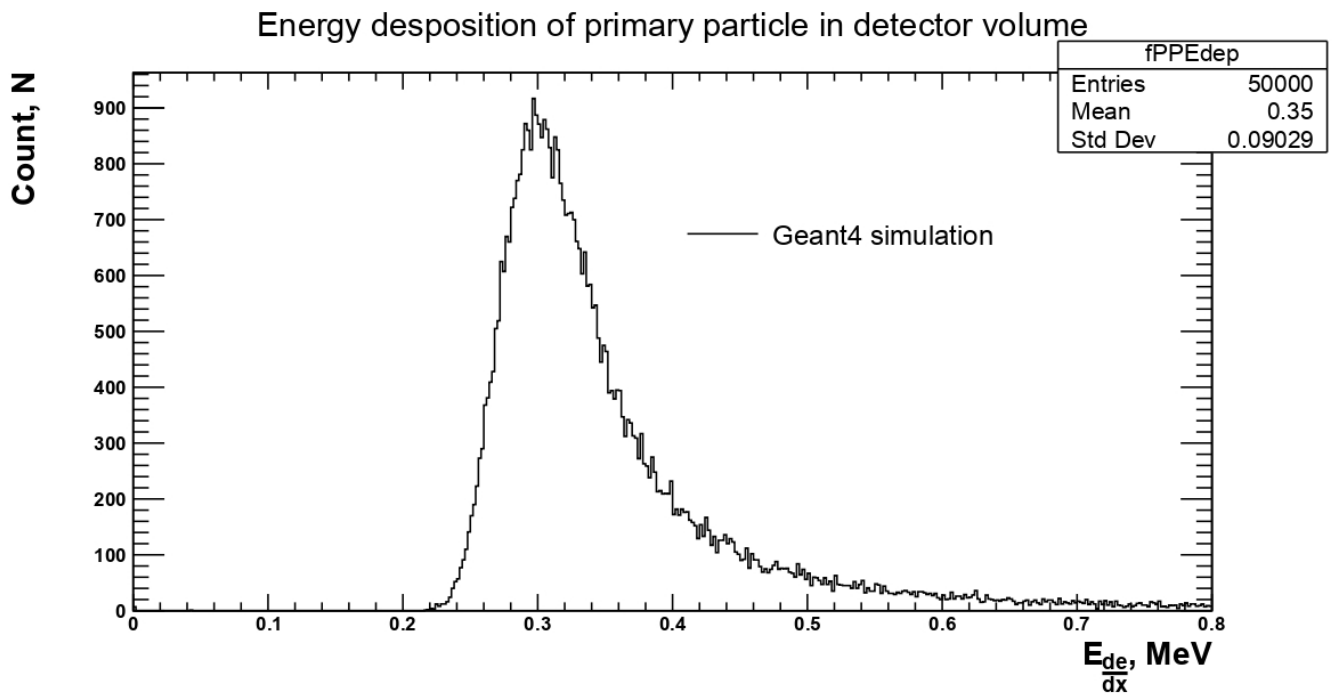


Рисунок 6 — Энерговывделение первичной частиц в объеме детектора

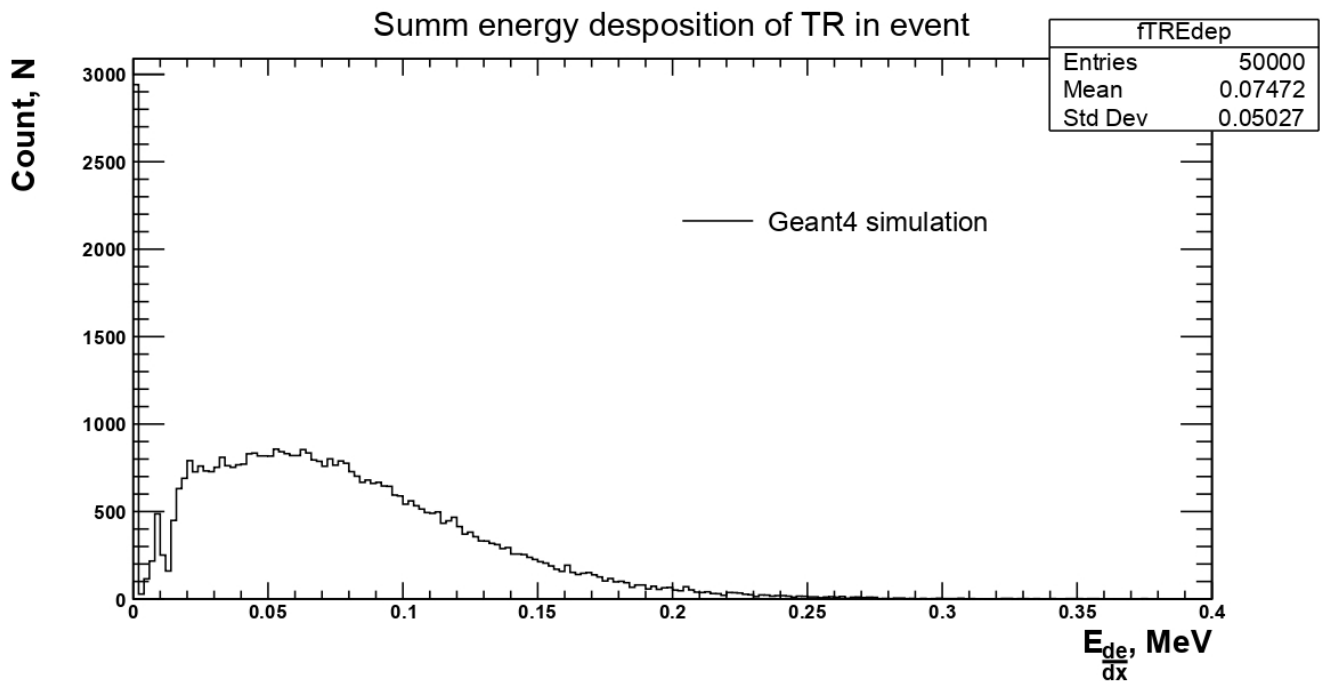


Рисунок 7 — Суммарное энерговывделение всех фотонов ПИ в событии

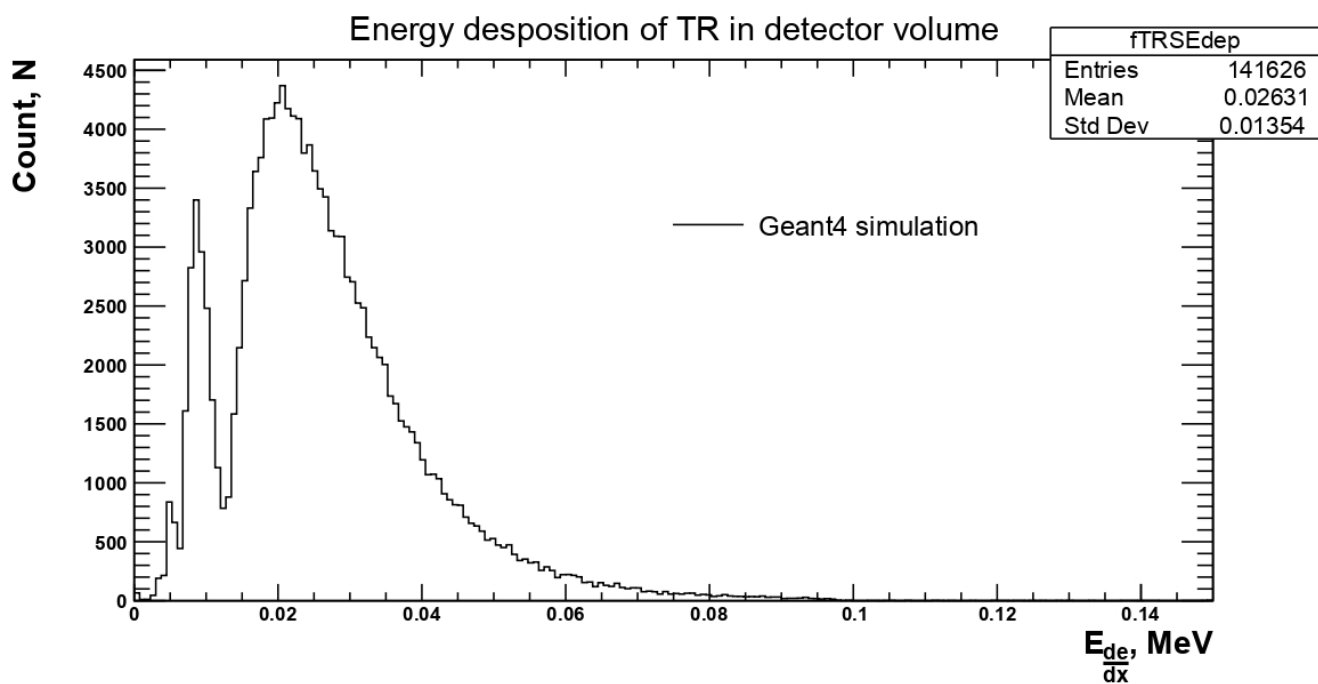


Рисунок 8 — Энерговывделение фотона ПИ в событии

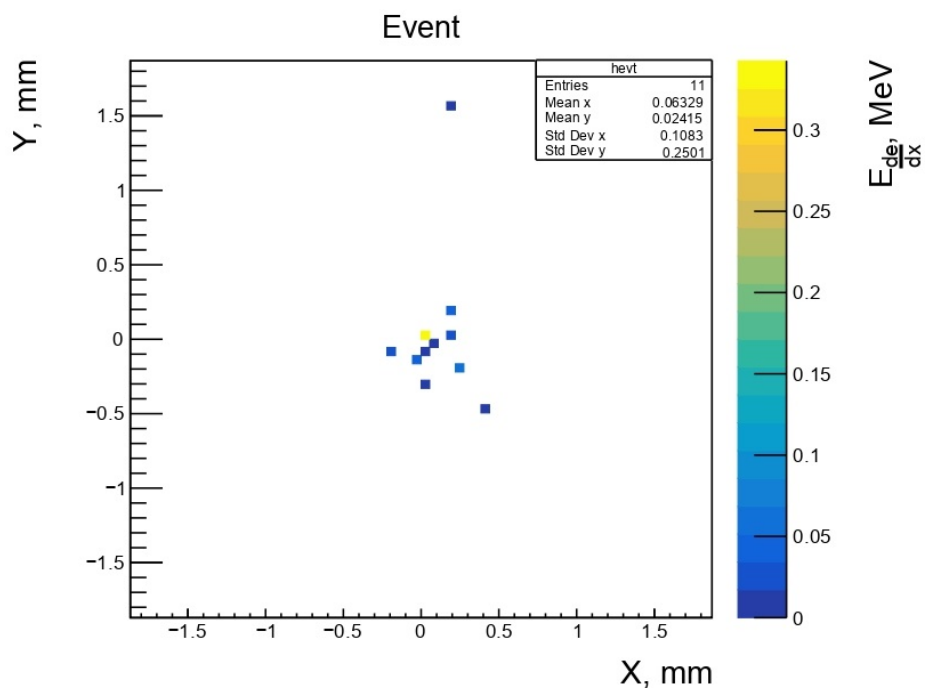
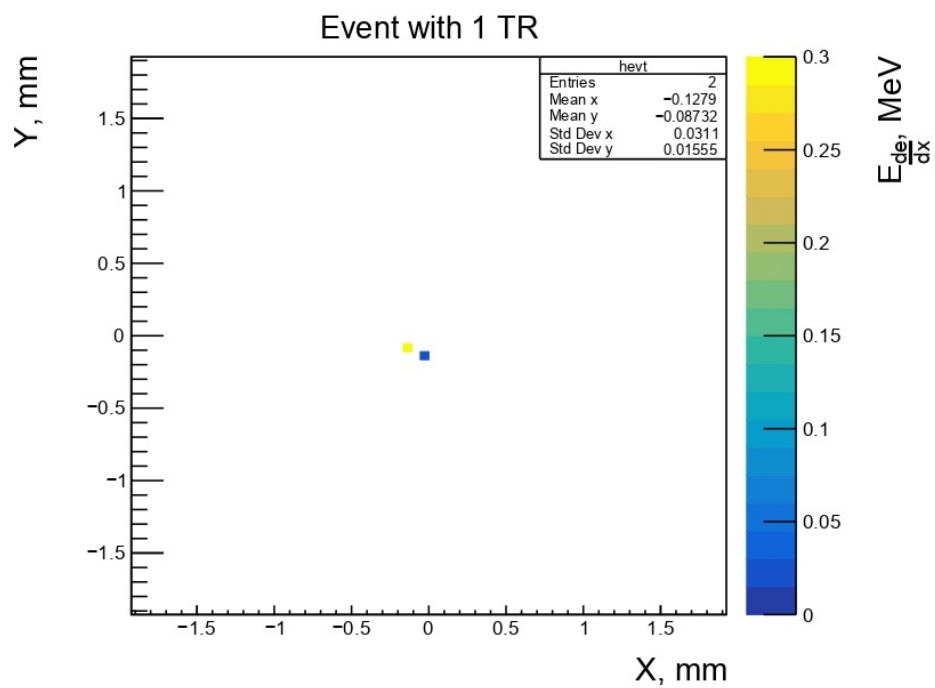
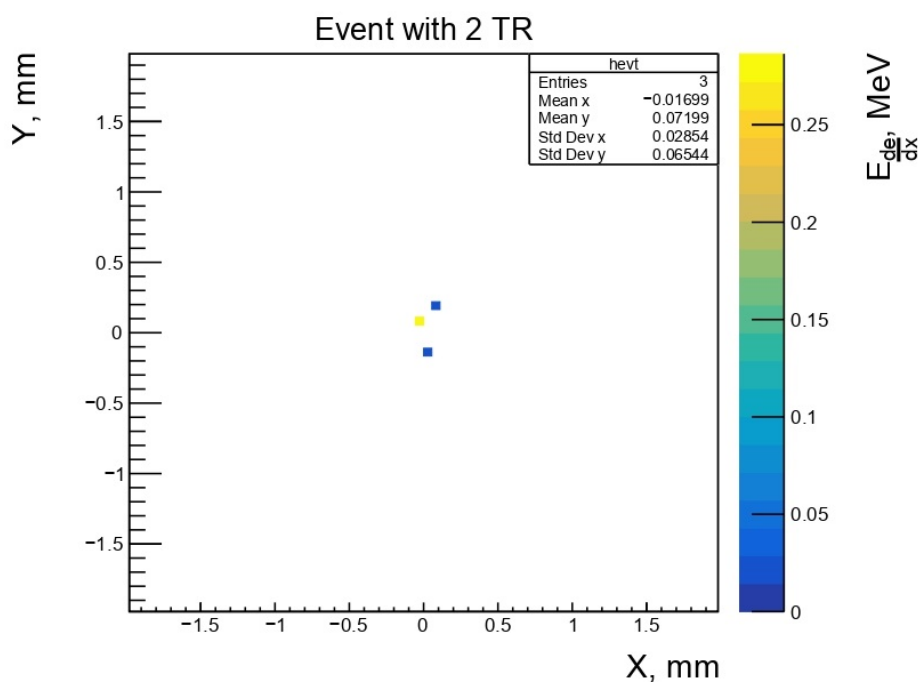


Рисунок 9 — Визуализация события зарегистрированного в детекторе

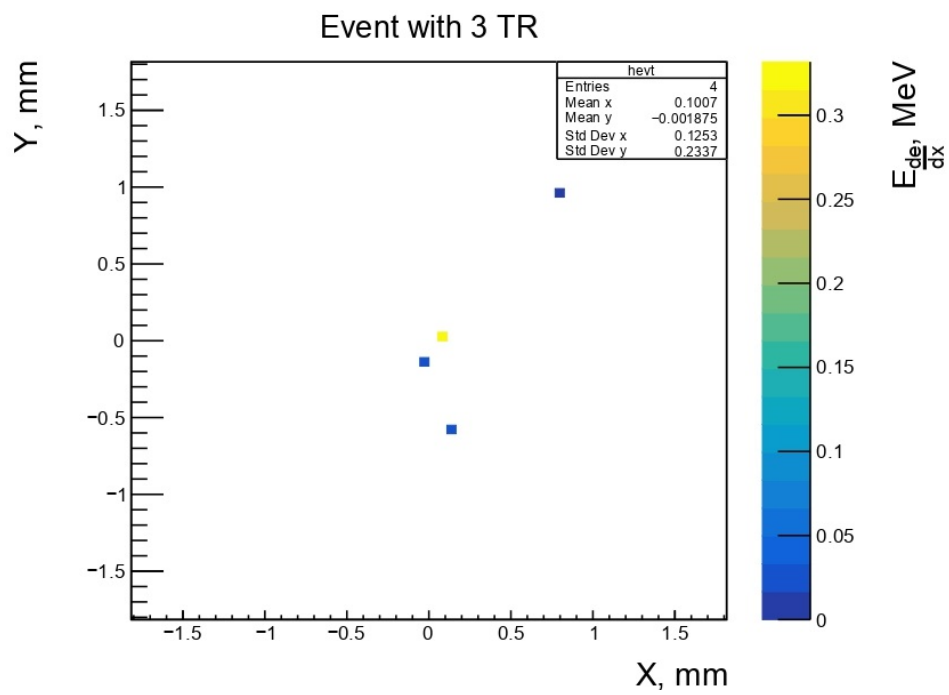


a

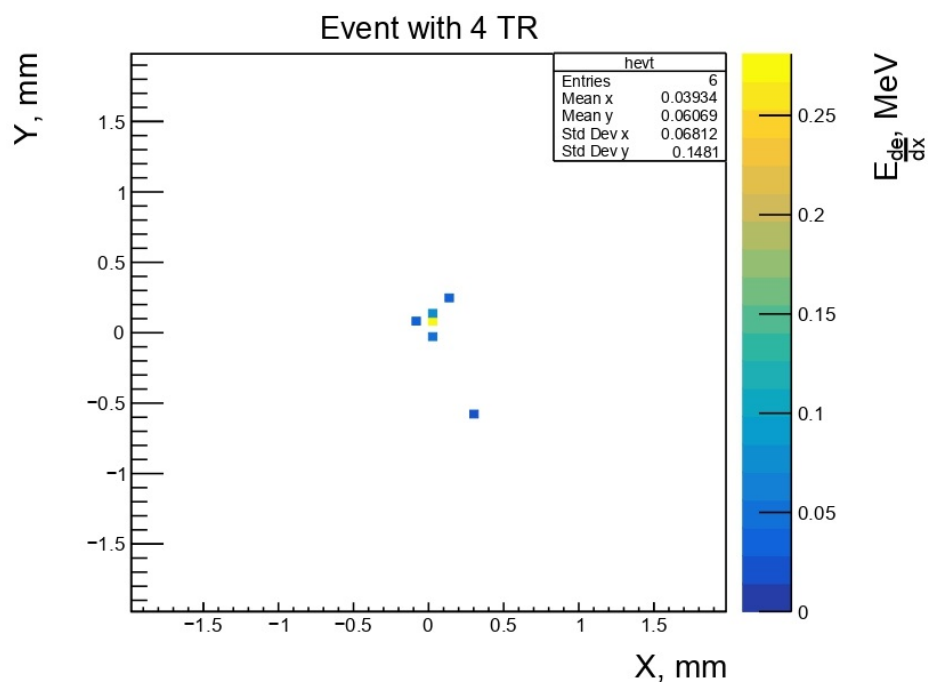


б

Рисунок 10 — Визуализация характерных событий - 1



B



B

Рисунок 11 — Визуализация характерных событий - 2

4.2 Заключение к Главе 4

В данной главе были представлены первые глобальные результаты моделирования. На основании этих данных было получено заключение о первичной верности создаваемой модели.

5 Заключение и выводы

В течении данного семестра была произведена объемная работа по аккумуляции большей части необходимой для создания верной модели эксперимента информации, а также был совершен первый и основной шаг по созданию этой модели.

Еще предстоит учесть большое количество нюансов, связанных с физическим пакетом в Geant4, а также с особенностями пиксельного детектора, к примеру кластерность его срабатывания вызванная засвечиванием соседних с основным пикселей. Получить полноценное распределение по углам для регистрируемых фотонов ПИ. Прийти к стандартизированному методу полученных при моделировании данных и произвести сравнение с данными эксперимента.

Также, глобально, немалый интерес составляет полноценное моделирование работы детектора, а это формирование сигнала с установки, что приводит к моделированию движения носителей заряда внутри детектора при регистрации частицы.

Список литературы

- [1] Identification of particles with Lorentz factor up to 104 with Transition Radiation Detectors based on micro-strip silicon detectors / J. Alozy [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — May. — Vol. 927. — P. 1–13.
- [2] Timepix3: a 65K channel hybrid pixel readout chip with simultaneous ToA/ToT and sparse readout / T. Poikela [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2014. — May. — Vol. 9, no. 05. — P. C05013–C05013.
- [3] Transition radiation measurements with a Si and a GaAs pixel sensor on a Timepix3 chip / F. Dachs [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2020. — Vol. 958. — P. 162037.
- [4] Transition radiation, URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/radiat/tr.htm>.
- [5] Zwerger A., Fauler A., Fiedelrle M., Jakobs K. // Nucl. Inst. Meth. 2007. V.576.P.23
- [6] Bauzad M., Peacock A., Owens A. // Nucl. Inst. Meth. A. 2001. V.458.P.123
- [7] F. Hüggling, on behalf of the ATLAS Pixel collaboration, The ATLAS Pixel Detector, IEEE NSS and MIC Conference Record (2004).