

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 \_\_\_\_\_ В. О. Тихомиров

Студент \_\_\_\_\_ 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 пионов и электронов в пределах GeV энергий с помощью детектора на основе GaAs. Для этого было произведено детальное изучение радиаторов и геометрии детектора. Для исследований был использован протонный пучек ускорителя SPS, который после рассеяния на специальных мешенях становился электронно-пионным.

Как уже говорилось эксперимент проводился с целью изучения возможности разделения частиц с помощью GaAs. В основе этого лежит различие  $\gamma$ -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 описывает 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

<b>Цель и задача</b>	<b>3</b>
<b>1 Переходное излучение</b>	<b>4</b>
1.1 Физика процесса . . . . .	4
<b>2 Полупроводниковые детекторы</b>	<b>6</b>
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
<b>3 Geant4 моделирование детектора переходного излучения</b>	<b>10</b>
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 Описание диффузии заряда в полупроводниковом детекторе	13
3.4 Заключение к Главе 3 . . . . .	15
<b>4 Результаты моделирования</b>	<b>16</b>
4.1 Представление результатов . . . . .	16
4.2 Заключение к Главе 4 . . . . .	20
<b>5 Заключение и выводы</b>	<b>21</b>
<b>Список используемых источников</b>	<b>21</b>

## 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 дальнешем, 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  $\omega_p$ , равна:

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

где

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

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  $\theta$  - угол отложенный от направления движения излучающей частицы. Излучение от одной пленки непосредственно зависит от квадрата разности

$\omega_p$  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  $\gamma$  - соответствующий  $\gamma$ -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 недостаточно эффективной для регистрации высокоэнергетических квантов рентгеновского излучения. Типовая структура полупроводникового пиксельного детектора изображена на рисунке 1.

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

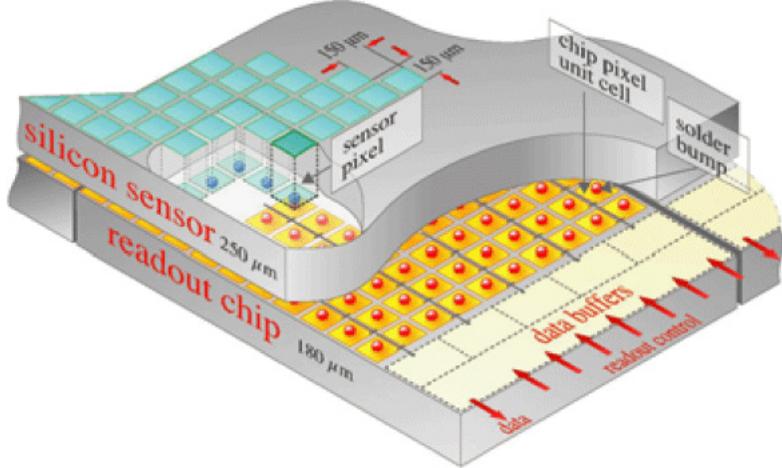


Рисунок 1 — Схема устройства пиксельного детектора

## 2.3 GaAs - полупроводник

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

Арсенид галия (*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 большей 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  $10 - 30 \text{ keV}$  поглащаются 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 декторе 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 соответствующий



Рисунок 2 — Изображение TimePix3

щий детектор на его основе содержит  $256 \times 256$  квадратных пикселей с шагом в  $55 \mu m$  на площади  $1.4 \times 1.4 cm$ . 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 индентификация 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 помощь программного пакета Geant4 заключается в том, чтобы, в какой то мере, упростить различные вычисления связанные с построением новеших 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 релятивистких 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.

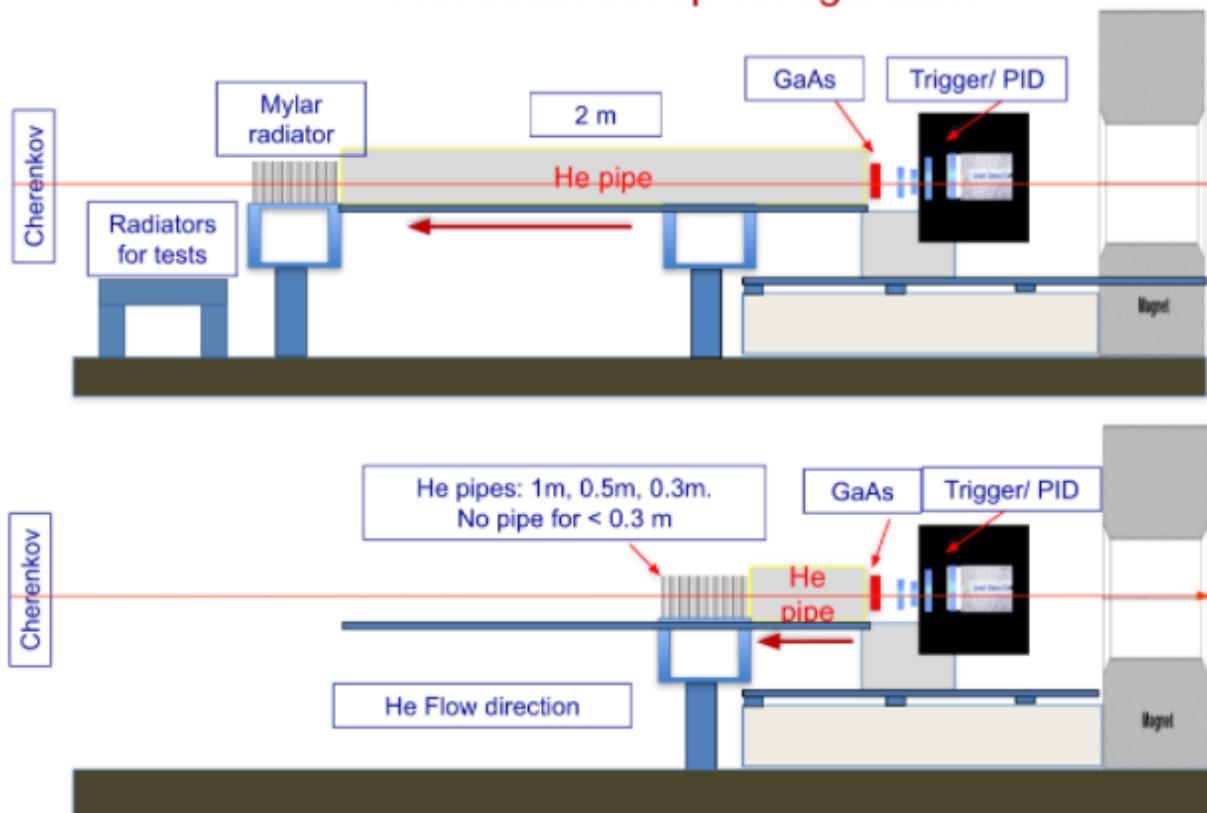
## 3.2 Изучение геометрии детектора

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.

## Test beam set up configuration



### Radiators for tests:

1. Mylar (50/3) **50  $\mu\text{m}$ , 3 mm gap**
2. Polyethylene (27/0.5) **27  $\mu\text{m}$ , 0.5 mm gap**
3. Polyethylene (35/0.5) **35  $\mu\text{m}$ , 0.5 mm gap**
4. Polypropylene (15.5/0.2) **15.5  $\mu\text{m}$ , 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

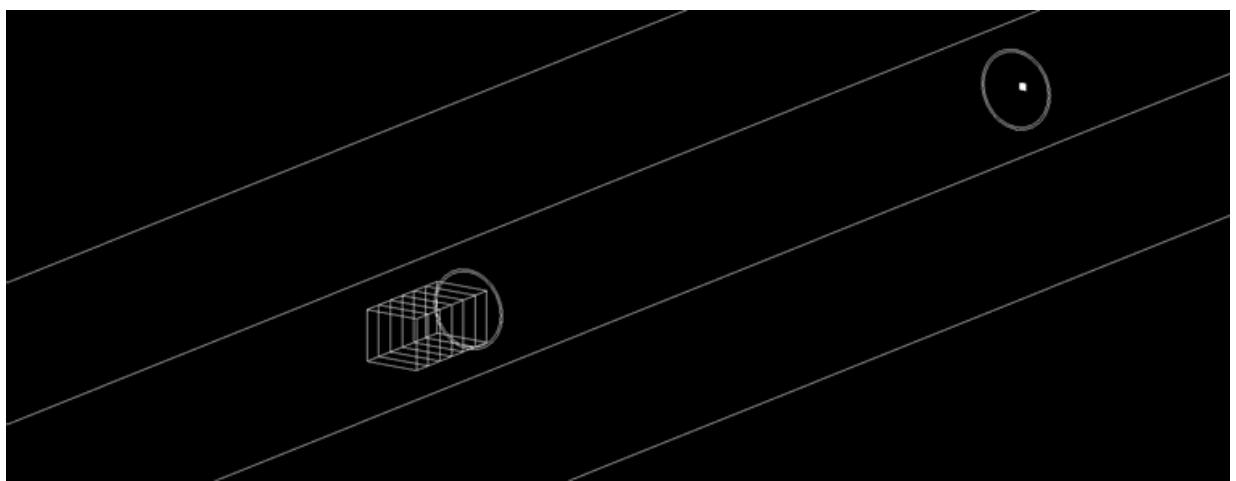
Рисунок 3 — конфигурации эксперимента

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

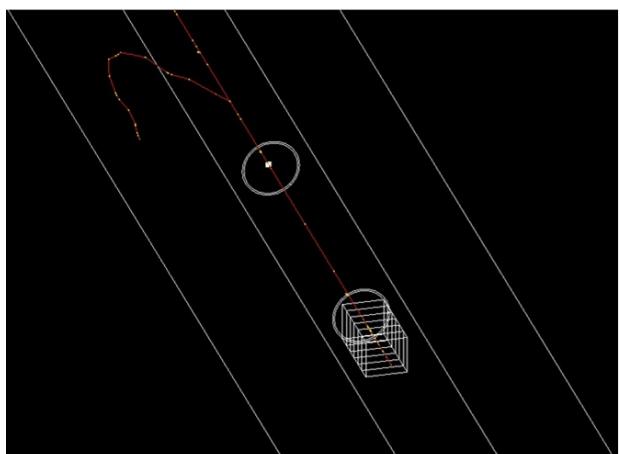
### 3.2.2 Описание геометрии в программном пакете

#### GEANT4

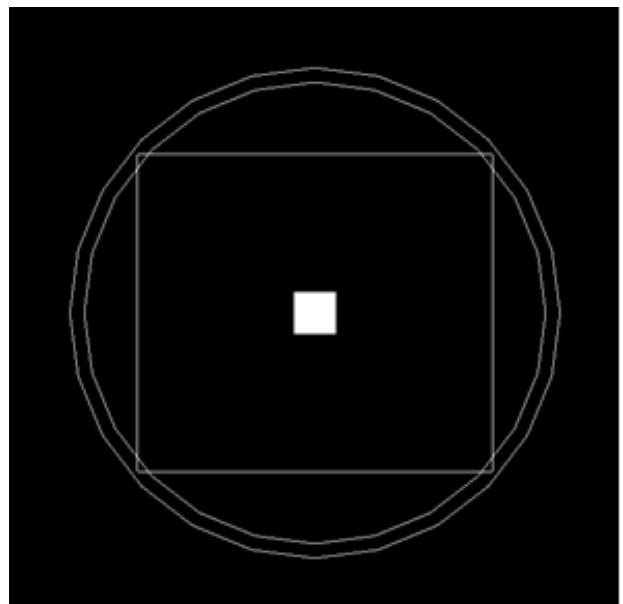
После изучения используемых конфигураций с помощью программного пакета была воссоздана геометрия установки (рисунки 4 а)б)в) ).



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 Описание диффузии заряда в полупроводниковом детекторе

Возможность достижения более высокого пространственного и энергетического разрешения в пиксельных детекторах путем перехода к меньшим размерам пикселя ограничена размерами облака носителей заряда, созданного в точке взаимодействия гамма-кванта с веществом сенсора. Размеры облака определяются в основном пробегом фотоэлектронов, образованных в результате фотоэффекта. Также падающий гамма-квант может взаимодействовать с материалом сенсора через механизм комптоновского рассеяния. В результате могут образоваться две области энерговыделения, разнесенные друг от друга на расстояние большее размера пикселя. Падающий и соответствующий ему флюоресцентный гамма-квант в некоторых случаях могут быть зарегистрированы несколькими соседними пикселями.

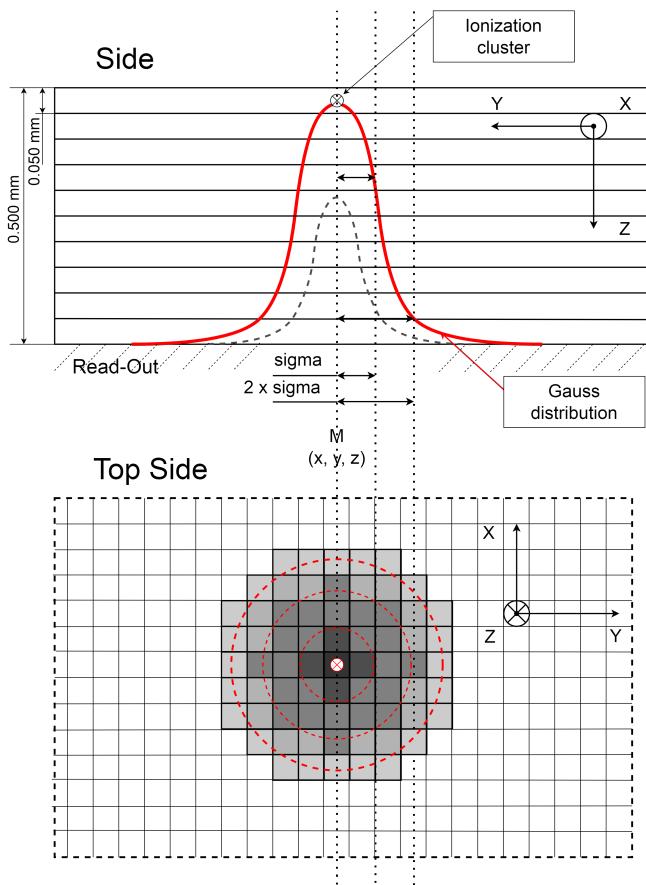


Рисунок 5 — Схема описывающая диффузию заряда в детекторе

Кроме того, во время дрейфа пакеты носителей заряда диффундируют в сторону меньшей концентрации согласно закону Фика и испытывают куловское расталкивание, что ведет к увеличению размера облака, как это показано на рисунке 1.3. Решением уравнения диффузии для облака носителей заряда, пред-ставляющего в начальный момент времени точечное энерговыделение, является распределение Гаусса с дисперсией:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2nk_B T l d}{e U_{bias}}}, \quad (3.1)$$

где  $n = 3$  – число пространственных измерений,  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $l$  – расстояние от точки взаимодействия до считывающего электрода,  $d$  – толщина сенсора детектора,  $e$  – заряд электрона,  $U_{bias}$  – напряжение смещения.

Также экспериментальным методом была получена аналогичная функция для  $\sigma$  описывающая диффузию заряда в конкретном детекторе - TimePix3, созданного на основе *GaAs*:

$$\sigma = 0.014l + 2, \quad (3.2)$$

где  $l$  – расстояние от точки взаимодействия до считающей электрода, а постоянная прибавка в  $2\mu m$  характеризует возникновение эффекта размытия заряда в следствии диффузии даже если ионизация произошла на поверхности считающих электродов.

Касательно реализации диффузии заряда в детекторе при моделировании эксперимента с его применением в программном пакете Geant4 стоит учитывать что в процессе вычислений речь идет об энергиях. Таким образом при построении эксперимента в Geant4 нет необходимости описывать считающую электронику и схему преобразования заряда в детекторе в энергию, данный программный пакет описывает только физику взаимодействия, следовательно на выходе моделирования, в виде результата, получаем энергию потерянную частицей в искомом объеме интересующего нас детектора. Для ввода диффузии заряда необходимо оговорить, что эта энергия пропорциональна заряду появившемуся в объеме детектора, поэтому является возможным производить размытие энерговыделения по матрице детектора в соответствии с законом для диффузии заряда.

## 3.4 Заключение к Главе 3

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

В процессе работы над предварительным этапом 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, формировании физического пакета, а также описание метода сбора информации наступает этап обработки и анализа полученных результатов. С учетом нововведения в виде диффузии получены следующие результаты для различных функций диффузии в сравнении с чистым моделированием в Geant4.

## 4.1 Представление результатов

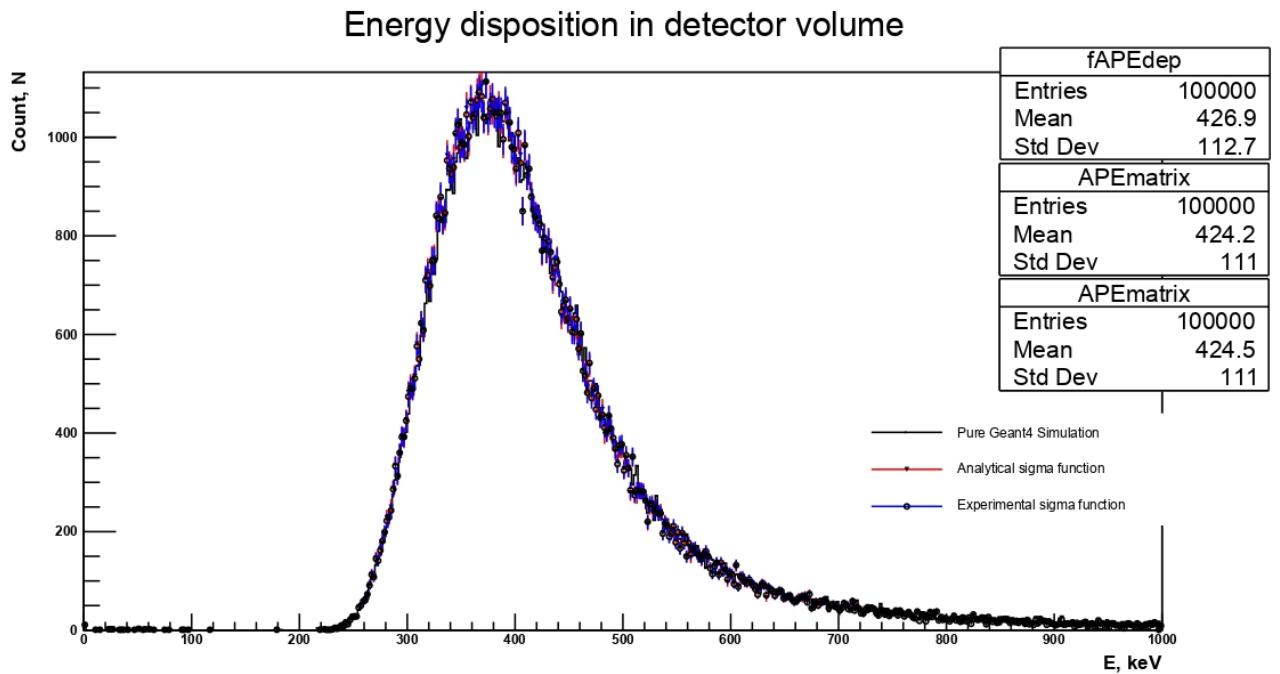


Рисунок 6 — Энерговыделение всех частиц в объеме детектора

Ожидается что внедрение диффузии не должно сильно влиять на спектры энерговыделений в детекторе, что подвердилось, но должно приблизить к реальному принципу регистрации частиц детектором. Внедрение соответствующих диффузии изменений повлекло за собой качественное преобразование карточек событий.

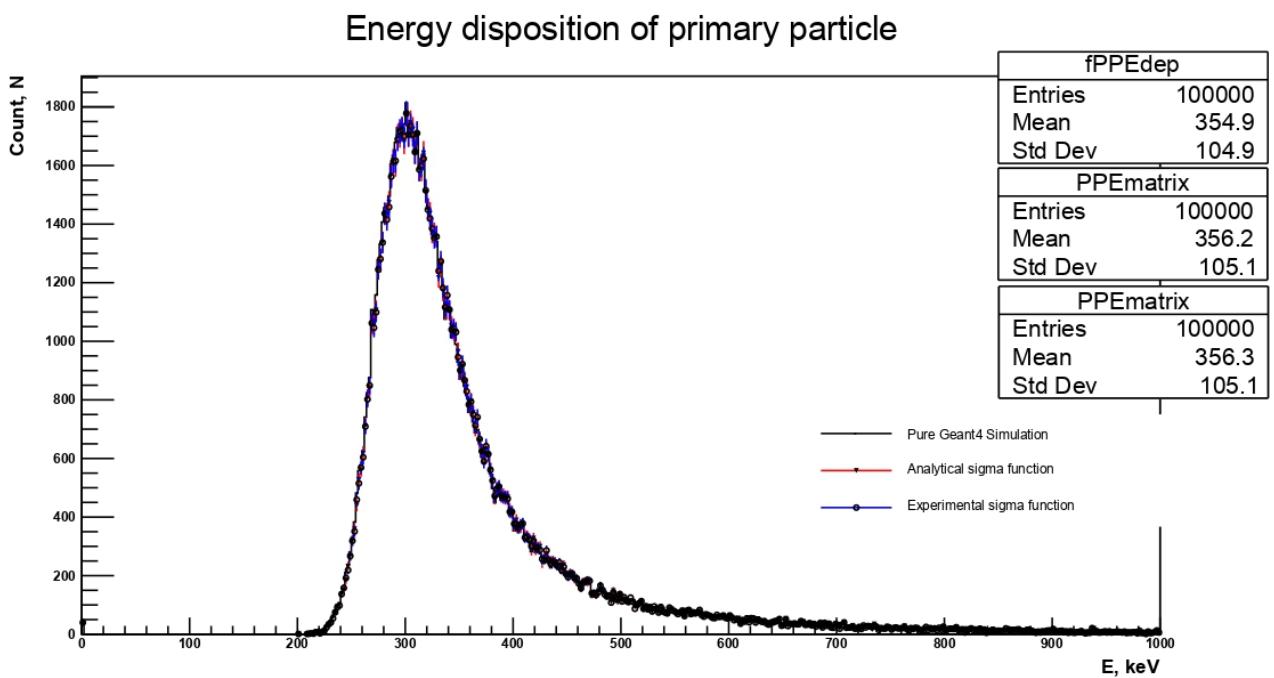


Рисунок 7 — Энерговыделение первичной частиц в объеме детектора

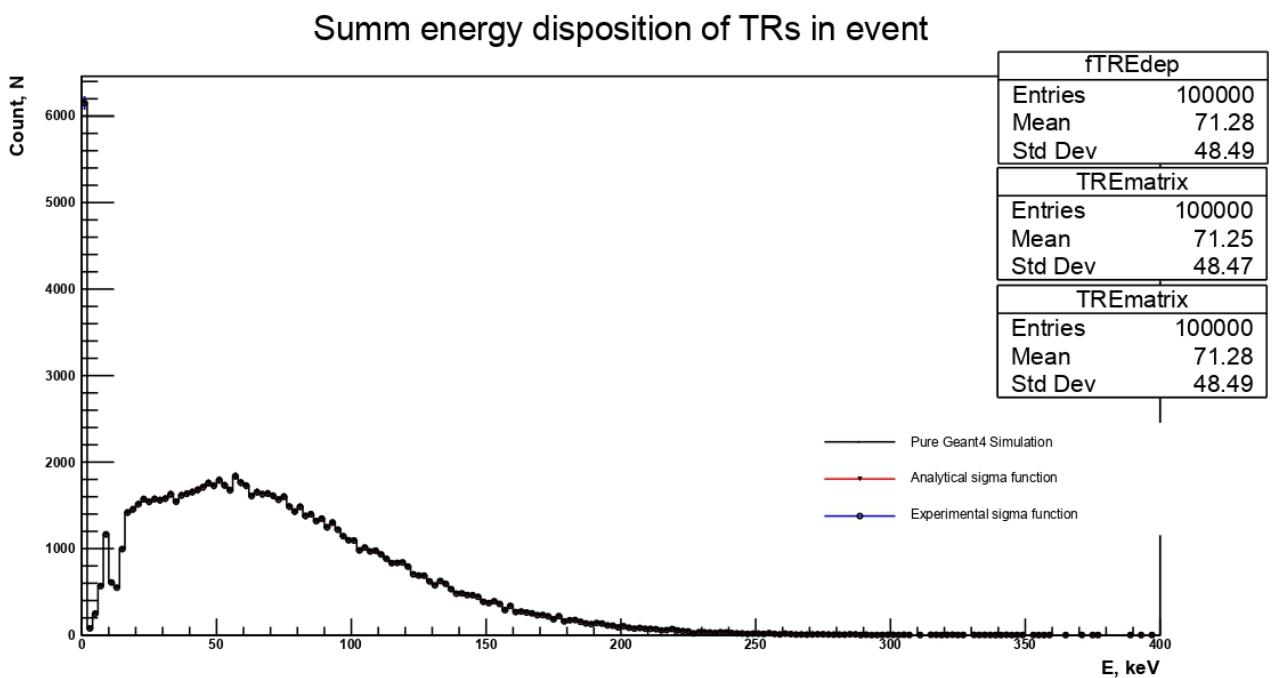


Рисунок 8 — Суммарное энерговыделение всех фотонов ПИ в событии

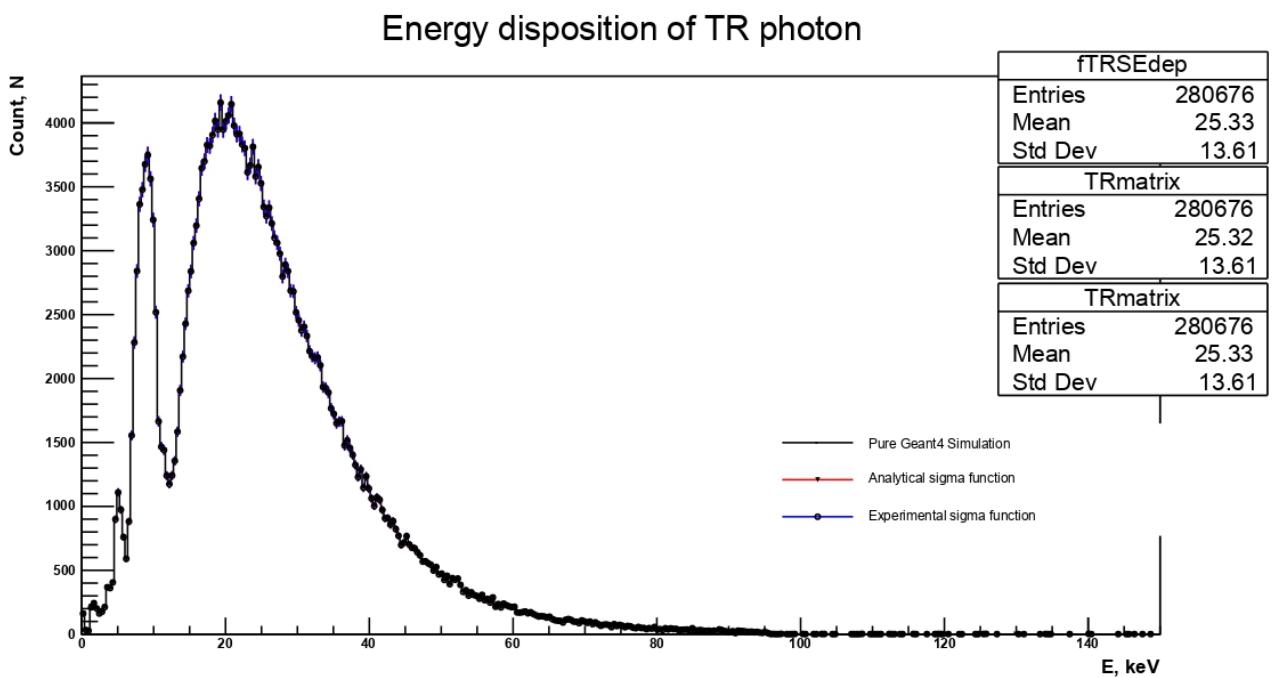


Рисунок 9 — Энерговыделение фотона ПИ в событии

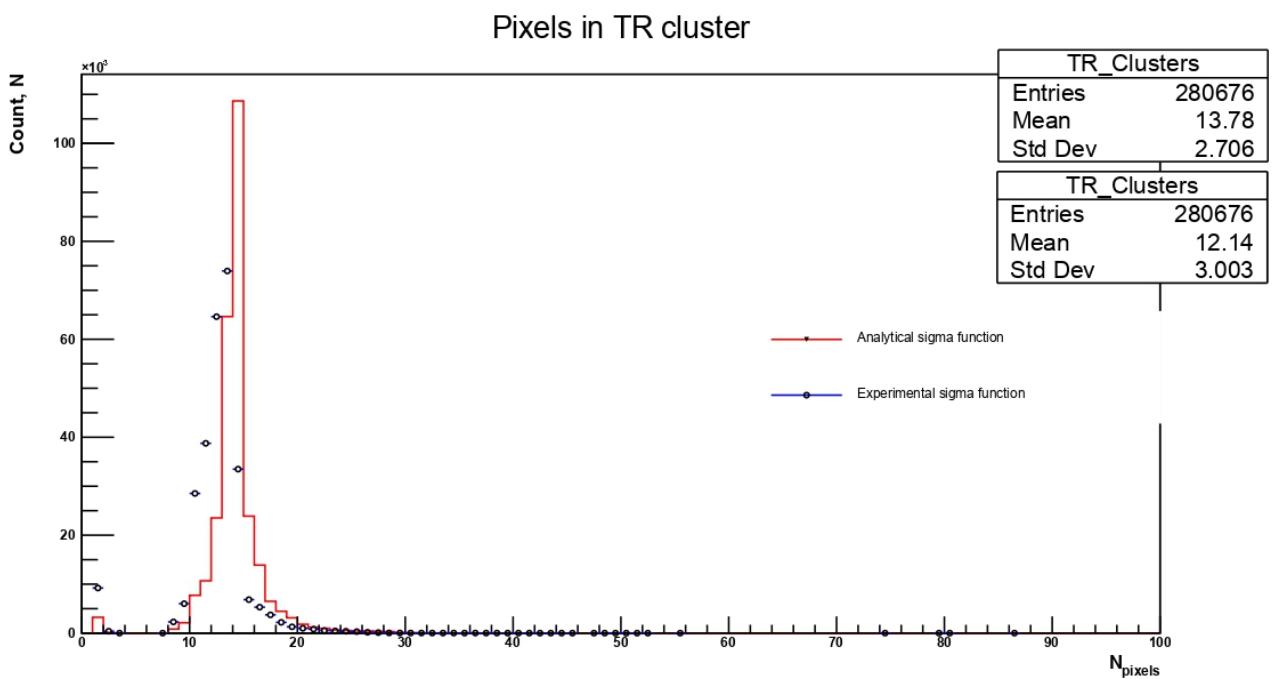


Рисунок 10 — Количество пикселей в кластере от первичной частицы

### Pixels in primary particle cluster

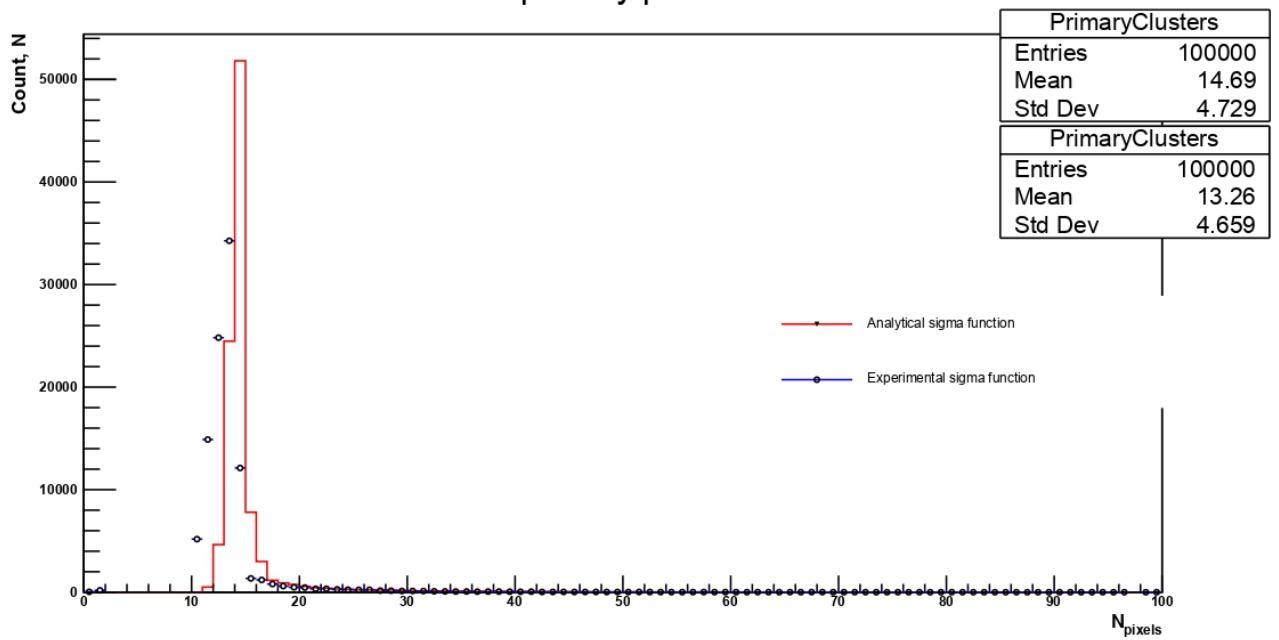


Рисунок 11 — Количество пикселей в кластере от  $\gamma - TR$

## **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. Внедрение диффузии привело к более точному моделированию работы реального детектора, что позволяет перейти на более качественный уровень работы с обработкой результатов эксперимента.

## **5 Заключение и выводы**

В течении данного семестра была произведена объемная работа по аккумуляции большей части необходимой для создания верной модели эксперимента информации.

Теперь производится качественный учет диффузии заряда в детекторе, что является качественным физическим нововведением в моделирование. Был произведен сравнительный анализ функций описывающих исходную диффузию, что создает поле для поиска оптимальных для воссоздания экспериментальных данных параметров.

# 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. Hügging, on behalf of the ATLAS Pixel collaboration, The ATLAS Pixel Detector, IEEE NSS and MIC Conference Record (2004).