

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 531.3, 539.1.05

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА ПЕРЕХОДНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ GAAS С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА
GEANT4**

Студент

_____ А. Н. Морозихин

Научный руководитель,
к.ф.-м.н.

_____ В. О. Тихомиров

Москва 2022

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА ПЕРЕХОДНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ GAAS С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА
GEANT4**

Студент _____ А. Н. Морозихин

Научный руководитель,
к.ф.-м.н. _____ В. О. Тихомиров

Рецензент,
к.ф.-м.н. _____ А. А. Савченко

Секретарь ГЭК,
к.ф.-м.н. _____ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,
д.ф.-м.н., проф. _____ М. Д. Скорохватов

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Эксперимент Test Beam 2021	6
1.1 Цель эксперимента. Его задачи	6
1.2 Конфигурация эксперимента	7
1.3 Наборы экспериментальных данных	8
2 Переходное излучение	10
2.1 Общее введение	10
2.2 Переходное излучение на границе раздела двух изотропных сред	11
3 Полупроводниковые детекторы	15
3.1 Принцип работы и устройство полупроводникового детектора	15
3.2 Полупроводники. GaAs и его преимущества	17
3.3 TimePix3 - гибридная микросхема считывания	19
4 Geant4. Программный пакет моделирования	21
4.1 Общее введение	21
4.2 Основные принципы моделирования	22
5 Практическая часть. Реализация моделирования	24
5.1 Введение	24
5.2 Описание геометрии и материалов	25
5.3 Физический пакет	29
5.4 Обработка событий в процессе моделирования	33
5.5 Особенности полупроводникового детектора	36
5.5.1 Диффузия заряда в полупроводниковом детекторе . .	37

5.5.2	Реализация диффузии в полупроводниковом детекторе в Geant4	39
5.6	Формирование результатов моделирования	41
5.6.1	Результаты Geant4 моделирования	42
5.6.2	Алгоритм кластеризации	46
5.7	Заключение к Главе 5	47
6	Представление результатов моделирования эксперимента	48
6.1	Результаты	49
6.2	Причины несоответствия	54
6.3	Заключение к Главе 6	58
7	Заключение и выводы	59
	Приложение А	63
	Приложение Б	64
	Приложение В	65
	Приложение Г	66
	Приложение Д	68
	Приложение Е	72
	Приложение Ж	73

ВВЕДЕНИЕ

Образование адронов в экспериментах на Большом Адронном Коллайдере (БАК) под малыми углами по отношению к пучкам остается интересной для исследований областью. Эксперименты в этом направлении ставятся с целью изучения состава вторичных частиц рождающихся в следствии протонных столкновений - протоны, каоны, пионы, мюоны и электроны. В рамках данных исследований необходимо построить детектор для идентификации частиц, согласно одному из существующих методов. В данном эксперименте применялась техника регистрации Переходного Излучения (ПИ)[1].

Детекторы ПИ используются для идентификации частиц уже долгое время и являются безальтернативными в определенных диапазонах γ -фактора. Так, в 2021 году, на базе Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН) был проведен эксперимент с целью исследования возможности разделения электронов и адронов, в частности пионов, с помощью ПИ с использованием полупроводникового арсенид галлиевого (GaAs) детектора на ускорителе SPS [2].

Для отработки алгоритмов обработки полученных экспериментальных данных было реализовано Монте-Карло моделирование (МК) с использованием программного пакета Geant4. В данной работе будут представлены результаты этого моделирования в сравнении с результатами измерений с использованием майларовых радиаторов. А также, приведено подробное описание процесса создания представляемой модели.

Целью данной работы является:

- создание геометрической и физической модели эксперимента Test Beam 2021 с помощью программного пакета Geant4
- получение энергетических спектров и угловых распределений для квантов переходного излучения, сравнение с экспериментальными данными

- проверка достоверности работы алгоритма кластеризации для обработки данных эксперимента

Для достижения поставленных целей было необходимо решить следующие **задачи**:

- проанализировать схему и устройство эксперимента Test Beam 2021
- реализовать геометрическую модель экспериментальной установки с помощью программного пакета Geant4
- сформировать пакета физических процессов необходимых при моделировании эксперимента
- создать алгоритма расчета эффекта диффузии в полупроводниковом детекторе
- объединить Geant4 моделирования с существующим алгоритмом кластеризации
- провести сравнительный анализ полученных результатов
- поиск причин возможного несоответствия моделирования

Научная новизна и практическая значимость

Произведено моделирование детектора переходного излучения, направленное на изучение возможности разделения электронов и адронов, в частности пионов, в экспериментах на Большом Адронном Коллайдере (БАК) под малыми углами по отношению к пучкам, что все также остается предметом интереса в научном сообществе. Моделирование позволяет оценить верность интерпретации полученных в эксперименте данных, то насколько верно определяются количество пикселей в кластере регистрируемой частицы.

Работа состоит из 7 глав, за которыми следует список изученной в процессе работы литературы и статей, а также приложения. **Главы 1-4** имеют вводный характер и последовательно повествуют о проводившемся эксперименте, природе переходного излучения, особенностях полупроводниковых детекторов на основе GaAs, методологии разработки Geant4 моделей. В **Главах 5-6** приводится подробное описание проделанной работы и результаты МК, а также проводится анализ возникших расхождений между данными моделирования и экспериментальными данными. В **Главе 7** формулируются выводы.

1 ЭКСПЕРИМЕНТ TEST BEAM 2021

1.1 ЦЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТА. ЕГО ЗАДАЧИ

Для изучения процесса разделения электронов и адронов был разработан концепт детектора - спектрометр малых углов. Одним из его составляющих частей является ППД на основе GaAs. Эта детектирующая установка разработана для реализации процесса идентификации частиц с использованием ПИ [3].

Мотивацией для проведения Test Beam 2021 является исследование в области разделения электронов и пионов по их γ -факторам с помощью ППД на основе GaAs. Данный детектор дает возможность идентифицировать частицы не только по суммарному энерговыведению регистрируемого излучения и количеству регистрируемых квантов переходного излучения, но и по новому критерию: угловое распределение регистрируемых квантов переходного излучения, которое напрямую зависит от типа материала радиаторов, а также типа первичной частицы. Для этого было необходимо провести детальное изучение исследуемого излучения. Также, в соответствии с выше сказанным, было необходимо построить установку для проведения измерений, описание которой представлено в следующем разделе.

В процессе эксперимента использовался пучок протонного ускорителя SPS (ЦЕРН), который преобразовывался электрон-пионный (e^-/π^-). Для разделения электронных и пионных событий была собрана триггерная схема [2], которая будет также описана в следующем разделе.

1.2 КОНФИГУРАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения проводились на смешанном e^-/π^- пучке с энергией 20 ГэВ. Общая схема эксперимента представлена на рисунке 1.1а, а также детально изображена триггерная схема на рисунке 1.1б.

Рождение квантов ПИ происходит в области установленных радиаторов, представляющих собой стопки равноудаленных друг от друга пленок из различного материала. Подробнее о физике процесса рождения γ -квантов ПИ будет изложено в **Главе 2**.

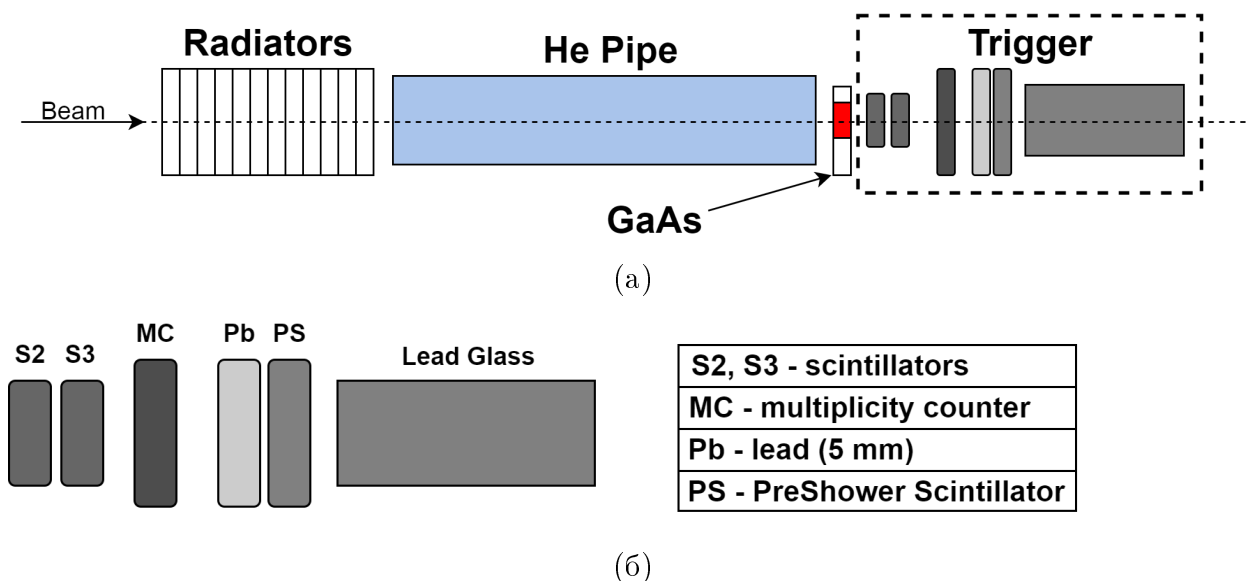


Рисунок 1.1 — Экспериментальная установка Test Beam 2021: (а) – общая схема экспериментальной установки, (б) – триггерная схема

Для пространственного разделения γ -квантов ПИ от первичной частицы пучка, радиаторы, в которых происходит рождение квантов излучения, разнесены с детектирующим сенсором на некоторое расстояние, предусмотренное конфигурациями эксперимента. Из-за этого, рожденный квант переходного излучения проходит значительное расстояние в объеме воздуха, что негативно влияет на регистрируемый энергетический спектр для малых энергий излучений. Для решения этой проблемы, между сенсором и радиаторами помещается труба, для которой внутренний объем заполнен гелием (He), который, в свою очередь, гораздо легче кислорода входящего в состав атмосферной воздушной смеси, что минимизирует долю поглощенных в результате многократного рассеяния γ -квантов в процессе их перемещения от радиаторов до регистрирующего сенсора. Все события ре-

гистрировались ППД на основе GaAs, подробнее об устройстве этого детектора будет изложено в **Главе 3**.

Триггерная система, представленная на 1.1б, осуществляла разделение событий по типу первичной частицы - процесс идентификации частиц, для определения соответствия в набранных данных [2]. Схема состояла из: S2, S3 пара **сцинтилляторов**, одновременное срабатывание которых, говорит о том, что регистрируемое событие - событие из числа частиц пучка. Они задают выделенное направление регистрируемых событий

MC Multiplicity Counter - **счетчик множественности** отсеивающий события с ливнями или события с кратными срабатываниями

PS PreShower Scintillator - **сцинтиллятор** перед которым установлена пластина из свинца, где налетающий на нее, в данном эксперименте, (e^-) порождает электромагнитный ливень, регистрируемый в PS, а налетающий (π^-) в большинстве случаев пролетает свинцовую пластинку без взаимодействия, и данным детектором регистрируется меньший по амплитуде сигнал

LG Lead Glass - **электромагнитный калориметр** установлен после PS, в объеме данного детектора e^- рождает электромагнитный ливень, а значит, наиболее вероятно, полностью поглощается в объеме данного детектора, и регистрируемый сигнал соответствует 20 ГэВ

Данная триггерная схема детекторов выполняет необходимые функции по разделению событий в пучке на два типа: (e^-) и (π^-). Получаемые, в ходе измерений, сигналы заводятся в логическую схему совпадений и антисовпадений, которая определяет для события флаг, соответствующий одному из данных типов [2].

1.3 НАБОРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В процессе измерений использовалось несколько конфигураций эксперимента с различными типами радиаторов отличных по типу материала, количеству пленок в одном радиаторе, а также толщин этих пленок. Перечень одиночных радиаторов представлен в таблице 1.1, а перечень комбинированных в таблице 1.2.

Таблица 1.1 — Параметры радиаторов: d_1 и d_2 толщина пленок и зазоры между пленками соответственно, N_f - количество пленок в радиаторе

Радиатор	Пленка/зазор	d_1	d_2	N_f
Майлар	майлар/воздух	50 мкм	3 мм	30
Майлар	майлар/воздух	50 мкм	3 мм	90
Полиэтилен	полиэтилен/воздух	27 мкм	0.5 мм	100
Полиэтилен	полиэтилен/воздух	27 мкм	0.5 мм	300
Полиэтилен	полиэтилен/воздух	27 мкм	0.5 мм	500
Полиэтилен	полиэтилен/воздух	35 мкм	0.5 мм	100
Полиэтилен	полиэтилен/воздух	35 мкм	0.5 мм	300
Полиэтилен	полиэтилен/воздух	35 мкм	0.5 мм	500
Полипропилен	полипропилен/воздух	15.5 мкм	0.21 мм	180

Таблица 1.2 — Конфигурации составленные из радиаторов представленных в таблице 1.1 для проведения измерений

Комбинированные				
Материал 1	d_1/N_f	Материал 2	d_1/N_f	N_{common}
Полиэтилен	35 мкм/400	Полиэтилен	28 мм/100	30
Полиэтилен	28 мкм/400	Полипропилен	15.5 мм/72	90
Полиэтилен	35 мкм/400	Полипропилен	15.5 мм/72	90

Также в процессе эксперимента, в различных конфигурациях, использовались трубы с Не о назначении которых говорилось в предыдущем разделе. Набор длин труб включал в себя 2 м, 1 м, 0.5 м, 0.3 м. Что позволяло регулировать возможность набора углового спектра, так как при малых углах, на близком расстоянии к радиаторам, невозможно разделить кластеры квантов ПИ от кластера регистрации первичной частицы.

2 ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

2.1 ОБЩЕЕ ВВЕДЕНИЕ

Долгое время за основу принимался факт, что равномерно прямолинейно двигающийся заряд не излучает. Данное утверждение является верным только с учетом следующих оговорок:

- среда однородна в пространстве
- среда неизменна во времени
- собственная скорость источника меньше фазовой скорости любой волны возможной в рассматриваемой среде

В остальном излучение двигающегося заряда в среде, фактически, можно считать правилом. Данное утверждение не было столь очевидно науке того времени до тех пор пока не было открыто излучение Вавилова-Черенкова и не было его теоретического обоснования сформированного Таммом и Франком в 1937г.

В процессе изучения возможности равномерно и прямолинейно двигающегося заряда излучать также было открыто переходное излучение (ПИ)[4]. В общем случае данный тип излучения возникает при движение источника в среде являющейся неоднородной или же изменяемой во времени среде[5]. В реальной ситуации ПИ может сосуществовать вместе с излучением Вавилова-Черенкова, тормозным, синхротронным и тому подобными видами излучений, но дальнейшее описание физики процесса возникновения ПИ будет производиться с оговоркой, что процесс рождения излучения Вавилова-Черенкова учитываться не будет.

Возможность излучения определяются из характеристик среды и задается похожим на соотношением:

$$\frac{vn}{c}. \quad (2.1)$$

Таким образом излучение возникает при некотором изменении данного параметра, что возможно при ускоренном движении источника, т.е. при движении с непостоянной во времени скоростью, а также при изменении свойств среды - изменении коэффициента преломления n . Именно то излучение, что вызвано изменением параметра n при $v = \text{const}$ называется переходным излучением, для которого роль показателя преломления играет:

$$\sqrt{\mathcal{E}} = n + i\kappa, \quad (2.2)$$

где $\mathcal{E}$ - комплексная диэлектрическая проницаемость среды.

Таким образом переходное излучение представляет собой испускание квантов электромагнитных волн при пересечении частицей неоднородной среды, в частности границы раздела двух сред с разной диэлектрической проницаемостью. Именно такой тип возникновения ПИ был рассмотрен И.М. Франком [5] в 1944 г.

Переходное излучение активно изучалось последующие несколько десятилетий. Экспериментаторы показали возможность создания функциональных детекторов переходного излучения (TRDs)[6], что привело к активному их использованию в области физики высоких энергий на таких экспериментах как ATLAS и ALICE, а также в астрофизических экспериментах типа PAMELA и AMS.

2.2 ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ ИЗОТРОПНЫХ СРЕД

Наиболее близким из теоретических вопросов переходного излучения к рассматриваемому эксперименту Test Beam 2021 является процесс излучения зарядом на границе раздела двух изотропных сред. Далее будет представлено теоретическое описание данного процесса.

Рассмотрим переходное излучение возникающее, когда некоторый заряд q с постоянной скоростью V пересекает границу раздела двух изотропных сред 1 и 2 (рисунок 2.1), характеризующихся различными значениями диэлектрической проницаемости $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$, а также магнитной проницаемо-

СТИ μ_1 и μ_2 .

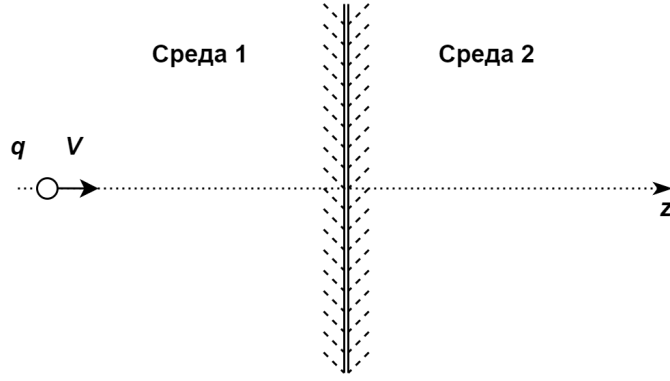


Рисунок 2.1 — Визуальное представление налетающей частицы на границу раздела двух сред

Вопрос относительно возможности считать, что скорость источника при излучении остается постоянной, разрешается предположением, что массу частицы можно в общем случае принять сколь угодно большой, тогда потери на излучения будут стремиться к нулю, а возникающие потери энергии возможно компенсировать работой внешних сил.

Используя уравнения Максвелла для описания электромагнитного поля, включая уравнение тока, раскладывая их в ряды Фурье по времени, а затем спроецировав результирующие выражения на направления коллинеарное и перпендикулярное к скорости можно получить уравнение, одним из решений которого будет выражение свободного излучаемого поля (2.3), в частности, поля излучения [4]:

$$E_{\omega, \kappa}^r(z) = \frac{4\pi i q}{\omega(2\pi)^3} \alpha \exp(\mp i \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon \mu - \frac{\kappa^2 c^2}{\omega^2}} z), \quad (2.3)$$

где верхний индекс r - излучение (*от англ. radiation*), α - безразмерная амплитуда излучения, дробный коэффициент вынесенный из амплитуды, представленный для удобства рассмотрения, κ и ω - переменные разложения в ряд Фурье, где κ - некоторый вектор, а ω - некоторая собственная частота излучения. Что касается знаков "+" и "-", то они соответствуют направлению излучения при $Z > 0$ и $Z < 0$ (при распространении излучения в среду 2 выбирается знак "+", в среду 1 знак "-"). Также стоит отметить, что уравнение 2.3 описывает поле излучения только в случае,

когда подкоренное выражение неотрицательно, следовательно:

$$\mathcal{E}\mu > \frac{\varkappa^2 c^2}{\omega^2}. \quad (2.4)$$

В контексте рассматриваемого эксперимента Test Beam 2021 особый интерес представляет переходное излучение ультрарелятивистских частиц, в частности угловое и энергетическое распределения. Как уже было представлено, при прохождении заряда через четкую границу раздела двух изотропных сред порождается излучение, распространяемое в среды 1 и 2 – излучение вперед и назад соответственно, которые, в свою очередь отличаются разными энергиями [4][5]. В случае ультрарелятивистских частиц справедливо соотношение для энергии:

$$W_2^r \gg W_1^r, \quad (2.5)$$

таким образом, что основная энергий излучения приходится на излучение вперед (по вектору скорости частицы).

Также особенностью переходного излучения ультрарелятивистских частиц является частота излучения:

$$\omega_{max} \sim \omega_{pe} \frac{\mathcal{E}}{Mc^2} = \frac{\omega_{pe}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad \frac{\mathcal{E}}{Mc^2} \gg 1, \quad (2.6)$$

где $\mathcal{E}$ - энергия частицы, M - масса частицы, ω_{pe} - плазменная частота, как характеристика вещества, в котором распространяется излучение. Другими словами, максимальная излучаемая частота зависит от энергии частицы, а также частота излучения попадает в область прозрачности любого вещества, что определяет применимость асимптотического соотношения для вычисления ω_{pe} в любом веществе.

Следующей особенностью является тот факт, что в области высоких частот описываемых выражением 2.6 определяется область со значительной концентрацией излучения вперед вдоль вектора скорости частицы, так что в пределах углов удовлетворяющих выражению 2.7 сосредоточена ос-

новная доля излучаемой энергии, что справедливо для любой среды [4].

$$\theta \sim \frac{Mc^2}{\mathcal{E}} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (2.7)$$

Возвращаясь к вопросу энергии переходного излучения ультрарелятивистских частиц, принимая во внимание факт того, что основная доля излучения приходится на излучение вперед (условие 2.5), определено выражение для энергии, проинтегрированное по всем возможным частотам излучения:

$$W^r = \frac{q^2}{3c} \omega_{pe} \frac{\mathcal{E}}{Mc^2}. \quad (2.8)$$

Видно, что энергия излучения растет пропорционально энергии частицы, но стоит отметить, что рост W^r с энергией $\mathcal{E}$ связан лишь с ростом характерной частоты излучения (выражение 2.6), таким образом число излученных квантов переходного излучения слабо зависит от энергии. Число γ -квантов излучения определяется выражением:

$$N^r \approx \frac{q^2}{\pi \hbar c} (\ln \frac{\mathcal{E}}{Mc^2})^2 \approx 0.0023 (\ln \frac{\mathcal{E}}{Mc^2})^2, \quad q = e, \quad (2.9)$$

Таким образом, видно, что полное число излученных γ -квантов с достаточно большой энергией растет пропорционально квадрату логарифма энергии. Из чего следует вывод: при не слишком больших энергиях на границе излучается существенно меньше одного кванта. Именно исходя из этого справедливо производить оценку числа квантов с энергией близкой к $\hbar\omega_{max}$, отношением W^r к $\hbar\omega_{max}$, что приводит к следующему выражению:

$$N^r \sim \frac{W^r}{\hbar\omega_{max}} \sim \frac{q^2}{3\hbar c}, \quad (2.10)$$

что в случае $q = e$ пропорционально постоянной тонкой структуры $1/137$.

3 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Пиксельные полупроводниковые детекторы, предназначенные для регистрации различного типа излучений — одни из самых высокотехнологичных приборов для регистрации частиц и γ -излучения. При их использовании, в различных типах установок, создаются калориметрические и координатные системы с высокими энергетическим и пространственным разрешениями, а также, для подобного рода систем, характерна высокая скорость быстрогодействия. Детекторы, разрабатываемые для экспериментов в физике высоких энергий, а также физике частиц, давно находят практическое применение в других областях науки. Так, полупроводниковые пиксельные детекторы, впервые примененные для регистрации треков частиц на экспериментах в ЦЕРН, впоследствии хорошо зарекомендовали себя в задачах связанных с получением рентгеновских изображений.

Технология производства гибридных пиксельных детекторов предполагает наличие двух основных элементов: чувствительного слоя детектора и микросхемы считывания. Благодаря малому размеру пикселя и режиму счета одиночных фотонов, реализованному в таких детекторах, данные устройства позволяют получать рентгеновские изображения с высоким пространственным разрешением.

3.1 ПРИНЦИП РАБОТЫ И УСТРОЙСТВО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДЕТЕКТОРА

Полупроводниковые детекторы относят к классу твердотельных ионизационных камер, в которых область дрейфа свободных носителей заряда определяется как чувствительная. Основные ионизационные потери частиц, регистрируемых детектором, идут на возбуждение электрон-дырочных пар. Среднее число свободных носителей заряда на длине трека регистри-

руемой частицы определяется выражением [7]:

$$\langle N \rangle = \frac{E}{E_{pair}}, \quad (3.1)$$

где E_{pair} - энергия, необходимая для возбуждения одной электрон-дырочной пары, являющаяся характеристическим параметром ППД, E - ионизационные потери частицы в объеме детектора.

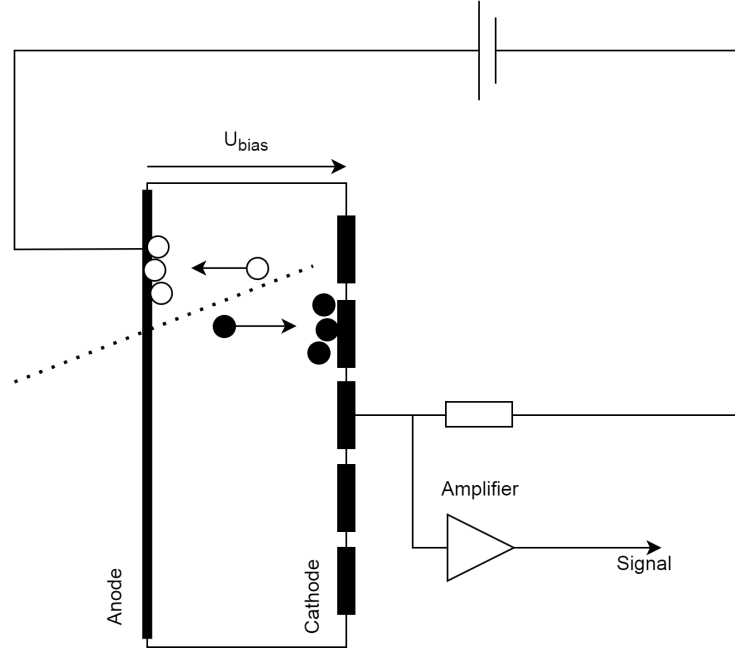


Рисунок 3.1 — Визуализация принципиальной работы ППД

Напряжение смещения U_{bias} поданное на электроды создает в объеме полупроводника электрическое поле, под действием которого носители заряда, образовавшиеся в следствии прохождения частицы и ее взаимодействия с веществом детектора, дрейфуют к считывающим электродам, наводя на них заряды. При малых электрических полях скорость дрейфа носителей определяется пропорционально напряженности электрического поля:

$$\vec{V}(x) = \mu \vec{E}(x), \quad (3.2)$$

где μ - подвижность носителей заряда, определяемая характеристиками детектора. Далее собранный с электродов заряд усиливается и преобразуется в импульс по напряжению, с которым, затем, работает считывающая электроника и триггерная схема установки.

В процессе дрейфа электронов и дырок часть из них рекомбинирует, или захватывается на дефектах кристалла полупроводника [7], таким образом не доходя до электродов. Следовательно наведенный на электродах заряд определяется дрейфовыми длинами электронов и дырок, а также зависит от глубины точки взаимодействия частицы с полупроводником. Таким образом выражение, определяющее эффективность сбора заряда (CCE от англ. *Charge Collection Efficiency*), выглядит так:

$$CCE = \frac{Q_{ind}}{Q} = \frac{1}{d}(V_p\tau_p(1 - e^{-\frac{x}{V_p\tau_p}}) + V_n\tau_n(1 - e^{-\frac{d-x}{V_n\tau_n}})), \quad (3.3)$$

где τV - соответствующие скорости дрейфа и времена жизни носителей заряда, d - толщина объема детектора, x - глубина взаимодействия частицы с веществом детектора. Данное выражение, называемое соотношением Хехта, показывает отношении наведенного на электроды заряда к величине, образовавшегося в результате взаимодействия частицы с полупроводником, заряда. Данное выражение вводит ограничение на линейные размеры производимых ППД для регистрации γ -квантов. Для повышения эффективности поглощения γ -излучения принято производить толстые сенсоры, что в свою очередь нетривиальная задача, в следствии ограничения, вызванного временами жизни носителей заряда, возникающими в конкретном полупроводнике. Таким образом, для наиболее эффективной работы детектора необходимо обеспечить значение CCE близкое к 100% с помощью выбора таких объемных размеров детектора, что они будут меньше длин пробега электронов и дырок.

3.2 ПОЛУПРОВОДНИКИ. GAAS И ЕГО ПРЕИМУЩЕСТВА

Большинство современных полупроводниковых детекторов сделано с использованием кремния (Si). Широкое использование данного материала обусловлено его преимуществами, среди которых, к примеру, высокая радиационная стойкость. Но также Si обладает существенным недостатком - плохое качество регистрации γ -квантов. Это обусловлено тем, что фотоны в основном взаимодействуют с веществом посредством фотоэффекта и мно-

гократного рассеяния Комптона [7]. Сечение данных процессов пропорционально Z^n , где Z - номер элемента в периодической таблице Менделеева, n - некоторая натуральная степень определяемая процессом взаимодействия. В случае Si, с небольшой величиной Z , вероятность регистрации γ -квантов крайне мала, по сравнению с рассматриваемым арсенидом галлия (GaAs), который, к слову, использовался как одна из компонент экспериментальной установки Test Beam 2021.

Производство детекторов на основе полупроводников вышло на новый этап - использование более сложных бинарных и тройных соединений. На данный момент наибольшей популярностью пользуются несколько таких сложных соединений, среди которых представлен, рассматриваемый, арсенид галлия (GaAs). В случае GaAs, чей атомный номер больше, чем у кремния (Si), можно сказать, что данный материал является перспективным для создания детекторов с целью регистрации γ -квантов в диапазоне энергий от 15 до 70 кэВ. Для данного материала экспериментально подтверждено, что эффективность поглощения фотонов с энергиями 60-70 кэВ для сенсора толщиной 1000 мкм составляет приблизительно 50% [7].

GaAs используется в производстве сверхвысокочастотных интегральных схем и транзисторов, лазерных диодов, но при этом обладает существенным недостатком - данный материал обладает большим количеством глубоких донорных центров, которые в ионизированном состоянии обладают большим сечением захвата электронов, что ограничивает время жизни свободных электронов до очень малого времени, а следовательно, определяет малую эффективность сбора заряда. Также GaAs обладает достаточно высоким удельным сопротивлением [8]. Для минимизации влияния данных недостатков и применения данного соединения в детекторной электронике, с целью реализации его преимуществ при регистрации *gamma*-квантов, было создано соединение GaAs:Cr (Cr - хром) с помощью технологии высокотемпературной диффузии. Удельное сопротивление для нового материала существенно уменьшилось, что приводит к допустимым уровням шумов и увеличению времени жизни свободных электронов до существенных значений [9].

3.3 TIMPIX3 - ГИБРИДНАЯ МИКРОСХЕМА СЧИТЫВАНИЯ

Международная коллаборация Medipix [10], основанная в Европейском центре ядерных исследований, производит семейство гибридных пиксельных микросхем считывания - Medipix. Создание гибридных полупроводниковых детекторов подразумевает под собой соединение чувствительного полупроводникового слоя с микросхемой считывания. Данная технология позволяет использовать различные материалы чувствительных элементов для производства детекторов под конкретные задачи в зависимости от области и условий применения. Общая структура гибридного ППД изображена на рисунке 3.2.

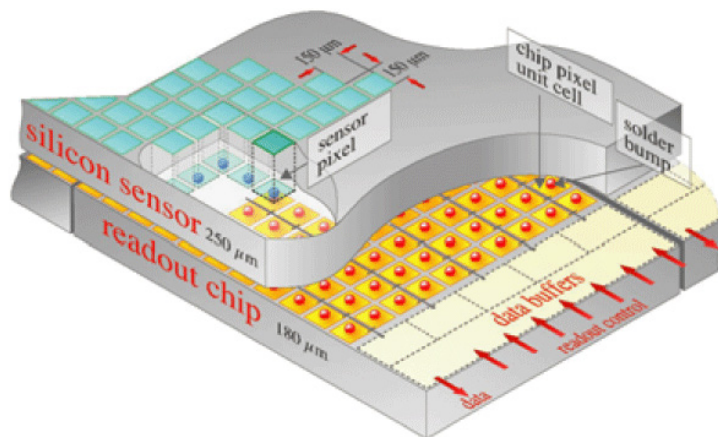


Рисунок 3.2 — Гибридная структура ППД

Medipix1 [11] - одна из первых микросхем, используемая в создании пиксельных полупроводниковых детекторов, разработанная на основе принципа регистрации и счета одиночных фотонов, что означает наличие зарядово-чувствительного усилителя и дискриминатора в электронной цепи каждого пикселя. Данная технология имеет место в каждом из последующих поколений электронных плат представленного семейства. Эволюция плат Medipix идет по пути упрощения технологического процесса производства, что влечет за собой качественные изменения в улучшении быстродействия и уменьшении потребляемой мощности при неизменных линейных размерах единичного пикселя регистрирующего сенсора.

Вплоть до третьего поколения производимых плат семейства Medipix в матрице информация представлялась в виде кадров регистрируемых со-

бытий за заданное время экспозиции, после чего следовало мертвое время - процесс сбора информации с сенсора. С появлением микросхемы TimePix3 ситуация изменилась, теперь возможен режим работы без триггера (*data driven*). Передача информации из пикселя происходит сразу после того, как частица была зарегистрирована - таким образом определяется данный режим работы. С третьим поколением был дополнительно реализован режим непрерывного чтения-записи, позволяющего считывать данные с детектора без мертвого времени, что доступно при всех режимах. Но данное преимущество также накладывает определенные ограничения на используемые зарядовые дискриминаторы. Оно выражается в том, что возможно использовать только половину от возможных порогов дискриминаторов, следовательно растет уровень шумов в регистрируемых событиях.

Основной принцип работы микросхем Medipix заключается в следующем: заряды, которые генерируются в материале сенсора при взаимодействии с частицами, дрейфуют к собирающим электродам под действием электрического поля в сенсоре. После чего возникает импульс тока на входе усилителя каждого пикселя. Поскольку время сбора заряда очень мало то выходной сигнал с сенсора может быть представлен в виде δ -импульса, интеграл которого равен суммарному наведенному заряду. Этот заряд интегрируется на конденсаторе обратной связи зарядово-чувствительного усилителя. После усиления амплитуда выходного сигнала сравнивается с заданным уровнем напряжения в схеме дискриминатора. Если амплитуда сигнала превышает этот уровень (энергетический порог), то событие записывается. Данная архитектура является основой для всех последующих поколений микросхем Medipix и в частности является основной для детекторов серии TimePix.

4 GEANT4. ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1 ОБЩЕЕ ВВЕДЕНИЕ

Современное представление экспериментов по физике высоких энергий, а также элементарных частиц, или же ядерной физики, определяет задачи по крупномасштабному, точному и всестороннему моделированию детекторов частиц, и возможности воссоздания физических процессов и взаимодействий излучения с веществом. Необходимость создания приложений способных разрешать подобные задачи обусловлена стремительным развитием детектирующих устройств, используемых в экспериментах: уменьшение габаритов отдельных элементов, сложность технологии изготовления, улучшение показателей энергетического и пространственного разрешения. Geant4 (*от англ. Geometry and Tracking*) - программный пакет реализованный с помощью объектно-ориентированного подхода на языке C++, который представляет собой связный набор компонентов, используемых в различных условиях - от простых, разовых исследований физических процессов и геометрий детекторов, до полномасштабных моделей экспериментов на БАК в ЦЕРН [12].

При реализации программных компонентов учитывались все аспекты процесса моделирования, необходимые для формирования наиболее емких результатов: геометрия системы, материалы, фундаментальные частицы, генераторы первичных в событии частиц, отслеживание (*трэкинг от англ. tracking*) частиц в процессе взаимодействия с материалами установки, внешние электрические и магнитные поля, физические процессы определяющие характер взаимодействия с веществом, хранение событий и треков частиц, визуализация геометрий и траекторий [13]. В основе Geant4 лежит множество физических моделей для обработки взаимодействий ча-

стиц с веществом, для широкого диапазона энергий. Возможности данного программного пакета определяются современными знаниями и сформированным опытом в области физики частиц, множеством фундаментальных экспериментов и опытов, их результатов, все это имеет отражение в Geant4. Также немаловажную роль играют доступные вычислительные мощности.

Объектно-ориентированный подход - основа современных приложений написанных на C++, и Geant4 не исключение. Данный подход, а также строгие правила разработки представляют возможным легкость и удобство в процессе добавления и реализации новых физических моделей, что просто необходимо для такой области науки, как физика частиц. В следующем разделе будет представлен краткий обзор основных принципов описания моделей в Geant4.

4.2 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Программный пакет предоставляет возможность создания геометрической и физической модели эксперимента с большим количеством компонентов различных форм и материалов, а также определить "чувствительные" объемы, информация о попадании частиц в которые наиболее интересна. Geant4 представляет обширный набор физических процессов для описания поведения частиц, а также возможность визуализации траекторий в событиях.

Общая структура организации программных компонентов пакета моделирования представлена на схеме 4.1[13]. Основу любой модели реализуемой с помощью Geant4 составляют следующие классы: *global* определяет систему единиц величин, константы, случайные числа; *materials* определяет материалы, их плотности, молекулярные составы веществ; *particles* описывает частицы, первичные и вторичные; *graphic* визуализация и графическое представление модели; *intercoms* технический класс определяющий возможности управления всей системой организации классов пользователем, а также связь между всеми классами внутри пакета. Выше по схеме идут классы используемые в процессе трэкинга (*от англ. tracking*) частиц и описания процессов их взаимодействия с пересекаемыми объемами - *track*, *tracking* и *processes*. Категория *hits* хранит инфор-

мацию о регистрируемых в чувствительных объемах частицах. Глобально процесс моделирования определяется структурной единицей *event*, а управляется с помощью *run*.

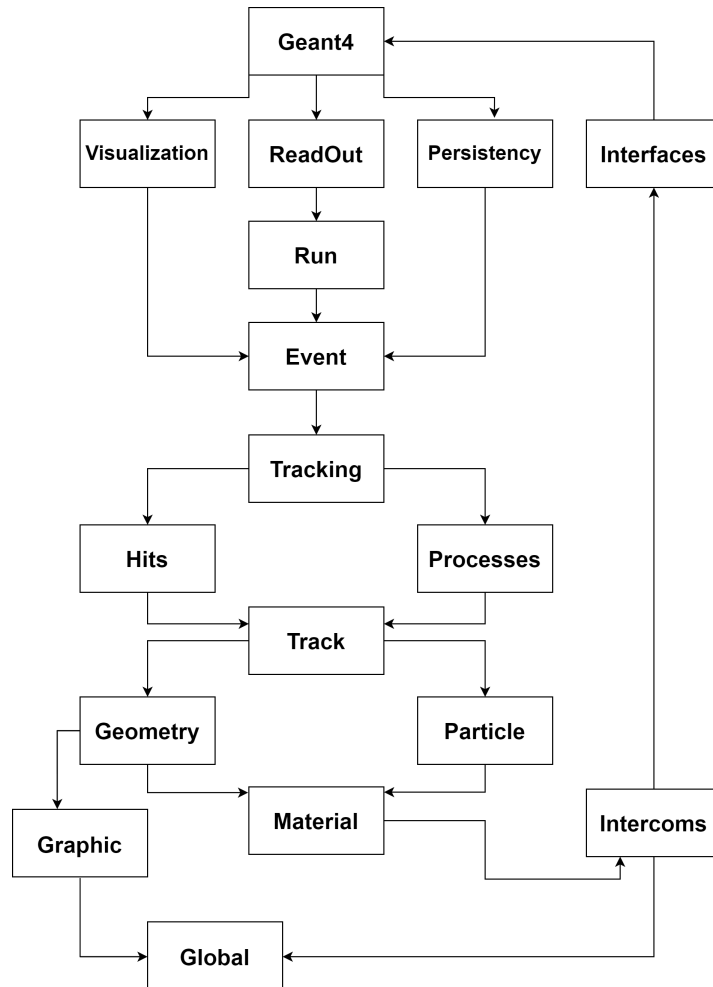


Рисунок 4.1 — Схема отношения классов программного пакета Geant4. Стрелками определено направление обратной связи зависимости классов.

Таким образом любая модель реализованная с помощью Geant4 должна включать в себя описание 3-ех основных классов, в отсутствие которых моделирование не будет производиться:

- определение материалов и задание распределений вещества в материалах детекторов
- генератор первичных частиц и их определение
- описание физических процессов участвующих в моделировании

Также дополнительно могут быть описаны:

- визуализация
- определены "чувствительные" объемы, описана их обратная связь
- введение пользовательских расширений

5 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ. РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

5.1 ВВЕДЕНИЕ

В следующих двух главах представлено описание процесса создания модели полупроводникового детектора переходного излучения эксперимента Test Beam 2021 с помощью программного пакета Geant4, основных и наиболее важных шагов программной реализации. Как уже оговаривалось в **Главе 4** описание любой физической модели для используемого программного пакета любого эксперимента начинается с последовательной реализации четырех ключевых классов:

- воспроизведение геометрии реальной установки
- определение материалов, и задание распределений вещества в материалах компонентов установки
- генератор первичных частиц и их определение
- описание физических процессов участвующих в моделировании

В первых двух разделах данной главы будет представлено подробное описание реализации указанных выше классов в контексте рассматриваемого эксперимента. Далее идет реализация эквивалента считывающей электроники детектора - идентификация регистрируемых частиц с помощью внутренних методов Geant4, методология обработки событий. Также особого внимания требует описание реализации физических особенностей рассматриваемого полупроводникового детектора, конкретно, диффузия заряда в детекторе. В **Разделе 5.6** представлены результаты моделирования обособлено от алгоритма кластеризации, а также описание алгоритма кластеризации, который является элементом обработки экспериментальных данных, чью точность, исходя из сравнительного анализа информации предоставляемой программным пакетом Geant4, есть возможность прове-

ритель. Результаты моделирования совместно с анализом выполняемым алгоритмом кластеризации, вынесены в отдельную главу, где также приведен подробный анализ полученных результатов.

Итак, в процессе выполнения работы были поставлены следующие задачи:

- проанализировать схему и устройство эксперимента Test Beam 2021
- реализовать геометрическую модель эксперимента сохраняя линейные размеры установки
- формирование пакета физических процессов необходимы при моделировании эксперимента
- создание алгоритма расчета эффекта диффузии в полупроводниковом детекторе
- объединение Geant4 моделирования с существующим алгоритмом кластеризации
- сравнительный анализ полученных результатов

Версия Geant4, используемая в процессе работы, является на данной момент последней и наиболее актуальной: 4.v11.0.

5.2 ОПИСАНИЕ ГЕОМЕТРИИ И МАТЕРИАЛОВ

Первым шагом по созданию качественной модели является задача по определению материалов, из которых состоят различные части установки, определение плотности и агрегатного состояния. Для этого, необходимо создать описание аналогичное примеру, представленному на листинге 5.1.

```
1 void Materials::Initialise(){
2     a = 4.0026*g/mole;
3     G4Element* elHe = new G4Element(name="Helium",
4         symbol="He", z=2., a);
5     density = 0.178*mg/cm3;
6     G4Material* He = new G4Material(name="He",
7         density, ncomponents=1);
8     He->AddElement(elHe, 1);
9 }
```

Листинг 5.1 — Пример описания однокомпонентного вещества — газообразный гелий

Материалы задаются внутри метода `Initialise`, класса `Materials`. Сначала определяется химический элемент согласно периодической таблице Менделеева (зарядовое число – z , масса – a). Затем необходимо задать состояние вещества при помощи определения его плотности (*density*), а также количество компонент, в роли которых выступают химические элементы, из которых будет состоять определяемая смесь (в данном случае $ncomponents=1$). А затем, к уже определенному полю, создаваемого вещества, применить метод по добавлению необходимого, согласно его химическому составу, элемента (строка 10 в 5.1). Далее приведена сводная таблица со всеми описанными и используемыми материалами и соединениями:

Таблица 5.1 — Таблица материалов экспериментальной установки

Многокомпонентные		
Материал	Хим. соединение	Плотность, ρ g/cm^3
Майлар	$C_{10}H_8O_4$	1.389
Полиэтилен	C_2H_4	0.94
Оргстекло	$C_5H_8O_2$	1.19
Арсенид галлия	$GaAs$	5.32
Сухой воздух*		1.2928
Однокомпонентные		
Материал	Хим. соединение	Плотность, ρ mg/cm^3
Азот	N_2	1.251
Кислород	O_2	1.429
Аргон	Ar_2	1.784
Гелий	He_2	0.178

Воздух представляет собой смесь газов с удельными массами, каждая компонента которого задается отдельно, как однокомпонентное вещество, инициализации которых происходит аналогично представленному примеру на листинге 5.1 (реализация воздушной смеси, а также соединения из которого выполнен детектор – GaAs представлено в **Приложении А**).

Далее необходимо задать геометрию экспериментальной установки, для чего с помощью определения примитивов, представленных в виде объемов типовых форм (цилиндр, параллелепипед, куб), в глобальной для экспозиции мира в Geant4 системе координат, определяются физические и логические объемы с присваиваемыми материалами. Пример определе-

ния сенсора полупроводникового детектора на основе GaAs представлен на листинге 5.2.

```
1 G4VPhysicalVolume* DetectorConstruction::Construct(){
2     G4Material* GaAs = Materials::GetInstance()->GetMaterial("GaAs"
3         );
4     G4Region* PixReg = new G4Region("PixelDetector");
5     G4LogicalVolume = logicalPixelDetector[10];
6     G4VSolid* solidPixelDetectorVolume = new G4Box("PixelDetector",
7         FirstPos, FirstPos, 0.5*0.05*mm);
8     for(G4int i = 0; i < 10; i++){
9         logicalPixelDetector[i]=new G4LogicalVolume(solidPixelVolume,
10             GaAs,
11             PixName[i]);
12         PixReg->AddRootLogicalVolume(logicalPixelDetector[i]);
13         new G4PVPlacement(0, G4ThreeVector(0, 0, (i+1)*0.05*mm),
14             PixName[i],
15             logicalPixelDetector[i],
16             physicsWorld, false, 0);
17     }
18 }
```

Листинг 5.2 — Определения объема полупроводникового детектора с использованием GaAs с помощью программного пакета Geant4

Описание объемов происходит в классе `DetectorConstruction` и методе `Construct`. Для этого необходимо объявить материал и положение координаты центра задаваемого объема. Также определяется некоторый регион *G4Region*, для которого, в дальнейшем, будут установлены пороги на энергии трассируемых, в процессе моделирования, частиц (частицы с энергией меньше порога отбрасываются и их траектории не просчитываются). Определяется физический объем в виде некоторого примитива, в представленном случае, это параллелепипед *G4Box*. Затем, на основе физического объема, задается логический. На данном этапе, данному объему присваивается необходимый материал, а также задается уникальное имя, которое будет использоваться для предварительной обработки моделируемых событий. Причина, по которой рассматриваемый детектор имеет структуру из десяти последовательных слоев, будет описана далее в **Разделе 5.5.2**.

Расположение всех элементов определялось геометрией реальной установки, для этого в процессе эксперимента были произведены измерения

всех линейных размеров (схема 5.1), что позволило наиболее достоверно передать расположение всех элементов вдоль оси Z (все компоненты установки симметричны относительно нуля в плоскости XoY). Стоит отметить, что детектор обладает тонким напылением, выполненным из никеля (Ni), толщиной в 1 мкм, а тыльные стороны трубы из оргстекла, затянуты пленкой из полиэтилена, что также задается отдельными объемами.

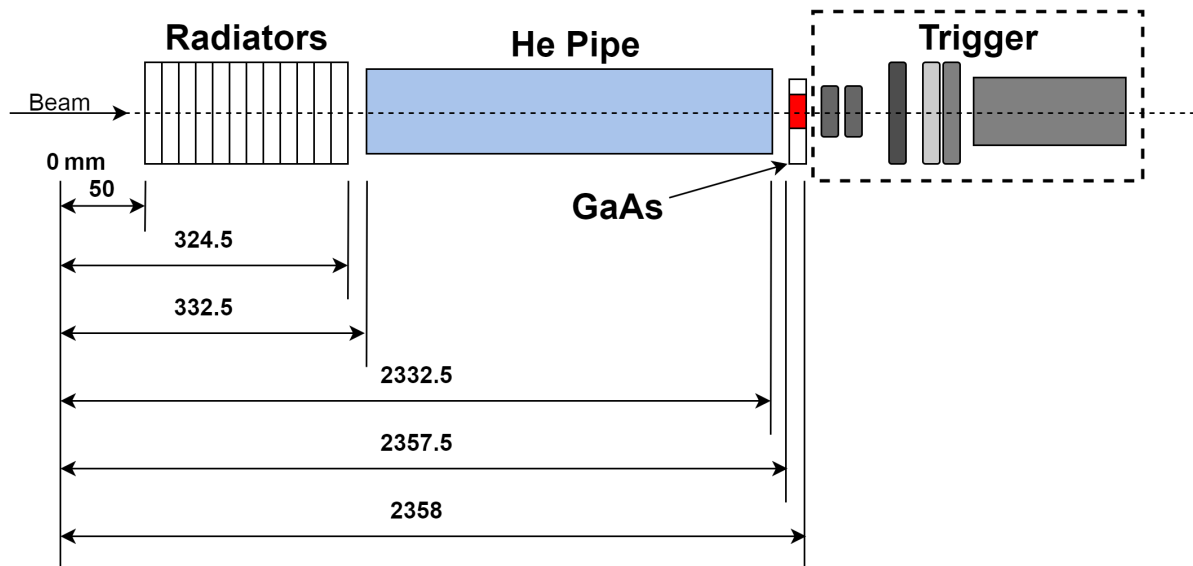


Рисунок 5.1 — Расположение компонент экспериментальной установки вдоль оси Z (толщина сенсора 500 мкм)

Геометрия, отдельно выбранных, элементов задавалась с помощью базовых форм, с использованием реальных размеров. В таблице 5.2 представлен перечень всех компонент установки, форм описывающих их объемы, линейных размеров, ассоциированных с ними материалов.

Описание установки отличается в двух аспектах, относительно реальной жизни. Первый из них - способ описания матрицы детектора, для которого, можно использовать отдельные объемы, для описания каждого пикселя в отдельности. Исходя из того, что сенсор состоит из 65536 пикселей, необходимо описать именно такое количество объемов, что негативно отражается на времени выполнения программного кода. Было принято решение задать матрицу одним сплошным объемом, эквивалентным реальному детектору, а разделение на пиксели производить аналитически, на этапе обработки событий.

Второе отличие связано с особенностью методологии определения радиаторов, в объеме которых, исходя из физики изучаемого процесса,

Таблица 5.2 — Сводная таблица всех описанных объемов

Прямоугольные					
Элемент установки	Форма	Материал	l_x, mm	l_y, mm	l_z, mm
Радиатор	Параллелепипед	Майлар	123	110	42.75
Напыление	Параллелепипед	Никель	14.08	14.08	0.001
Сенсор детектора	Параллелепипед	GaAs	14.08	14.08	0.5
Цилиндрические					
Элемент установки	Форма	Материал	r_{xy}, mm	h, mm	
Трубка	Полый цилиндр	Оргстекло	85	2000	
Объем газа	Цилиндр	Гелий	80	2000	
Пленка на трубке	Цилиндр	Полиэтилен	85	0.02	

должно генерироваться переходное излучение. В реальности радиатор представляет собой множество пленок, расположенных друг за другом, на строго заданном расстоянии, об этом подробно говорилось в **Главе 1**. Для Geant4, радиатор задается объемом в форме параллелепипеда, с плотностью вещества, эквивалентному смеси материала, из которого изготовлена пленка, а также того, что заполняет зазоры между пленками внутри радиаторов. В данном случае это воздух.

Таким образом, получена полная геометрия с необходимыми материалами, эквивалентная схеме реальной установки. Это один из самых объемных этапов создания модели в Geant4, после которого следует формирование физического листа из процессов, происходящих в установке в ходе эксперимента. Об этом речь пойдет в следующем разделе.

5.3 ФИЗИЧЕСКИЙ ПАКЕТ

Следующим шагом по созданию полной модели полупроводникового детектора переходного излучения, с помощью программного пакета Geant4, является формирование физического листа - списка всех предполагаемых процессов, происходящих в установке. Для его описания, требуется создать класс Physics List, и проинициализировать все необходимые, предварительно описанные командой разработчиков Geant4, наборы физических процессов, которые были объединены по типу взаимодействия. Ниже перечислены все физические пакеты, и включенные в моделирование:

- Пакет электромагнитных процессов:
 - рождение e^-/e^+ пар
 - Комptonовское рассеяние
 - фото-эффект
 - Рэлееское рассеяние
 - Кулоновское рассеяние
 - ионизация
 - тормозное излучение
 - аннигиляция e^+
- Пакет процессов распада:
 - слабые распады (лептонный, радиоактивный)
 - электромагнитные распады (π^0 , Σ^0 , и т.д.)

А также дополнительно подключенные, не входящие ни в один из существующих пакетов, процессы:

- флуорисценция
- рождение ожэ-электронов
- переходное излучение
- транспортировка частиц сквозь среду (электромагнитное поле, твердое тело, и т.д.)

Все указанные выше процессы, объединенные в пакеты, формируют программное описание того, где и как задаваемая частица может провзаимодействовать. Таким образом, все задаваемые процессы выполняют две основные задачи: принятие решения о том где, и когда произойдет взаимодействие, а также, генерация конечного состояния взаимодействия (изменение импульсов, рождение вторичных частиц и т.д.). Выполненная реализация класса Physics List, а конкретно, подключение физического процесса переходного излучения представлена на листинге 5.3. Стоит отметить, что процессы рождения ожэ-электронов и флуоресценции задаются в отдельном файле, специально отведенными макрос-командами.

Для подключения данного процесса к моделированию необходимо инициализировать структуру характеристик радиатора. А также, явно указывается частица, для которой данный процесс должен быть рассчитан, в данном случае это электрон. Затем этот процесс добавляется в список значимых для моделирования (в строке 11).

```

1 void PhysicsList::ConstructTR(){
2   RadiatorDescription* fDescription = fDetector->
     GetRadiatorDescription();
3   fXTRProcess = new G4TransparentRegXTRadiator(fDescription->
     fLogicalVolume,
4     fDescription->fFoilMaterial,
5     fDescription->fGasMaterial,
6     fDescription->fFoilThickness,
7     fDescription->fGasThickness,
8     fDescription->fFoilNumber,
9     "RegularXTRadiator");
10  G4ProcessManager* manager = G4Electron::ElectronDefinition()->
     GetProcessManager();
11  manager->AddDiscreteProcess(fXTRProcess);
12 }

```

Листинг 5.3 — Подключение процесса переходного излучения к физическому моделированию в Geant4

После того, как был сформирован набор физических процессов, необходимо ввести в моделирование генератор первичных частиц, определяемых конфигурацией эксперимента. Каждой запускаемой частице, ее прохождению через всю экспериментальную установку, соответствует одно событие, множество которых будет составлять статистику для Монте-Карло моделирования. Для создания генератора первичных частиц, определяется тип частицы, ее энергия, направление полета, положение точки вылета.

```

1 double PrimaryGenerator::SetBeamProfile(double *b_coord) {
2   std::unique_ptr<TFile> file( TFile::Open("BeamProfiles/
     BeamProfile_20GeV.root") );
3   if (!file || file->IsZombie()) {
4     std::cerr << "Error opening BeamProfile file" << std::endl;
5     exit(-1);
6   }
7   std::unique_ptr<TH2> beamHist( file->Get<TH2>("
     h_BeamParticleClusterPosition"));
8   beamHist->GetRandom2( reinterpret_cast<Double_t &>(b_coord[0]),
     reinterpret_cast<Double_t &>(b_coord[1]));
9   return *b_coord;
10 }

```

Листинг 5.4 — Реализация генератора профиля пучка в Geant4

Для более точного воспроизведения экспериментальных данных, так как пучок частиц имеет некоторый профиль, необходимо воссоздать его для моделирования. Конкретно реализация генератора частиц, по полученному в процессе эксперимента профилю, представлена на листинге 5.4. он представлен в виде специального файла. Используя программный пакет ROOT для анализа данных, из этого файла, с помощью генератора случайных чисел, что также представлено на листинге 5.4, выбирается один из заполненных бинов гистограммы с координатами X и Y , который затем используется для определения точки вылета первичной частицы. Профиль, полученный в результате одного из запусков моделирования, представлен на рисунке 5.2.

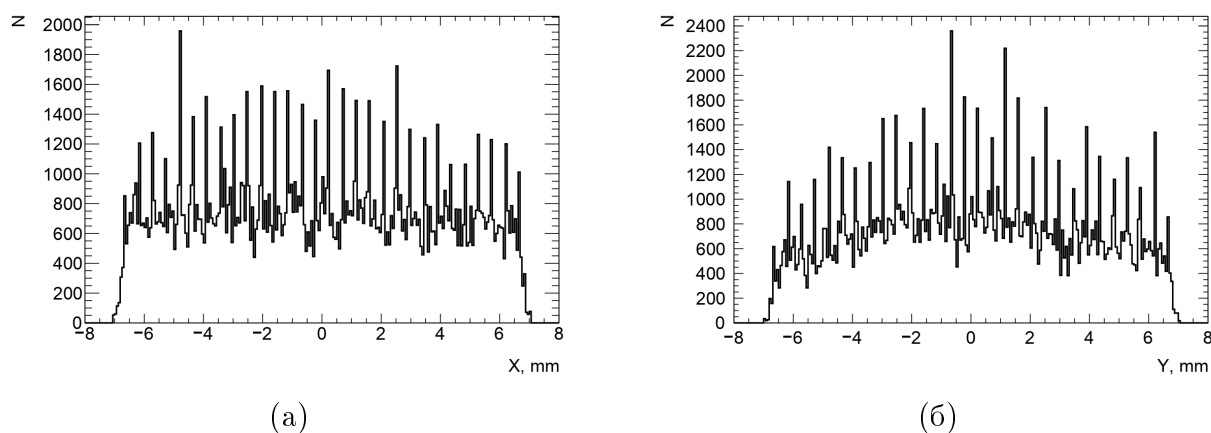


Рисунок 5.2 — Профиль пучка в процессе моделирования: (а) – проекция на ось X , (б) – проекция на ось Y

Итак, выполнен следующий шаг по созданию модели полупроводникового детектора переходного излучения эксперимента Test Beam 2021. Данный этап реализации включает в себя описание и формирование физического пакета, предполагаемых физических процессов, а также генератор первичных частиц, с профилем пучка, аналогичным экспериментальному. Далее необходимо написать алгоритм обработки каждого события на основе предоставляемой Geant4 информации. Речь об этом пойдет в следующем разделе.

5.4 ОБРАБОТКА СОБЫТИЙ В ПРОЦЕССЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В процессе моделирования частица трассируется через все заданные физические объемы, что сопровождается возможными взаимодействиями согласно указанному физическому пакету и включенным в него процессам. Так, в объеме радиаторов, происходит рождение γ -квантов переходного излучения. Следовательно, в определенный момент времени, согласно всем физическим процессам, указанным для моделирования, на матрицу детектора падает определенный набор частиц, состоящий из первичной частицы, в данном случае электрона, и нескольких квантов переходного излучения, возможных квантов тормозного излучения, вторичных электронов образованных в ходе, к примеру, фотоэффекта вне объема полупроводникового детектора, а также позитронов. Возникает задача о разделении частиц внутри моделирования. Необходимо установить тип частицы, процесс в ходе которого она появилась, была ли она вообще зарегистрирована детектором, то есть, произошло ли энерговыделение в объеме детектора, а также, в контексте рассматриваемого пиксельного детектора, необходимо определить то, куда попала частица. Для решения данной задачи реализована пользовательская часть класса Stepping Action, с включенной в него структурой G4Step, схема которого представлена на схеме 5.3. Каждый

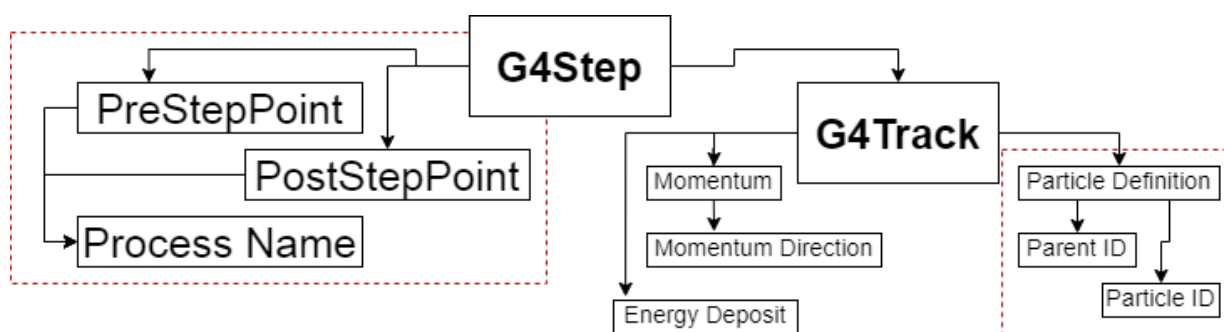


Рисунок 5.3 — Организация класса G4Step

из задаваемых объемов имеет уникальное имя, в случае рассматриваемого полупроводникового детектора на основе GaAs - "*Pixel Detector*". Следовательно, проходя по всему набору созданных экземпляров G4Step, необходимо выбрать те, которые появились в объеме с нужным именем - то что попало в матрицу детектора. Такая единица как step представляет собой

отрезок с двумя точками - *Pre Step Point* и *Post Step Point*, для каждой из которых определены координаты X, Y, Z , наименования процессов произошедших в этих точках. Также предполагается что частица потеряла некоторую энергию, которая равномерно распределена по длине данного отрезка. Также можно получить подструктуру - *Track* в которой хранится информация о том, какой уникальный номер имеет рассматриваемый трэк частицы, и какой номер был у частицы относящейся к рассматриваемой, как родительская.

Располагая такой полной информацией, которую предлагает *G4Step*, становится возможно реализовать следующие алгоритмы:

- установление факта регистрации, определение наличия энерговыделения
- определение типа частицы, отнесение к классу первичной или кванта переходного излучения
- соотнесение вторичных частиц с их родительскими для верной ассоциации их суммарного энерговыделения и построения необходимых спектров.
- определение места регистрации частицы с помощью аналитической сетки - эквивалент работы пиксельной структуры детектора

Выделив те шаги, что были созданы внутри интересующего объема "*Pixel Detector*", следующим этапом является определение факта регистрации частицы, для чего искомая частица должна выделить некоторую энергию внутри детектора, что эквивалентно образованию свободных носителей заряда в объеме сенсора.

Проверив, что рассматриваемые элемент *G4Step* относятся к частице, которая потеряла какую-то энергию в интересующем объеме, можно перейти к идентификации частицы с помощью подструктуры *Track*. Используя внутреннее определение, к примеру фотона, возможно сравнить его с анализируемым, в конкретный момент времени, трэком и ассоциированным с ним определением. Вместе с тем, в условиях данного эксперимента, важно разделять те кванты, что относятся к тормозному излучению и переходному излучению, электроны относящиеся к ионизации первичной частицей, или рожденные в процессе фотоэффекта и т.д. Это возможно определить только в случае, если частица имеет уникальный номер роди-

тельской частицы, свидетельствующий о том, что рассматриваемая частица была рождена из-за взаимодействия какой-то другой. Тогда, в результате обращения к элементу *creator process*, предоставляется информация о том, в ходе какого процесса была рождена та или иная частица.

Важно, что при моделировании события в однопоточном режиме Geant4 придерживается строго порядка обхода шагов частиц. Первоначально генерируются все шаги (*от англ. step*) первичной частицы, затем, постепенно, вторичные, для каждой из которых, сразу после нее, рассматриваются шаги проделанные ее вторичными частицами. Что позволяет разделять электроны от ионизации фото-электронами или первичной частицей и дочерних к ней электронами.

Теперь имея полную информацию о том, какая частица прилетела в детектор, потеряла ли она в нем некоторую энергию, и с какой, первичной по отношению к ней, частицей нужно ассоциировать это энергосвечение, важной задачей является реализация работы пиксельной структуры исследуемого детектора. Как уже оговаривалось, на этапе описания геометрии установки, было принято решение описывать сенсор не из множества отдельных объемов (65536 пикселей), а в виде одного, сплошного, что существенным образом повысило производительность и скорость исполнения кода, а разбиение произвести аналитически, выделяя это в отдельный алгоритм пикселизации. Визуализация принципа работы алгоритма представлена на схеме 5.4.

Исходя из информации о том, что точки отрезка(шага), имеют координаты на их основе можно понять, каким образом ориентирован трек частицы внутри детектора по отношению к пикселям, находятся ли он полностью в одном, или же переходит из одного пикселя в другой, то в каком отношении он делится между соответствующими частями объема сенсора. Данный алгоритм позволяет строить состояния матрицы детектора в каждом событии - то какие пиксели сработали и какую энергию зарегистрировали.

Итак, описав геометрию, задав физический пакет, сформировав алгоритм пикселизации событий, а также алгоритм разделения частиц по их типу для ассоциации энергосвечений, и принятия решений о том, чтобы записывать это событие в статистику или нет, закончен этап базового опи-

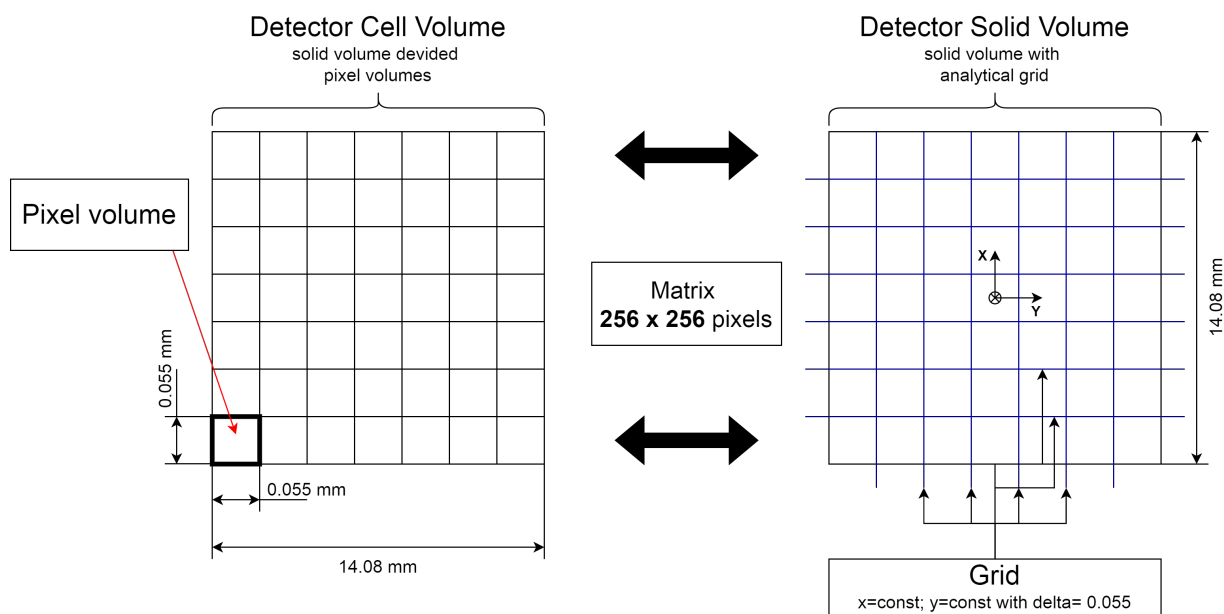


Рисунок 5.4 — Визуальная интерпретация работы процесса пикселизации события

сания Geant4 моделирования. Теперь можно перейти к реализации не менее важных особенностей работы полупроводникового детектора, одной из которых является диффузия заряда в детекторе, что приводит к размытию координаты регистрации частицы сенсором. Данный эффект приводит к тому, что при регистрации частицы срабатывает не один, а несколько соседних пикселей, образующих кластеры. Подробнее об этой особенности и ее описании в Geant4 будет рассказано в следующем разделе.

5.5 ОСОБЕННОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДЕТЕКТОРА

Как уже оговаривалось, в процессе работы полупроводникового детектора наблюдается эффект диффузии заряда, который в свою очередь влечет за собой размытие координат регистрации частиц - срабатывает не один, а большее число пикселей. О теоретической составляющей данного процесса, изложено в **Разделе 5.5.1**, а в **Разделе 5.5.2** представлена реализация пользовательского класса *Charge Diffussion*.

5.5.1 ДИФФУЗИЯ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ДЕТЕКТОРЕ

Проблема диффузии заряда в детекторе мешает улучшению пространственного разрешения в пиксельном детекторе с помощью перехода к меньшим размерам пикселя. Это выражается в виде ограничения, обусловленного размером облака носителей заряда, созданного в точке взаимодействия частицы с веществом детектора. Данные размеры определяются, в основном, пробегом фотоэлектронов, образованных в результате фотоэффекта. Также γ -квант может взаимодействовать с материалом сенсора через механизм комптоновского рассеяния. В результате, может образовываться несколько областей энерговыделения, разнесенные друг от друга на расстояния больше размера пикселя. Кроме того, во время дрейфа, пакеты носителей свободных зарядов, диффундируют в сторону меньшей концентрации вдоль линий электрического поля, образованного приложенным напряжением смещения к сенсору детектора. И внутри этого пакета, элементарные заряды испытывают кулоновское расталкивание, что приводит к увеличению размера облака.

Форма распространения заряда в объеме детектора определяется распределением Гаусса с дисперсией [14]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2nk_B T l d}{eU_{bias}}}, \quad (5.1)$$

где $n = 3$ – число пространственных измерений, k_B – постоянная Больцмана, T – температура детектора, l – расстояние от точки взаимодействия до считывающего электрода, d – толщина детектора, e – заряд электрона, U_{bias} – приложенное напряжение смещения. В результате данного процесса облако электрон-дырочных пар способно навести заряд на несколько соседних пикселей в следствии чего образуются кластеры регистрации. Визуальное представление диффузии изображено на схеме 5.5.

В 2018 году в Объединенном Институте Ядерных Исследований, с использованием аналогичного полупроводникового детектора семейства TimePix3 на основе GaAs, были произведены измерения величин характерных размеров диффундирующего облака, в зависимости от расстоянии между точ-

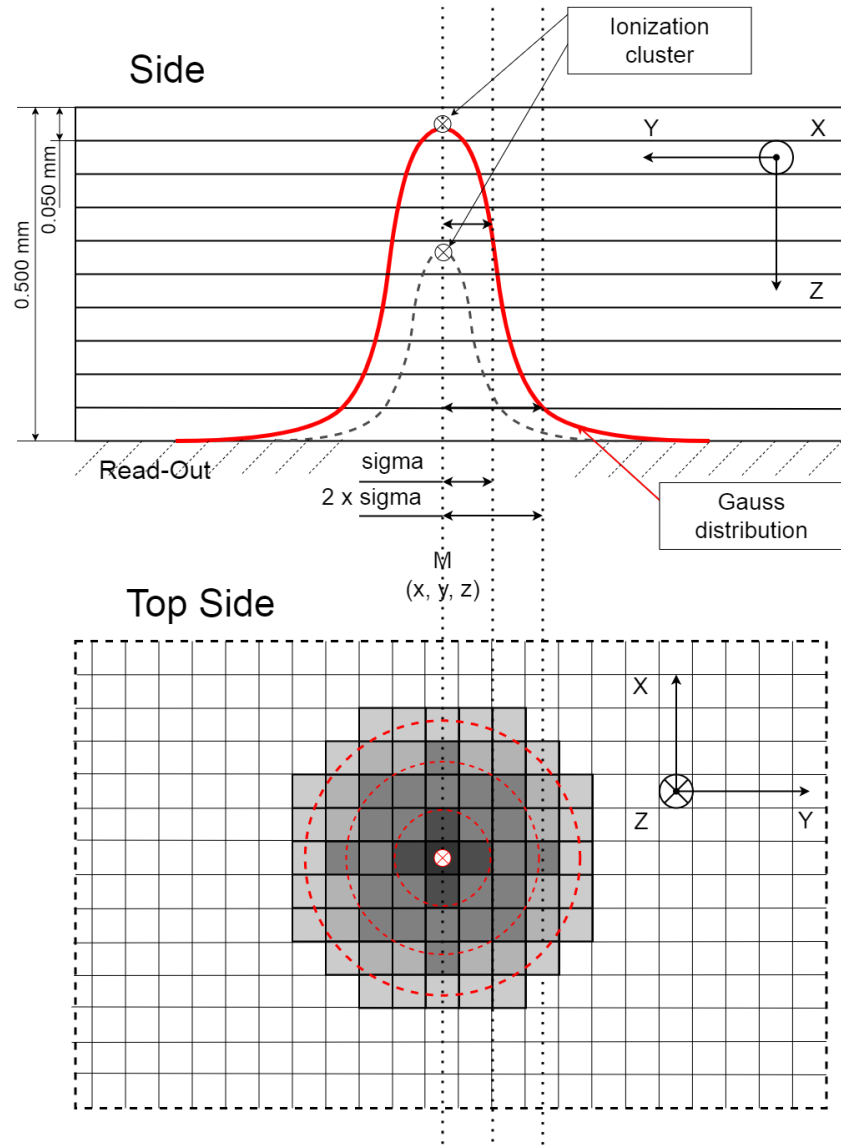


Рисунок 5.5 — Визуальная интерпретация эффекта диффузии в двух плоскостях – распространение облака заряда в двух проекциях

кой взаимодействия частицы с веществом, из которого изготовлен сенсор, и считывающим электродом. Проведенные измерения привели к заключению о функциональной зависимости $\sigma(l)$, которая приняла отличный от аналитической функции полученной в [14] вид:

$$\sigma = 0.014l + 2\mu t, \quad (5.2)$$

В процессе данных измерений научной группой было установлено, что независимо от положения точки взаимодействия, имеет место облако носителей заряда с минимальной сигма, равной 2 мкм. Это значит что при $l = 0 : \sigma(0) = 2\mu t$.

Забегаая немного вперед, в Geant4 моделировании реализована функция описываемая выражением 5.2, как соответствующую реальному детектору.

5.5.2 РЕАЛИЗАЦИЯ ДИФФУЗИИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ДЕТЕКТОРЕ В GEANT4

Суть эффекта диффузии заряда в детекторе заключается в том, что носители этого заряда под действием кулоновских сил расталкиваются, и при продвижения к считывающему электроду, облако увеличивается в размерах. В процессе Geant4 моделирования, все анализируемые процессы рассматриваются с точки зрения выделяемой в объеме детектора энергии, а не образованного, в процессе регистрации, заряда. Но так как, исходя из работы детектора, собираемый заряд преобразованный в импульс тока, по своей амплитуде эквивалентен некоторой энергии. Это говорит о том, что рассматриваемый детектор является пропорциональным, следовательно, при описании процесса диффузии заряда в Geant4, можно рассматривать, выделяемую в каждом акте взаимодействия с веществом, энергию.

Информация о том, какой из типов взаимодействия или видов процессов произошел, во время прохождения объема детектора, частицей, хранится в том же классе *G4Step*, в конечной точке рассматриваемого шага, определяемой как *Post Step Point*. С целью приблизить влияние эффекта размытия заряда к реальному, были выполнены следующие операции:

- разбиение объема детектора на несколько слоев перпендикулярно направлению движения частицы
- переопределение точки, относительно которой рассчитывается диффузия

Оба решения, предположительно, должны повысить точность расчетов и положительно повлиять на результат реализуемого моделирования.

Разбиение на слои призвано повысить среднее число совершаемых Geant4 шагов (**Приложение Б**) при обработке события и трассировке частиц, что позволяет точнее моделировать распределение заряда в детекторе. Схематичное отображение введенных изменений представлено на схеме 5.6.

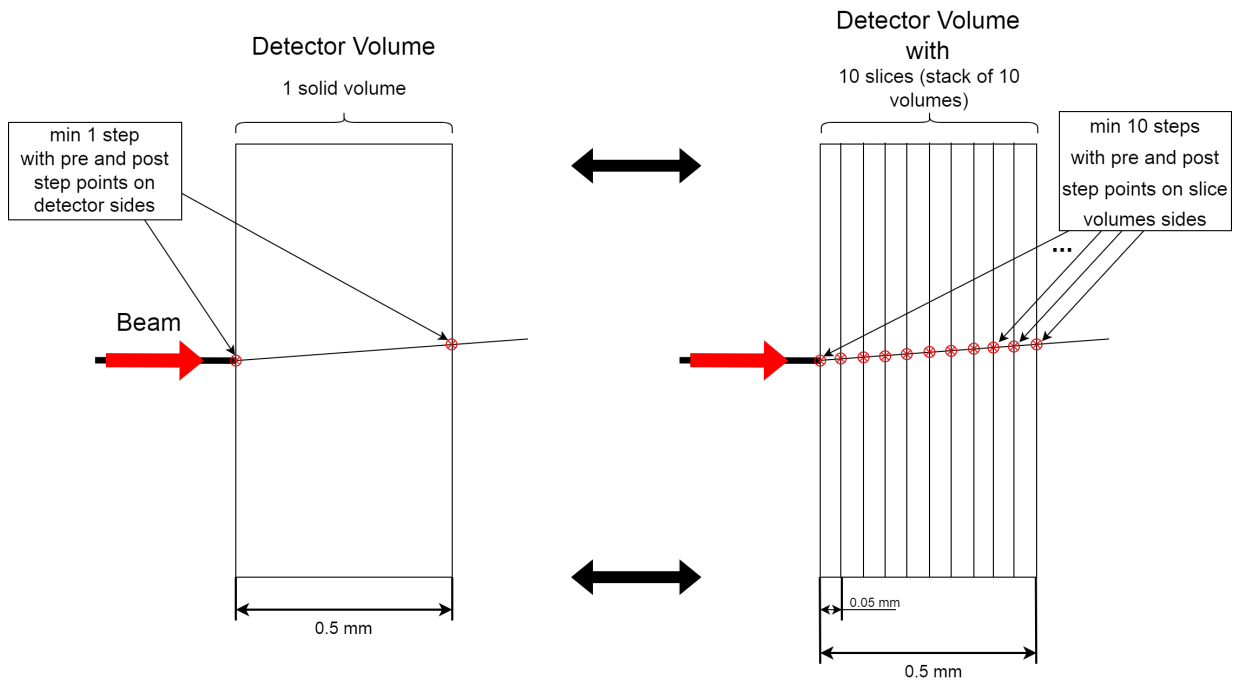


Рисунок 5.6 — Визуальное представление следствия перехода на многослойную схему устройства детектора

Решение связанное с переопределением точки относительно которой рассчитывается диффузия означает использование средней для шага точки (ее координат X, Y, Z). Оно обосновано тем, что могут возникать ситуации в которых какая-нибудь вторичная частица имеет траекторию с большой проекцией на плоскость XoY . Следовательно шаг для которого рассчитывается диффузия не всегда может находиться полностью внутри области размытия заряда, что важно, так как считается, что энергия вдоль шага распределена равномерно. Перенос вычислений в точку, являющуюся серединой шага, увеличивает вероятность того, что шаг будет полностью помещаться в желаемую область.

Как уже освещалось в **Разделе 5.4**, используя все предлагаемые Geant4 возможности, имеется полная информация о каждом из шагов, совершенных программным пакетом в процессе трассировки частиц сквозь все компоненты экспериментальной установки. Теперь необходимо реализовать для каждого, отобранного в процессе обработки событий, шага функцию расчета диффузии. Был реализован пользовательский класс. Для этого, определяя среднюю точку шага, вычисляется расстояние от нее, до считывающего электрода – l в функции $\sigma(l)$. После чего, вычисляется сама

величина σ . На основе полученной величины, с помощью дополнительных функций из программного пакета ROOT, составляется двухмерная функция распределения Гаусса, вычисляется ее интеграл по 6σ , что определяется, как объем по которому равномерно распределена размываемая энергия. Следующим этапом, необходимо определить какие пиксели находятся под заданным распределением Гаусса. Локализуется область, в которой происходит диффузия, путем циклического обхода только тех пикселей, чьи координаты центра в плоскости XOY находятся внутри окружности с радиусом в 6σ (это фактически не влияет на точность пересчета энергии, т.к. в пределах 6σ лежит более 99% объема распределения). Далее вычисляется интеграл от созданной ранее функции, в пределах каждого отобранного пикселя. Полученное значение, подставленное в выражение 5.3, определяет ту энергию, которая попала в данный, конкретный пиксель.

$$E_{pixel} = \frac{I_{pixel}}{I_{full}} E, \quad (5.3)$$

где I_{pixel} – интеграл от функции в пределах пикселя, I_{full} – полный интеграл от функции по 6σ , E – энергия выделенная на этом шаге.

Таким образом реализация диффузии приближает модель к реальной установке. Так как основной целью моделирования, первоначально, является воспроизведение экспериментальных данных, и в данном случае, реализация процесса размытия заряда – обязательная к описанию механика.

5.6 ФОРМИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Заключительный этап реализации моделирования полупроводникового детектора в эксперименте Test Beam 2021 с помощью программного пакета Geant4 представляет собой формирование ROOT файла с результатами моделирования. Данный файл включает в себя набор распределений для отладки модели в процессе разработки и промежуточных измерений. Далее в **Разделе 5.6.1** представлены некоторые из таких результатов, которые позволяют оценить то, насколько качественно были реализованы

различные механики, включенные в процесс моделирования. Перед тем, как перейти к основным результатам работы, которые представлены в **Главе 6** и подразумевают под собой сравнение моделирования с реальными данными, необходимо поверхностно рассмотреть алгоритм кластеризации, функциональная часть которого была разработана научной группой Национального Ядерного Университета МИФИ для обработки результатов эксперимента. Об этом речь пойдет в **Разделе 5.6.2**.

5.6.1 РЕЗУЛЬТАТЫ GEANT4 МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как уже оговаривалось, результаты моделирования оформляются в виде ROOT файла для большего удобства в последующей обработке и представлении результатов. Внутри файла лежит дерево с достаточно примитивной структурой (схема 5.7). В процессе моделирования, для каждого со-

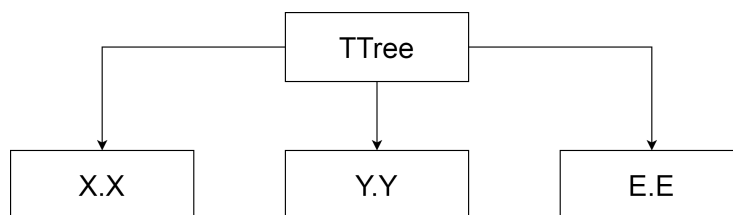


Рисунок 5.7 — Архитектура дерева

бытия формируется три вектора, в которых записаны координаты по X и Y , соответствующие положению центра сработавшего пикселя (в нем выделилась некоторая энергия), а также зарегистрированная в них энергия. Данные векторы, записываются в соответствующие ветви, уже описанного ранее дерева. Таким образом, каждое вхождение в дерево – отдельное событие с полной информацией, какие из пикселей что-то зарегистрировали, и какая в каждом из этих пикселей, выделилась энергия. Данная архитектура позволяет представить картину матрицы в каждом событии, а также объединить моделирование с существующим алгоритмом кластеризации, о котором речь пойдет в **Разделе 5.6.2**.

Помимо представленного дерева, в виде результатов моделирования, на основе информации предоставляемой программным пакетом, формируются приведенное ниже распределение, на котором сравниваются один из основных спектров, до и после введения диффузии:

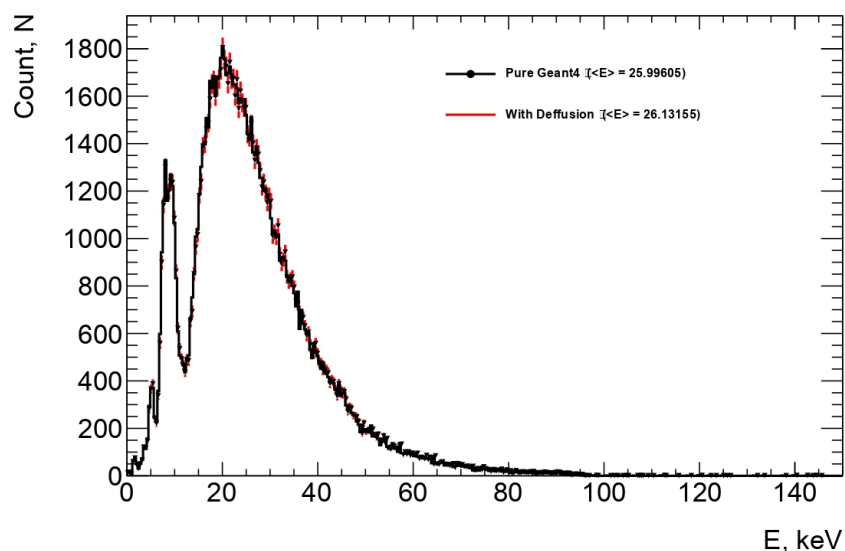


Рисунок 5.8 — Спектр энергии квантов ПИ

На графике 5.8 представлено распределение по энергии регистрируемых квантов переходного излучения. Для суммарного энерговыделения в детекторе, а также энерговыделения только первичной частицы, соответствующие распределения, представлены в **Приложении В**. Представленное сравнение проводилось с целью продемонстрировать, что с вводом диффузии, регистрируемая в сенсоре, энергия не изменилась и учитывается в полном объеме.

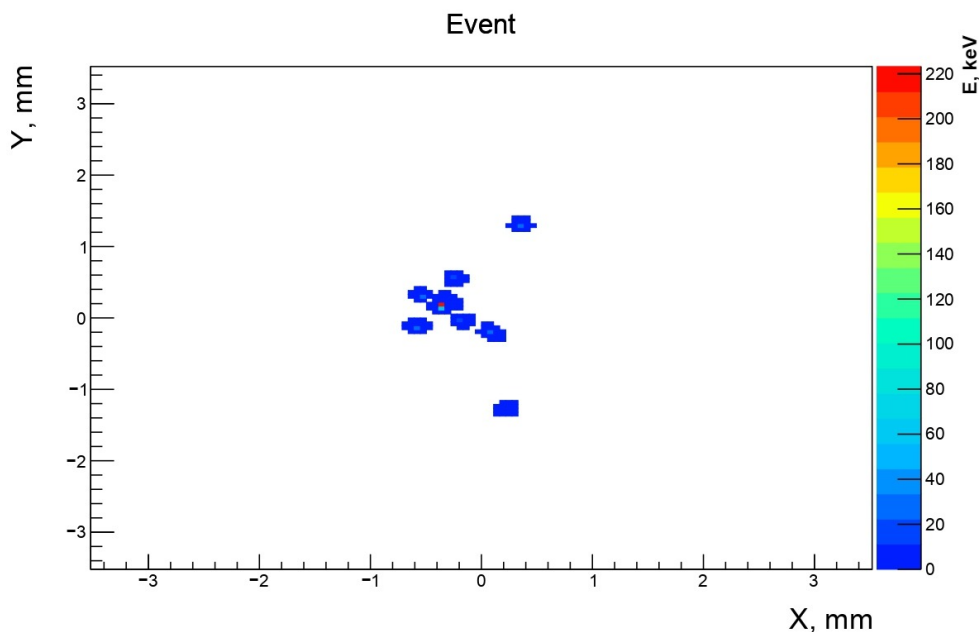
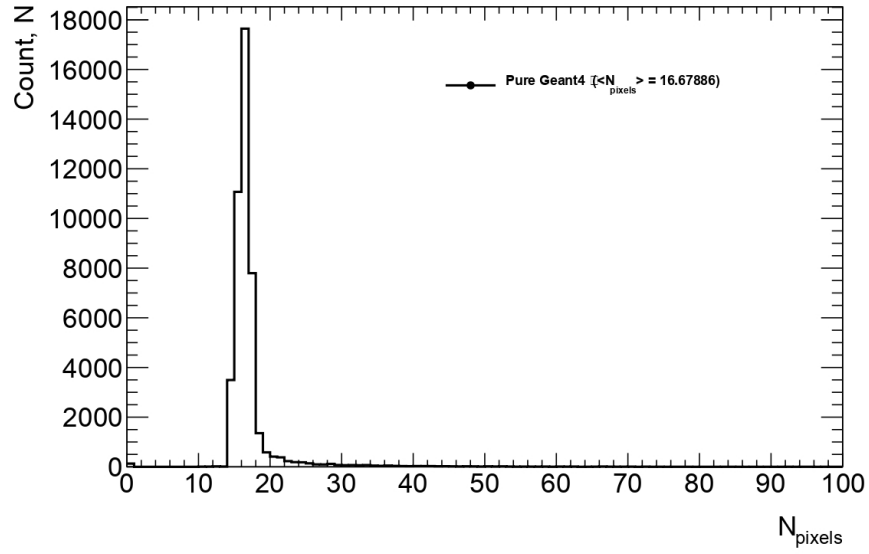


Рисунок 5.9 — Пример события – матрица детектора со сработавшими пикселями, где цветом определяется выделившаяся энергия

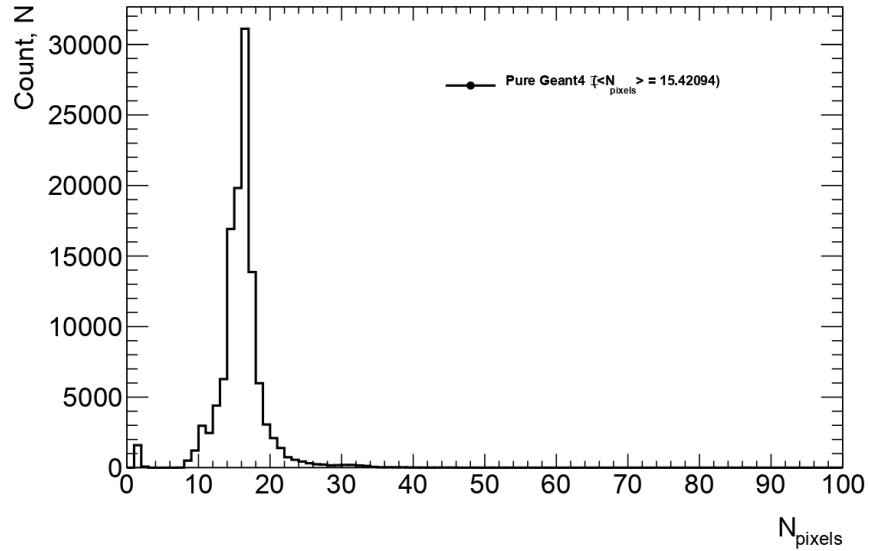
Ввод диффузии необходим для воссоздания более правдоподобной

картины события. Так при регистрации частицы, в матрице детектора, сигнал возникает в нескольких близких друг к другу пикселях, образуя кластер. Для отображения работы алгоритма диффузии выше приведена некоторая картина состояния матрицы в одном из событий (рисунок 5.9).

Также, для визуальной демонстрации работы, были построены распределения по количеству пикселей в кластерах регистрации для первичной частицы и кванта переходного излучения (график 5.10а и 5.10б соответственно).



(а)



(б)

Рисунок 5.10 — Количество пикселей в кластере без порога для Geant4: (а) – первичные частицы e^- , (б) – кванты переходного излучения γ

Данные распределения представлены только для демонстрации работы диффузии. В реальном детекторе, из-за наличия внутри каждого пикселя зарядово-чувствительного дискриминатора, существует порог регистрируемой энергии, в данном случае, он составляет 3.4 кэВ. При моделировании данная величина не учитывалась и пик распределения количества пикселей в кластере – это максимальная величина вычисляемой σ (**Раздел 5.5.1**).

5.6.2 АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Одна из причин заданной архитектуры дерева, описанного в предыдущем разделе, является задача объединения алгоритма кластеризации и Geant4 моделирования. Данный алгоритм написан членами научной группы Национального Исследовательского Университета МИФИ, кафедры физики элементарных частиц, для обработки результатов эксперимента Test Beam 2021. Эта программа реализует анализ каждого события, с целью формирования представления результатов в виде следующих распределений и спектров:

- двухмерный спектр энергии и углов зарегистрированных квантов переходного излучения
- распределение по числу пикселей в кластере регистрации первичной частицы
- распределение по числу пикселей в кластере регистрации квантов переходного излучения в разных диапазонах энергий
- распределение по числу квантов переходного излучения в событии в разных диапазонах энергии
- угловое распределение регистрируемых квантов переходного излучения для разных диапазонов энергий
- энергетическое спектр квантов переходного излучения в различных угловых пределах
- двухмерное распределение по величине расстояния между кластером регистрации первичной частицы и кластера квантов переходного излучения

Основной задачей данного алгоритма является объединение сработавших пикселей в кластеры по одному из признаков. Первый заключается в объединении по нахождению общей стороны двух сработавших пикселей, а второй группирует их по наличию общих углов. Затем, каждый кластер ассоциируется с типом регистрируемой частицы: первичная частица, квант переходного излучения. Также, данный алгоритм призван аналитически определять точку регистрации частицы, для построения углового распределения, регистрируемых квантов переходного излучения.

5.7 ЗАКЛЮЧЕНИЕ К ГЛАВЕ 5

Глава 5 посвящена полному подробному описанию реализованного моделирования полупроводникового детектора переходного излучения являющегося частью экспериментальной установки Test Beam 2021, с помощью программного пакета Geant4. Приводится подробное описание использованных на практике методов, при воспроизведении геометрии реальной экспериментальной установки, сопряженное с дополнениями к информации указанной в **Главе 1** о структуре и конфигурациях эксперимента. Формируется отчетный список, используемых при моделировании, процессов, объединенных в физические пакеты или листы. Вместе с тем, представлена реализация генератора первичных частиц, что в случае данного эксперимента, определяется электронами с энергий 20 ГэВ. Важным этапом является алгоритм формирования интерпретации, получаемых в ходе моделирования данных, об этом подробно написано в **Разделе 5.4**. Для создания качественных и рабочих моделей, необходимо учитывать множество аспектов связанных с работой реального детектора. Эффект диффузии заряда или его размытия является одним из таких нюансов, описание которого, как и его реализации в Geant4, представлено в **Разделе 5.5**, в дополнении к изложенному в **Главе 3**.

После создания модели необходимо проверять ее работоспособность на каждом этапе разработки, для чего, необходимо, описать алгоритм формирования выходных данных в удобном для последующего анализа виде. Некоторые промежуточные результаты, сформированные с целью демонстрации контрольной оценки работоспособности модели, представлены в **Разделе 5.6.1**, а в **Разделе 5.6.2** приводится описание существующего алгоритма кластеризации, который используется при обработки экспериментальных данных.

Итак, представлено полное описание разработанной модели с помощью программного пакета Geant4. В **Главе 6** речь пойдет о результатах связанных с основной задачей представляемой работы – объединение Geant4 моделирования с существующим алгоритмом кластеризации и представление полученных результатов в сравнении с экспериментальными. А также указаны на данный момент подтвержденные причины расхождений.

6 ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Как уже отмечалось, алгоритм кластеризации реализует объединение сработавших при регистрации частицы пикселей в кластеры, а также, производит поиск точки ее прилета внутри рассматриваемого кластера, для получения углового распределения зарегистрированных квантов переходного излучения. Последующий анализ результатов работы данного алгоритма предоставляет следующий перечень спектров и распределений:

- двухмерный спектр энергии и углов зарегистрированных квантов переходного излучения
- распределение по числу пикселей в кластере регистрации первичной частицы
- распределение по числу пикселей в кластере регистрации квантов переходного излучения в разных диапазонах энергий
- распределение по числу квантов переходного излучения в событии в разных диапазонах энергии
- угловое распределение регистрируемых квантов переходного излучения для разных диапазонов энергий
- энергетическое спектр квантов переходного излучения в различных угловых пределах
- двухмерное распределение по величине расстояния между кластером регистрации первичной частицы и кластера квантов переходного излучения

Далее результаты будут представлены согласно порядку в этом списке с дополнительными комментариями.

6.1 РЕЗУЛЬТАТЫ

Все представленные распределения и спектры получены для конфигурации моделирования, с использованием трех радиаторов из майлара, для которых суммарное число слоев равно 90, трубы заполненной гелием, длиной 2 метра, а также первичной частицы, электрона с энергией 20 ГэВ.

Основным графиком, который комплексно демонстрирует результаты для данного эксперимента, является двухмерный спектр по углам и энергиям для зарегистрированных квантов переходного излучения. На рисунке 6.1 представлен график полученный в ходе эксперимента – экспериментальные данные, а на рисунке 6.2 один из спектров, как результат проведенного моделирования.

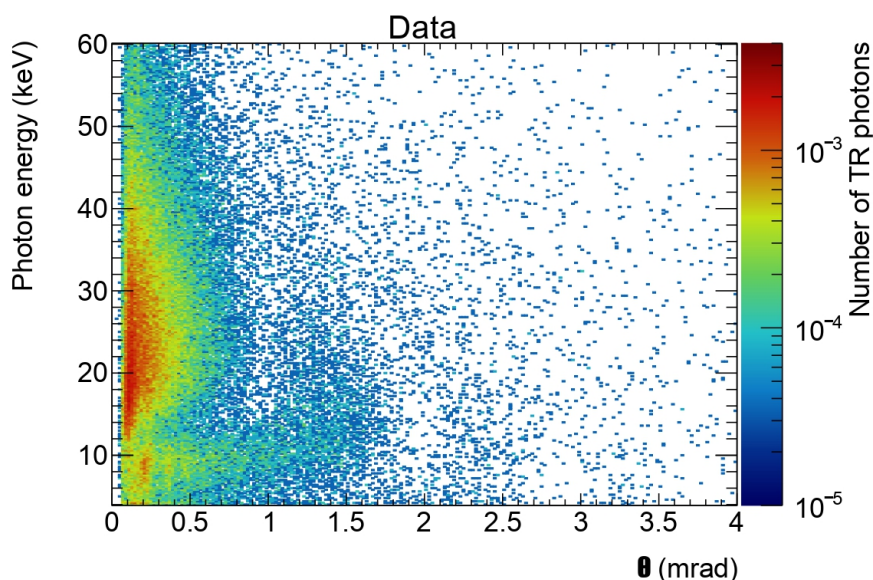


Рисунок 6.1 — Экспериментальный спектр по углам и энергиям зарегистрированных квантов переходного излучения

Из спектра полученного в результате моделирования видно несоответствие, которое связано с угловым распределением, о чем подробнее речь пойдет в следующем разделе. В области 0.5 миллирадиан наблюдается несколько пятен, обусловленных пиками на угловом распределении, что расходится с экспериментом, так как ожидается, что, в той области, этот пик должен замазываться из-за диффузии, а также абсолютной точности восстановления точки регистрации частицы, алгоритмом кластеризации.

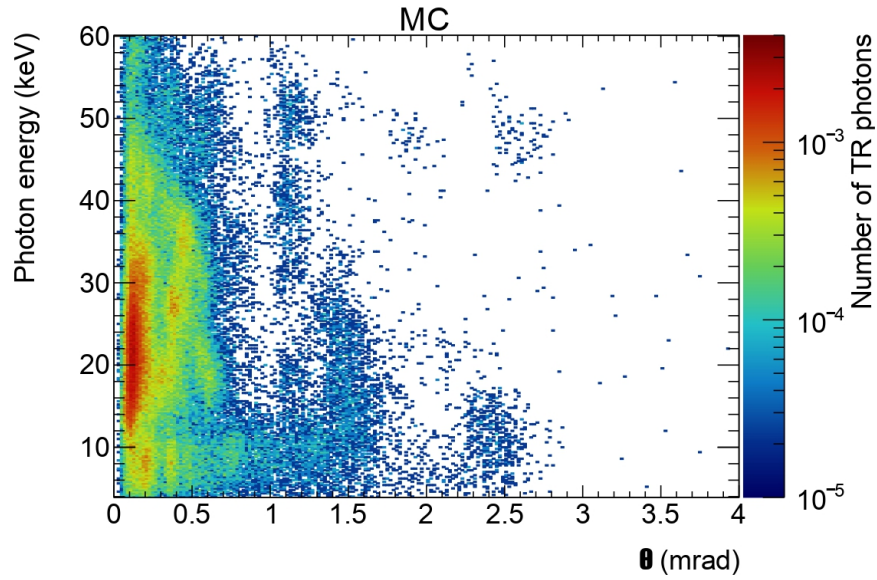


Рисунок 6.2 — Спектр по углам и энергиям зарегистрированных квантов переходного излучения полученный в ходе Geant4 моделирования

Далее на графике 6.3 изображено распределение по числу пикселей в кластере от первичной частицы. Данное распределение отличается от уже описанного в **Главе 5**, так как, в данном случае, в процессе окончательного анализа полученных результатов, учитывается порог срабатывания пикселей, оцениваемый в 3.4 кэВ. Как можно заметить здесь также при-

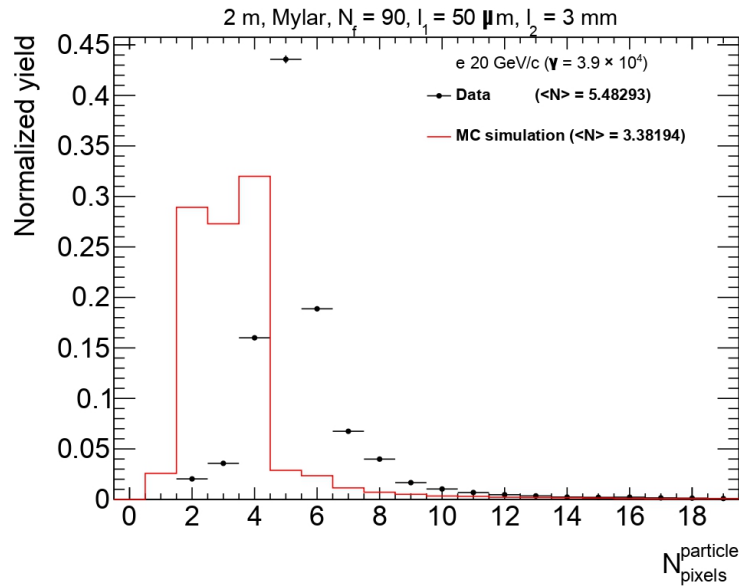


Рисунок 6.3 — Распределение по числу пикселей в кластере регистрации первичной частицы

существует расхождения, как с формой распределения, так и с положением пика. В данном случае, для первичной частицы важную роль играет учет эффекта наведение внутренних токов внутри объема детектора. Данный

эффект имеет большее влияние на отображение первичной частицы, так как ее энергосодержание на порядок выше энергосодержания регистрируемых квантов переходного излучения. Учет такого рода внутренних процессов, на данный момент, еще не реализован в моделировании, но является одной из будущих задач.

Также, представлено аналогичное распределение по числу пикселей в кластере регистрируемой частицы для квантов переходного излучения (распределения в разных диапазонах энергий представлены в **Приложении Г**). В данном случае, основной вклад в образование кластеров вносит эффект размытия заряда, в свою очередь, наводки внутренних токов детектора имеют меньшую значимость по причине того, что для кванта электромагнитного излучения характерное энергосодержание, при рассматриваемой конфигурации, достаточно мало.

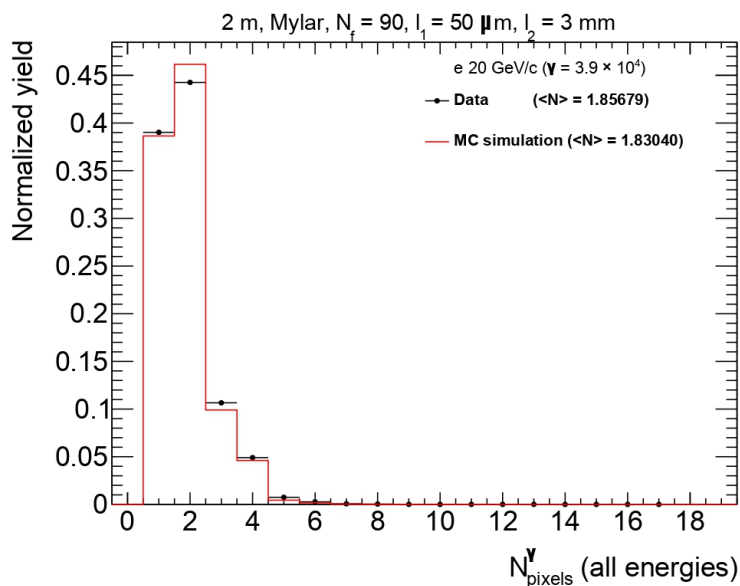


Рисунок 6.4 — Распределение по числу пикселей в кластере регистрации квантов переходного излучения

Приведенные выше распределения свидетельствуют о том, что описанная диффузия достаточна и хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Касательно распределения связанного с числом квантов переходного излучения в событии, представленного на рисунке 6.5, можно отметить, также, его близкое соответствие экспериментальному.

Если число квантов в событии примерно удовлетворяет экспериментально наблюдаемому, то в случае углового распределения, которое уже

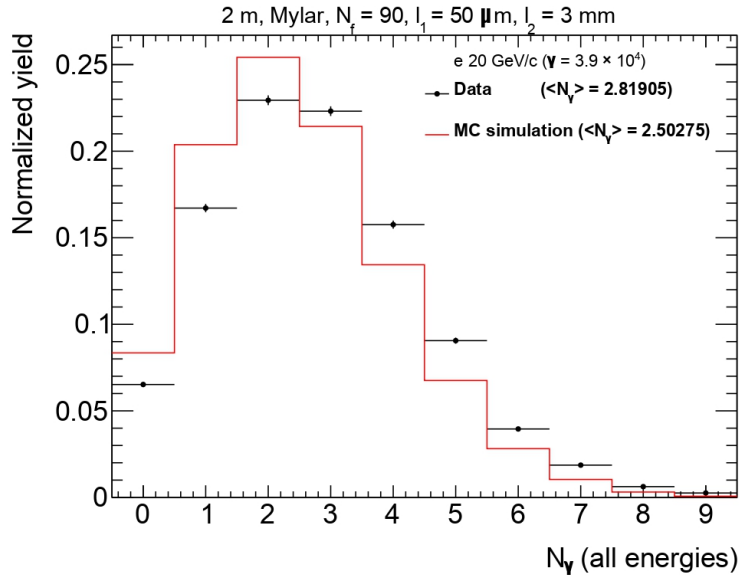


Рисунок 6.5 — Множественность квантов переходного излучения в событии упоминалось при описании двумерного спектра углов и энергий зарегистрированных квантов, можно отметить, его расхождение с наблюдаемым, выраженным в формировании второго пика (распределение 6.6). Данный факт влечет за собой серьезные расхождения, имеющих место в энергетических спектрах. Более подробное пояснение о проблеме возникновения данного пика будет представлено в следующем разделе.

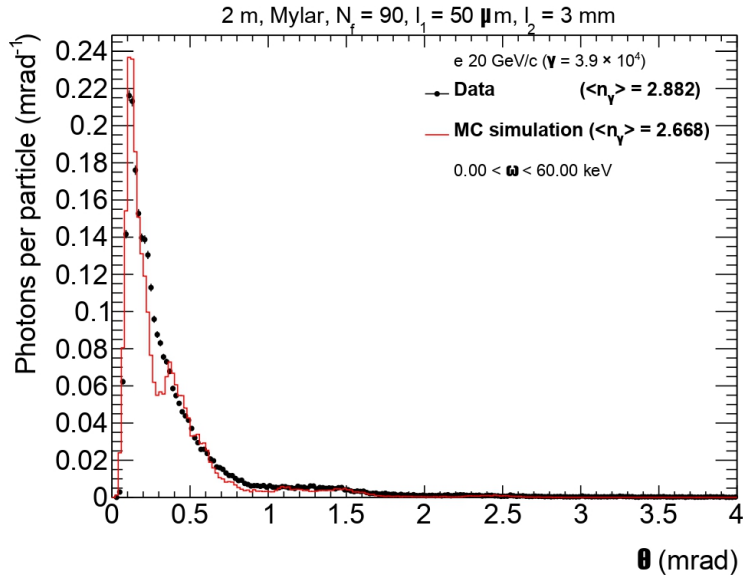


Рисунок 6.6 — Распределение по углу прилета квантов переходного излучения

Для энергетических спектров, сформированных отбором квантов переходного излучения зарегистрированных в указанных диапазонах углов, наблюдается те же расхождения, выходящие из полученного углового распределения (**Приложение Д**). Несмотря на это, полный энергетический спектр обладает хорошим согласием с результатами проводимых измерений, с точностью до необходимой, в данном случае, энергетической калибровки.

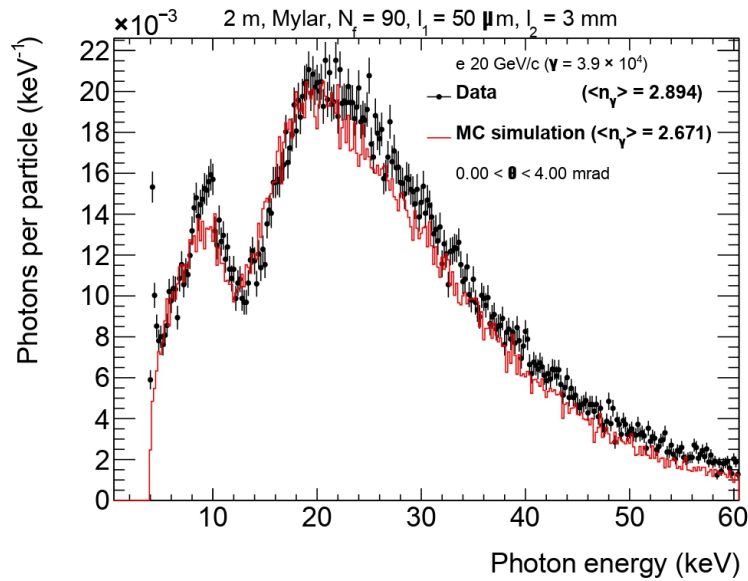


Рисунок 6.7 — Энергетический спектр квантов переходного излучения

Также, повторно возвращаясь к угловому распределению, иным представлением является двухмерное распределение 6.8, для которого вычисляются расстояния от предполагаемой точки регистрации кванта переходного излучения до точки, соответствующей первичной частице, что по сути, эквивалентно углу. На данном распределении ожидается наблюдать ярко выраженное кольцо – пик углового распределения, в центре которого область, которая объясняется тем, что невозможно разделить кластер от первичной частицы и кванта переходного излучения по причине разных порядков величин для выделяемой, в процессе регистрации частиц, энергии. Видно, что второй пик углового распределения здесь также прослеживается в виде некоторой тени за кольцом. Лучше это наблюдается при рассмотрении проекций истинного распределения зарегистрированных квантов переходного излучения на оси X и Y (**Приложение Е**).

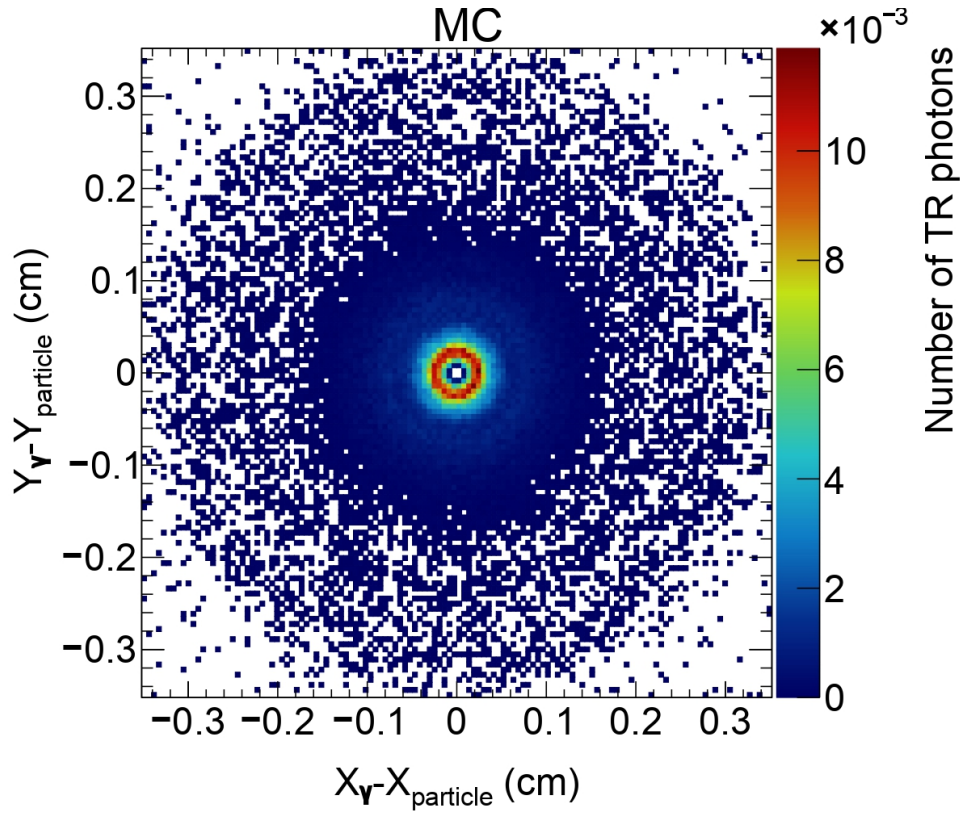


Рисунок 6.8 — Кольцо переходного излучения

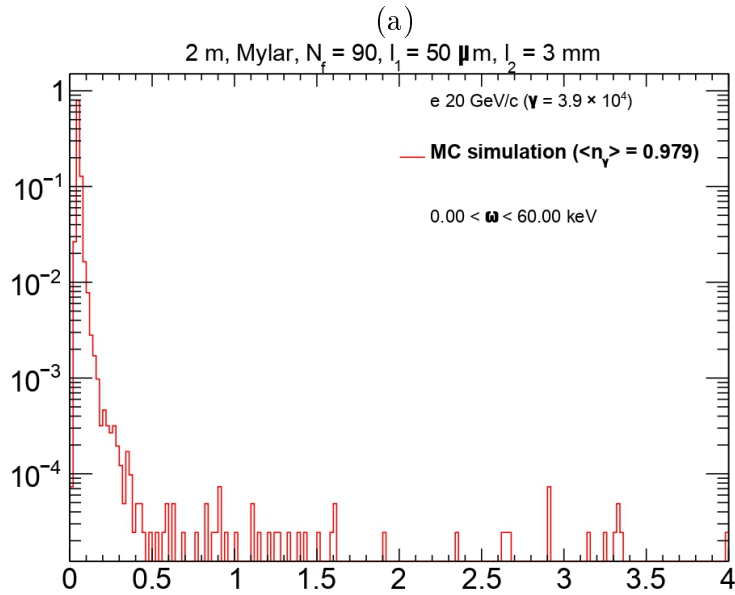
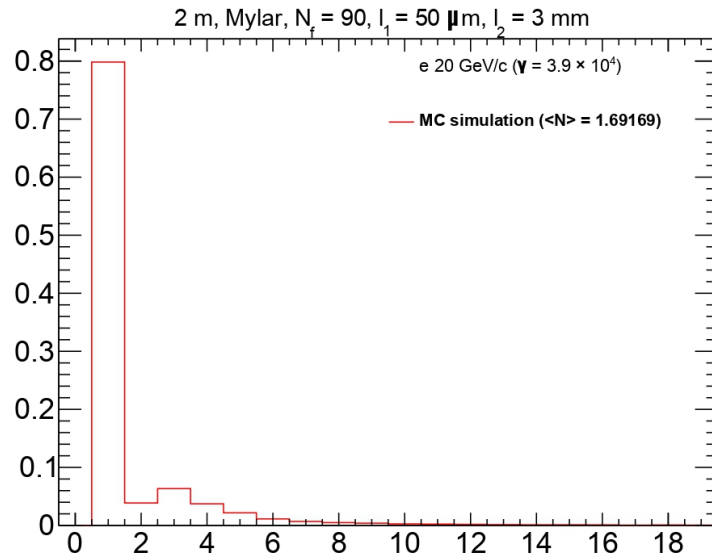
6.2 ПРИЧИНЫ НЕСООТВЕТСТВИЯ

Для объяснения несоответствий, которые явным образом были выявлены в виде образование второго пика углового распределения регистрируемых квантов переходного излучения, необходимо было провести тестовые запуски моделирования для определения причин данного результата.

В рамках первой проверки было необходимо установить факт того, что на основании данных, полученных при моделировании, вычисляемый угол является верным. Результат данной проверки отвечает сразу на несколько вопросов одновременно:

- исправен ли алгоритм пикселизации, аналитически определяющий какие именно пиксели сработали и формирующий результат в виде матрицы эквивалентной сенсору
- исправность алгоритма кластеризации

Касательно первого вопроса, было принято решение провести измерения в случае когда вручную задается то, в какой пиксель и как относительно его центра попадает частица.



(б)

Рисунок 6.9 — Результаты первой проверки: (а) — количество пикселей в кластере, (б) — угловое распределение

Таким образом можно предполагать ожидаемое положение кластера регистрации кванта переходного излучения, следовательно угол прилета исходя из конфигурации в которой кванты рождаются на расстоянии двух метров от поверхности сенсора, а также предположить какое количество пикселей в этом кластере ожидается исходя из характерных величин σ для диффузии. Была произведена серия измерений для случаев, когда регистрируемый квант попадает строго в центр одного пикселя, между двумя пикселями, а также строго между четырьмя пикселями. Данный γ -квант

запускался в ручную на расстоянии от сенсора порядка 10 мкм, строго из определенной точки таким образом, чтобы между кластером первичной частицы и фотона был гарантированно один не сработавший пиксель, что гарантирует возможность их разделения по типу регистрируемых частиц, с энергией в 30 кэВ. И так в рамках одной из проверок были получены следующий распределения для количества сработавших пикселей, а также угловое распределение (распределения 6.9а и 6.9б соответственно).

На основе полученных результатов был сделан вывод, что диффузия и реализованная геометрия работают верно и дают ожидаемые результаты. Было сформировано предположение о том, что причина возникновения второго пика в угловом распределении связана с самим программным пакетом Geant4 версии 4.v11.0. Для этого, было необходимо построить выходящий из радиаторов спектр излучения (распределение 6.10), для чего, было необходимо получить информацию о том, кванты каких энергий вылетают, а также определить их положение для восстановления угла, что было оперативно реализовано.

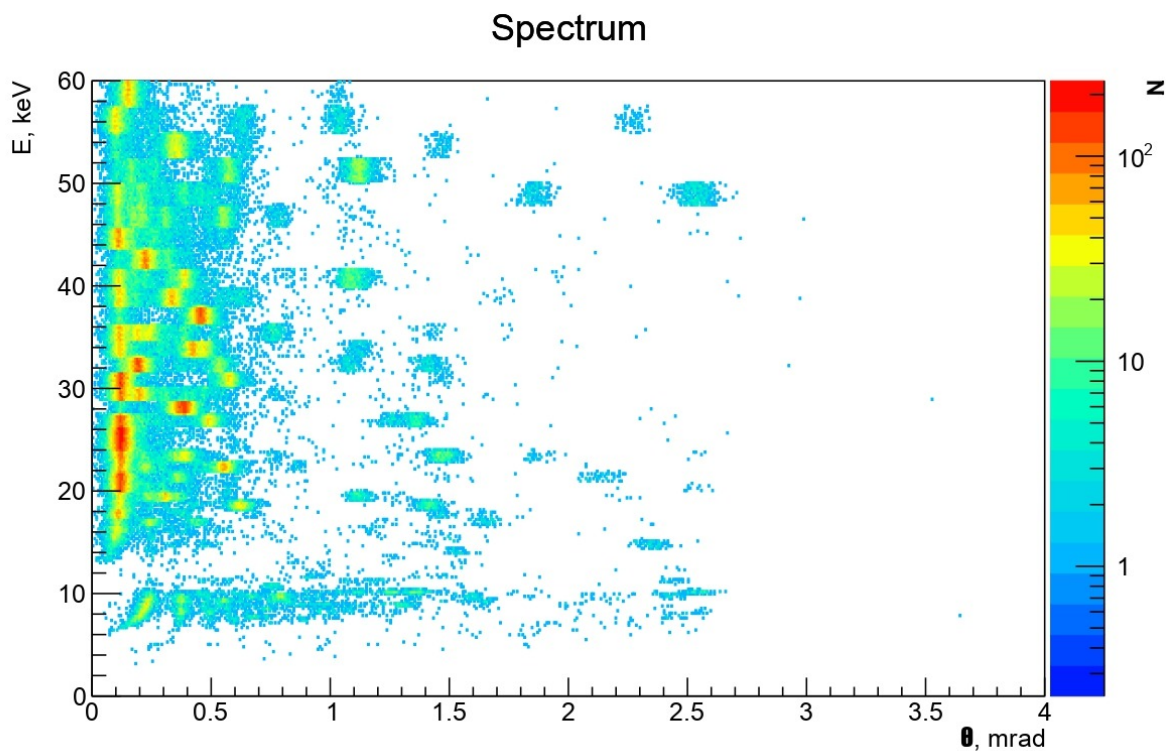


Рисунок 6.10 — Спектр квантов переходного излучения вылетающих из радиатора по направлению к детектору

В результате, был получен следующий двухмерный спектр, как наиболее емкий и информативный тип представления результатов, для выхо-

дящего из радиатора излучения (отдельно энергетический спектр и угловое распределение представлены в **Приложении Ж**.

Как можно видеть, возникновение второго пика для углового распределения обусловлено непосредственной процедурой генерации квантов переходного излучения в Geant4, а следовательно, можно сформировать предположение, и на данный момент действующую версию причины несоответствия, что проблема в реализации генерации переходного излучения в соответствующем физическом пакете.

6.3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ К ГЛАВЕ 6

Глава 6 посвящена представлению результатов, связанных с основной задачей представляемой работы. Объединив разработанную, с помощью программного пакета Geant4, модель полупроводникового детектора переходного излучения, являющегося частью экспериментальной установки Test Beam 2021, с алгоритмом кластеризации, применяемым научной группой Национального Ядерного Университета МИФИ для обработки полученных во время проводимых измерений данных, в единый программный комплекс, были получены некоторые результаты.

В ходе последующего анализа результатов были замечены сильные расхождения с экспериментальными данными. Для установления их природы были выполнены две проверки описанного моделирования, в результате которых, можно было сформулировать вывод о качестве реализованной модели, в вопросах описания ключевых механик, таких как диффузия заряда и пикселизация событий. Также стало возможным установить предполагаемую причину обнаруженных расхождений - ошибка в генерации квантов переходного излучения, конкретнее, проблема связана с угловым распределением моделируемых в процессе вычислений квантов переходного излучения.

7 ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В заключении к представленной работе, относительно поставленных в процессе работы задач, можно резюмировать:

- приведено полное описание поставленного эксперимента Test Beam 2021: описание его геометрии и материалов компонент, принципа работы (**Раздел 5.1**)
- выделив ключевые аспекты реализованной в эксперименте геометрии была создана ее копия с помощью программного пакета Geant4 (**Раздел 5.2**)
- анализируя изучаемый в ходе эксперимента физический процесс был составлен необходимый, достаточно емкий и комплексный пакет физических процессов в дальнейшем используемый при моделировании (**Раздел 5.3**)
- для представления результатов и реализации промежуточных контрольных измерений был сформирован пользовательский класс для предварительной обработки событий в процессе моделирования (**Раздел 5.4**)
- с целью повысить степень воспроизводимости к экспериментальным данным созданной модели был реализован алгоритм расчета диффузии для эффекта связанного с размытием координат точки регистрации частицы (**Раздел 5.5.2**)
- произведено объединение алгоритма кластеризации используемого научной группой Национального Исследовательского Ядерного Университета МИФИ для обработки экспериментальных данных с реализованным Geant4 моделированием (**Раздел 5.6.1**)
- сформированы и представлены полученные результаты, а также проведен их подробный анализ (**Раздел 6.1**)
- в ходе представленного анализа были выявлены несоответствия, для уточнения которых был проведен ряд проверок (**Раздел 6.2**)

Итак, в процессе выполнения работы, была реализована базовая модель полупроводникового детектора переходного излучения на основе GaAs для разделения адронов и электронов, являющегося одной из компонент экспериментальной установки Test Beam 2021, с помощью программного пакета Geant4. В дополнении к основной реализации моделирования, был реализован алгоритм учета особенности работы представленного пиксельного детектора – диффузия заряда, а также произведено объединение существующего алгоритма кластеризации с описанным моделированием в один программный пакет, для представления полученных результатов, и их сравнения с экспериментальными данными. В ходе последующего анализа, были выявлены существенные расхождения с наблюдаемыми распределениями и спектрами. В результате двух проверочных испытаний, было установлено, что, описанный в Geant4 (версии 4.v11.0), физический процесс, рождения квантов переходного излучения, не дает желаемых результатов, что сильно отражается на представляемых результатах. Для дальнейшей реализации моделирования, необходимо создать некоторую надстройку над существующим описанием процесса или использовать пользовательские наработки.

Задача по моделированию полупроводникового детектора переходного излучения объемная и комплексная задача. Для того, чтобы добиться полного согласия результатов моделирования и экспериментальных данных, необходимо учесть много нюансов, связанных с физикой рассматриваемого процесса, а также работой самого детектора. Поэтому, работа по данному направлению будет продолжаться. В дальнейшем будет реализован учет эффекта наводок внутренних токов детектора, произведена надстройка над базовым представлением физики переходного излучения в Geant4, а также произведена калибровка моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Identification of particles with Lorentz factor up to 10^4 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] TWiki CERN. TRT Test Beam 2021. –URL: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/Atlas/TrtTestBeam2021>(12.06.2022)
- [3] Development of Transition Radiation Detectors for hadron identification at TeV energy scale / N. Belyaev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – November. – Vol. 1390. – P. 012126.
- [4] Гинзбург В. Л., Цытович В. Н. Переходное излучение и рассеяние: Некоторые вопросы теории. Изд. 2-е. – М.:ЛЕНАД, 2020. – 360 с.
- [5] Гинзбург В. Л., Франк И. М. - ЖЭТФ, 1946, т. 16, с. 15
- [6] First measurements of the spectral and angular distribution of transition radiation using a silicon pixel sensor on a Timepix3 chip / E.J. Schioppa [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — August. — Vol. 936. — P. 523–526.
- [7] Акимов Ю. К., Калинин А. И., Кушнирук В. Ф., Юнгклауссен Ф. Полупроводниковые детекторы ядерных частиц и их применение – М.:АТОМИЗДАТ, 2967. – 255 с.
- [8] GaAs radiation imaging detectors with an active layer thickness up to 1mm / A. Tyazhev [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics

Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — Vol. 509, no. 1. — P. 34—39.

- [9] Charge collection in X-ray pixel detectors based on semi-insulating GaAs doped with Cr / G. Ayzenshtat [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2002. — Vol. 494, no. 1. — P. 210—213.
- [10] Medipix Collaboration website. —URL: <https://medipix.web.cern.ch>(11.06.2022)
- [11] A readout chip for a 64/spl times/64 pixel matrix with 15-bit single photon counting / M. Campbell [et al.] // IEEE transactions on nuclear science. — 1998. — Vol. 45, no. 3.
- [12] <https://geant4.web.cern.ch/> Geant4 A simulation toolkit website. —URL: <https://geant4.web.cern.ch>(05.06.2022)
- [13] Geant4 Collaboration. Book For Application Developers —R. 10.3. —2017. —P 447.
- [14] Knoll, G. F. Radiation detection and measurement / G. F. Knoll. — John Wiley & Sons, 2010.
- [15] Fine structure of angular distribution of x-ray transition radiation from multilayered radiator in Geant4 / A.A. Savchenko [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2020. — June. — Vol. 15. — P. C06024.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

```
1  density = 1.25053*mg/cm3;
2  G4Material* Nitrogen = new G4Material(name="N2",
3                                     density, ncomponents=1);
4  Nitrogen->AddElement(elN, 2);
5  density = 1.4289*mg/cm3;
6  G4Material* Oxygen = new G4Material(name="O2",
7                                     density, ncomponents=1);
8  Oxygen->AddElement(elO, 2);
9  density = 1.7836*mg/cm3;
10 G4Material* Argon = new G4Material(name="Ar",
11                                   density, ncomponents=1);
12 Argon->AddElement(elAr, 1);
13 density = 1.2928*mg/cm3 ;
14 G4Material* Air = new G4Material(name="Air", density,
15                                   ncomponents=3);
16 Air->AddMaterial( Nitrogen, fractionmass = 0.7557 );
17 Air->AddMaterial( Oxygen,   fractionmass = 0.2315 );
18 Air->AddMaterial( Argon,     fractionmass = 0.0128 );
```

Листинг 7.1 — Определение состава воздуха в Geant4

```
1  a = 69.723*g/mole;  density = 5.904*g/cm3;
2  G4Material* Ga      = new G4Material(name="Galii",z=31.,
3                                     a, density);
4  a = 74.922*g/mole;  density = 5.73*g/cm3;
5  G4Material* As      = new G4Material(name="Arsenium",z=33.,
6                                     a, density);
7  density = 5.32*g/cm3 ;
8  G4Material* GaAs = new G4Material(name="GaAs", density,
9                                     ncomponents=2);
10 GaAs->AddMaterial( Ga, fractionmass = 0.4822 );
11 GaAs->AddMaterial( As, fractionmass = 0.51798 );
```

Листинг 7.2 — Определение материала из соединения GaAs в Geant4

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

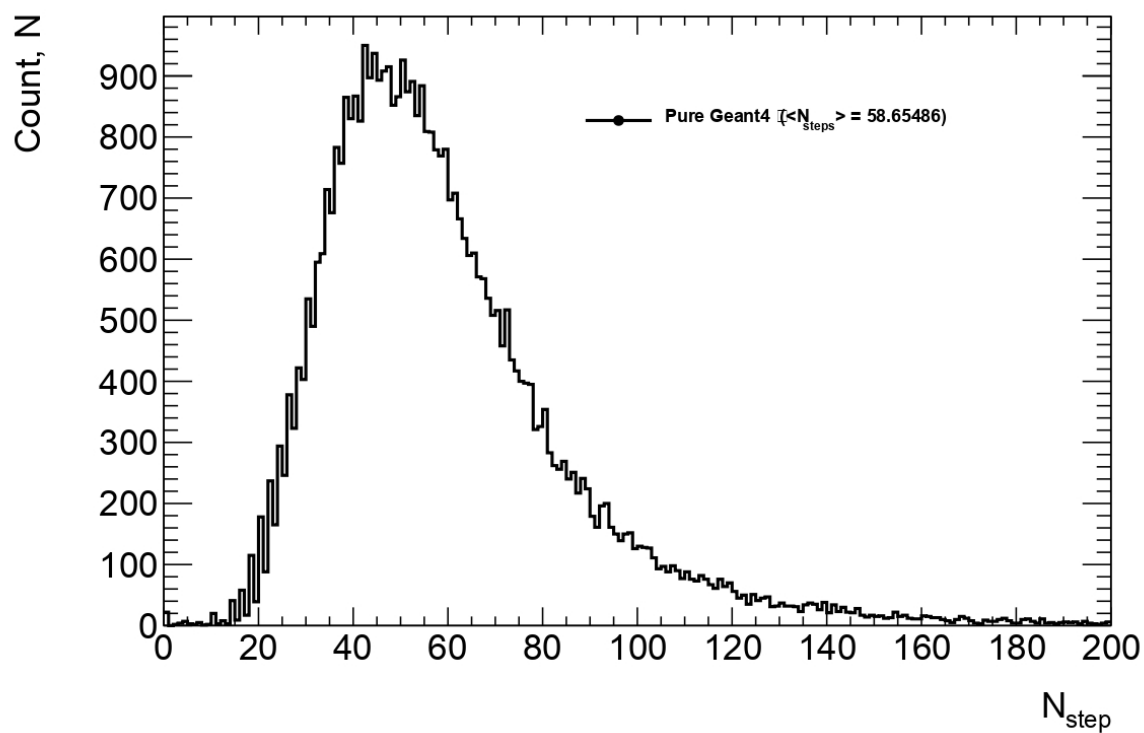
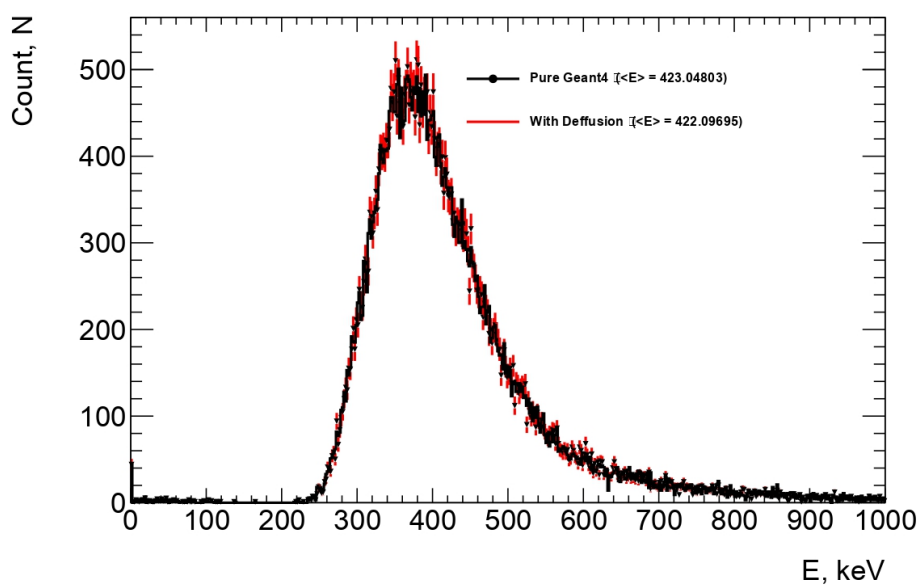
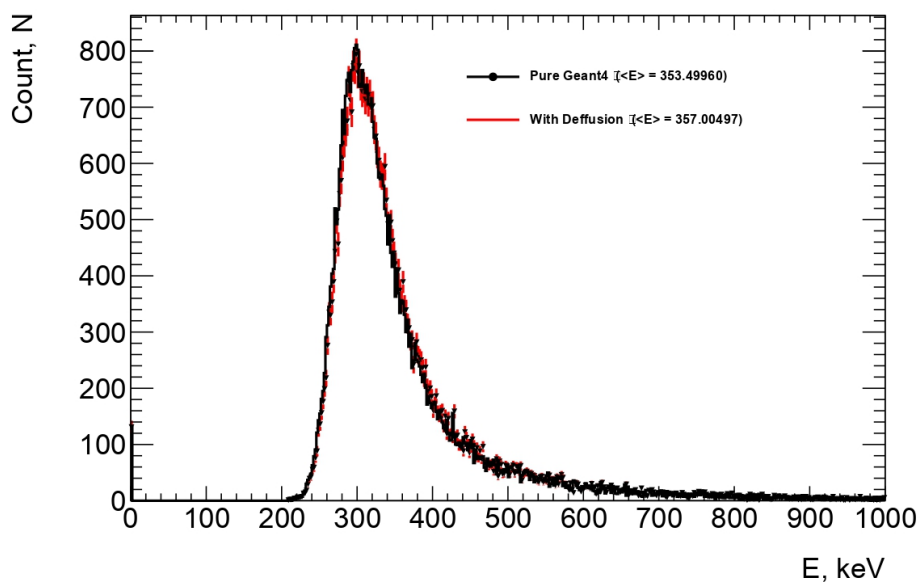


Рисунок 7.1 — Распределение по числу шагов выполняемых Geant4 при трассировке частиц

ПРИЛОЖЕНИЕ В



(a)



(б)

Рисунок 7.2 — Энергетические спектры до и после введения диффузии: (а) — полная энергия, (б) — энерговыделение первичной частицы

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

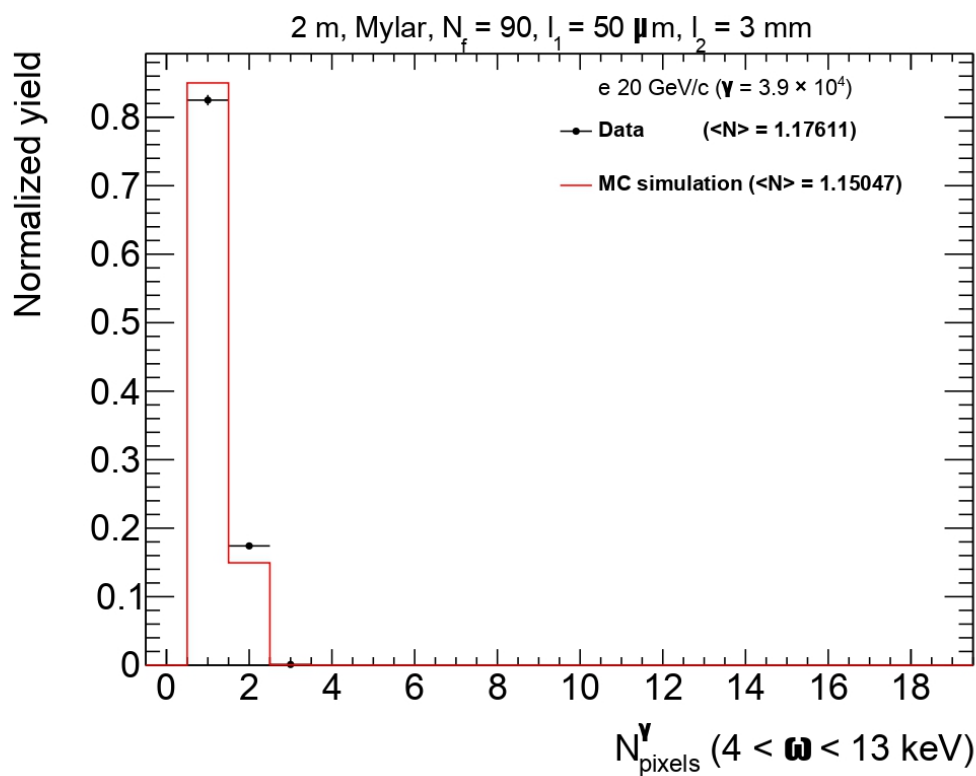


Рисунок 7.3 — Распределение по числу пикселей в кластере регистрации квантов переходного излучения для выбранного диапазона энергий

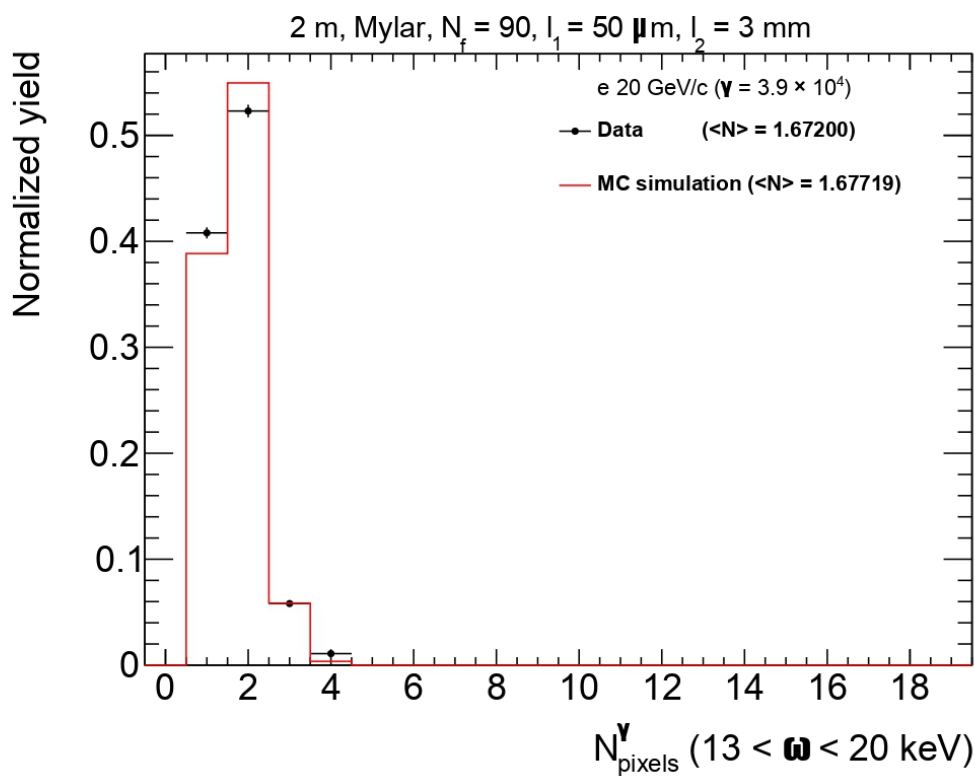


Рисунок 7.4 — Распределение по числу пикселей в кластере регистрации квантов переходного излучения для выбранного диапазона энергий

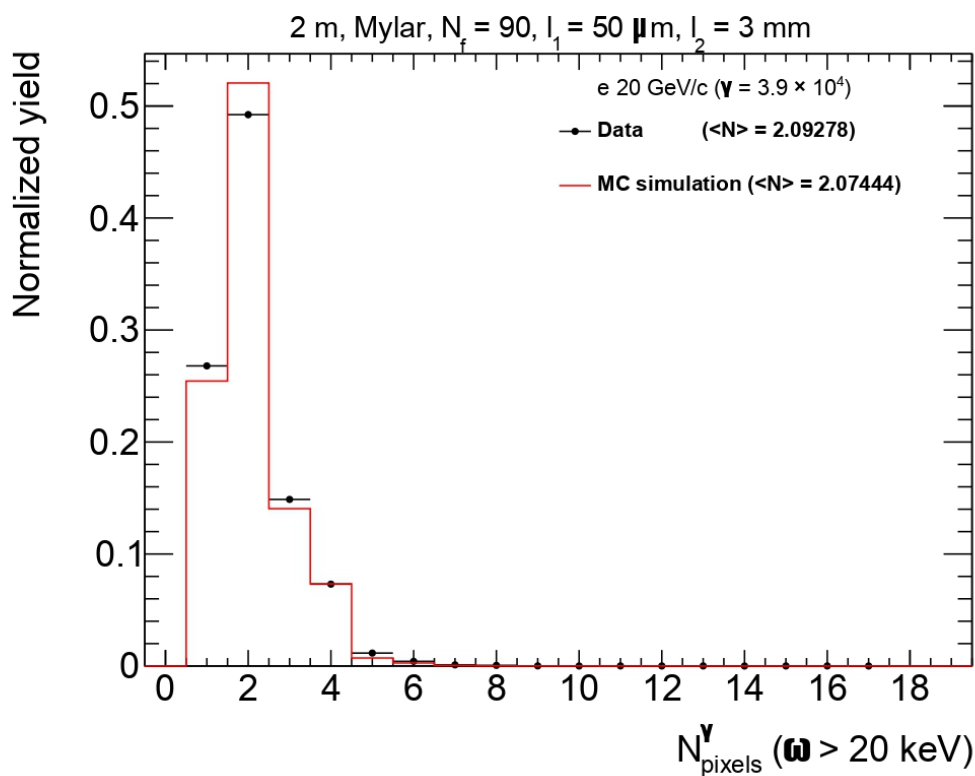


Рисунок 7.5 — Распределение по числу пикселей в кластере регистрации квантов переходного излучения для выбранного диапазона энергий

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

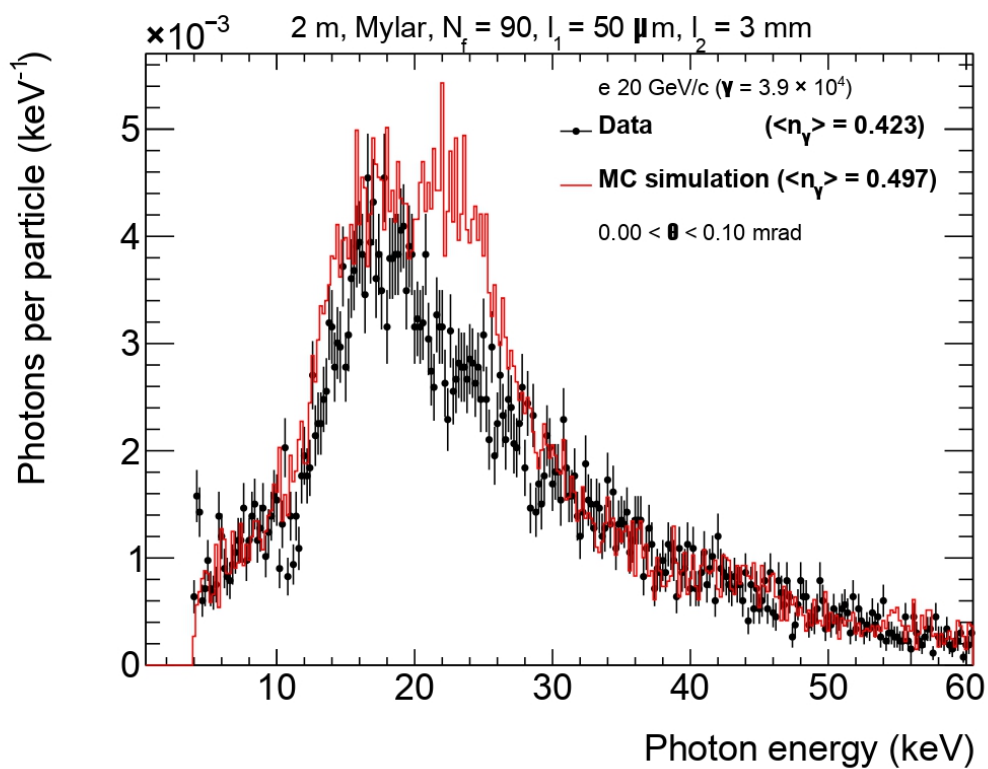


Рисунок 7.6 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

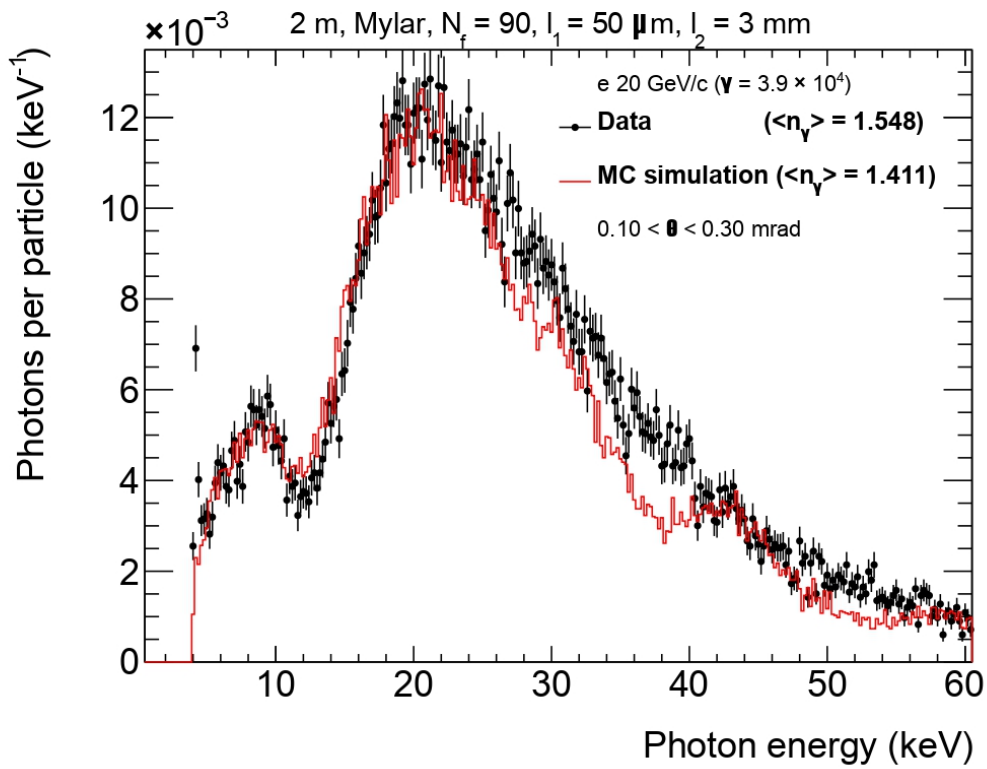


Рисунок 7.7 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

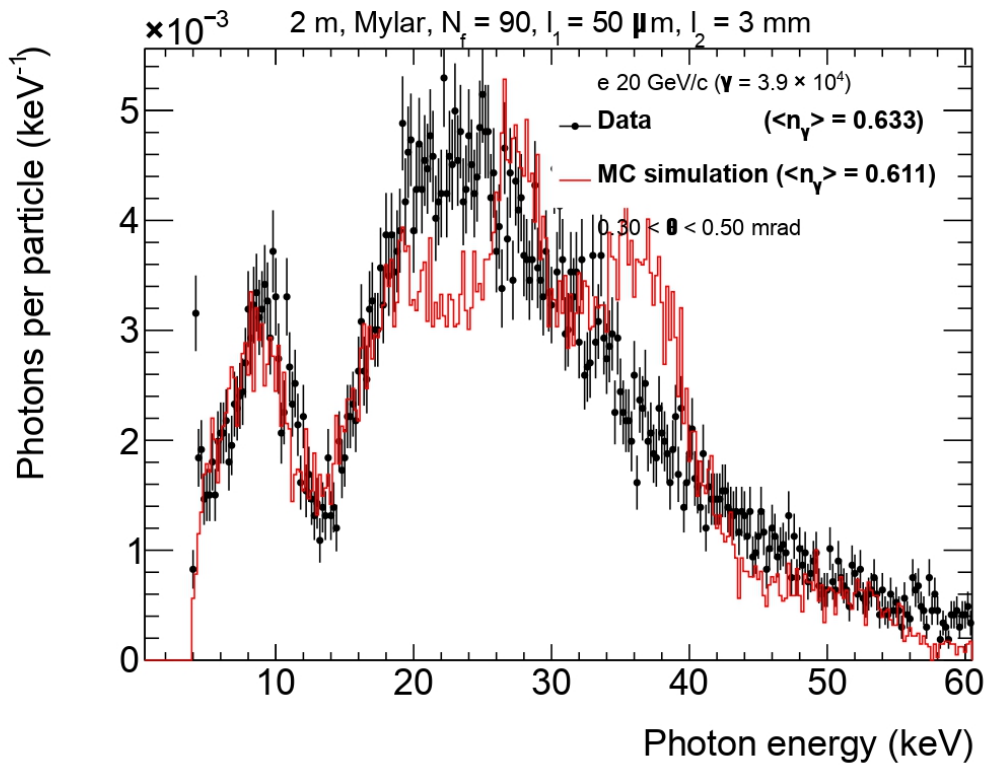


Рисунок 7.8 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

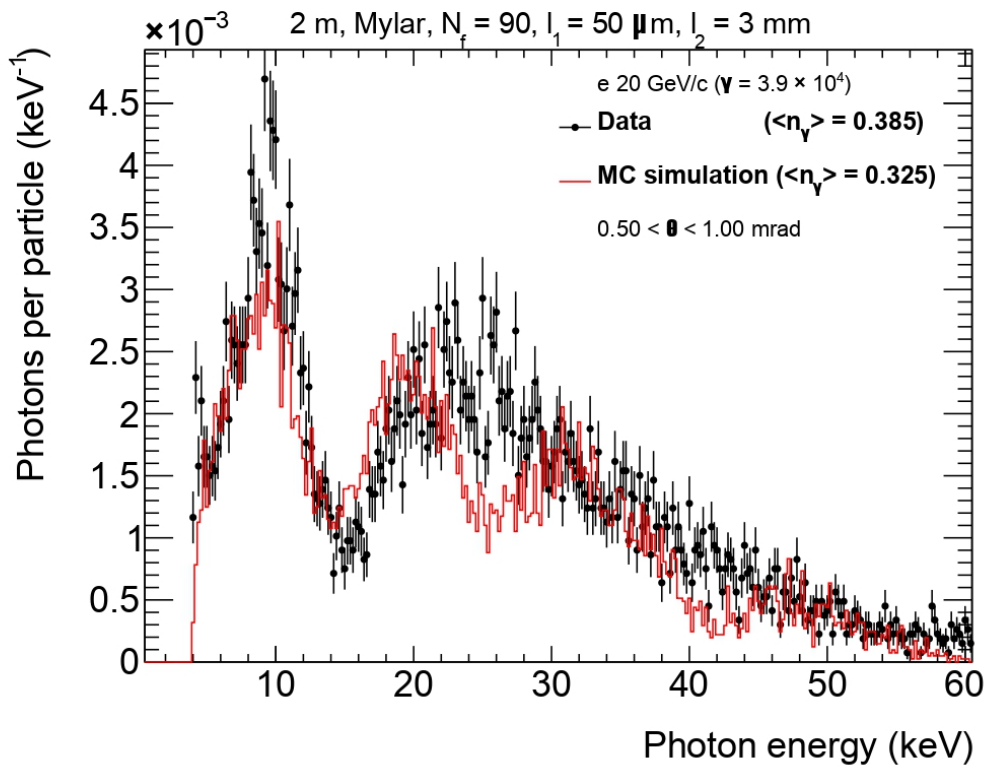


Рисунок 7.9 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

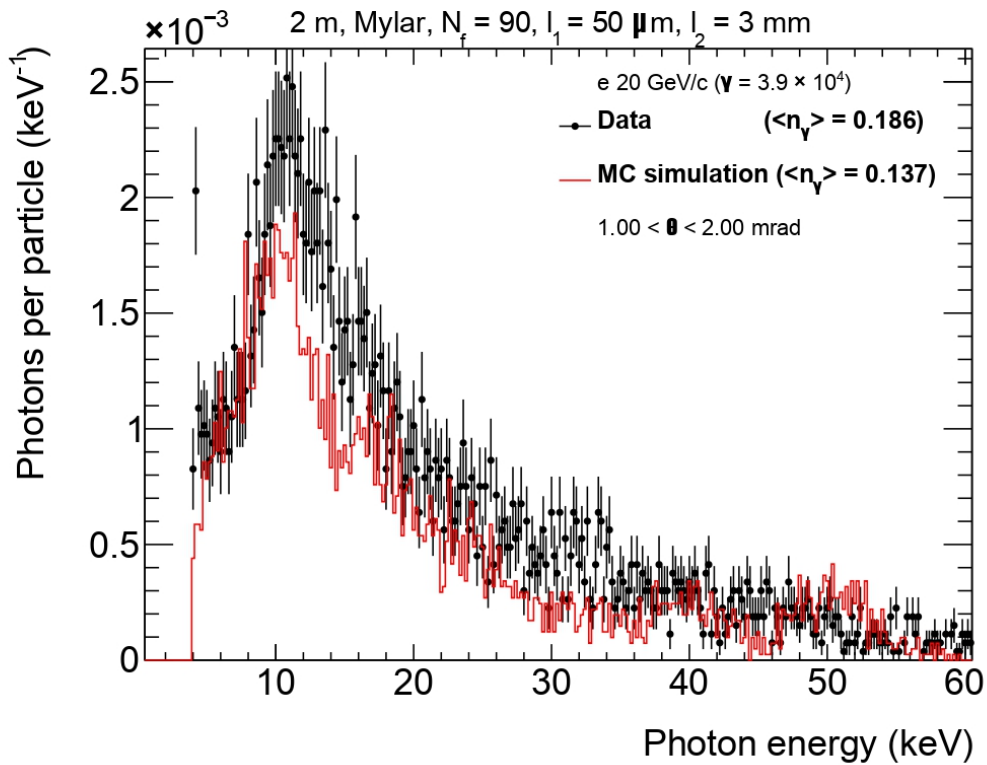


Рисунок 7.10 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

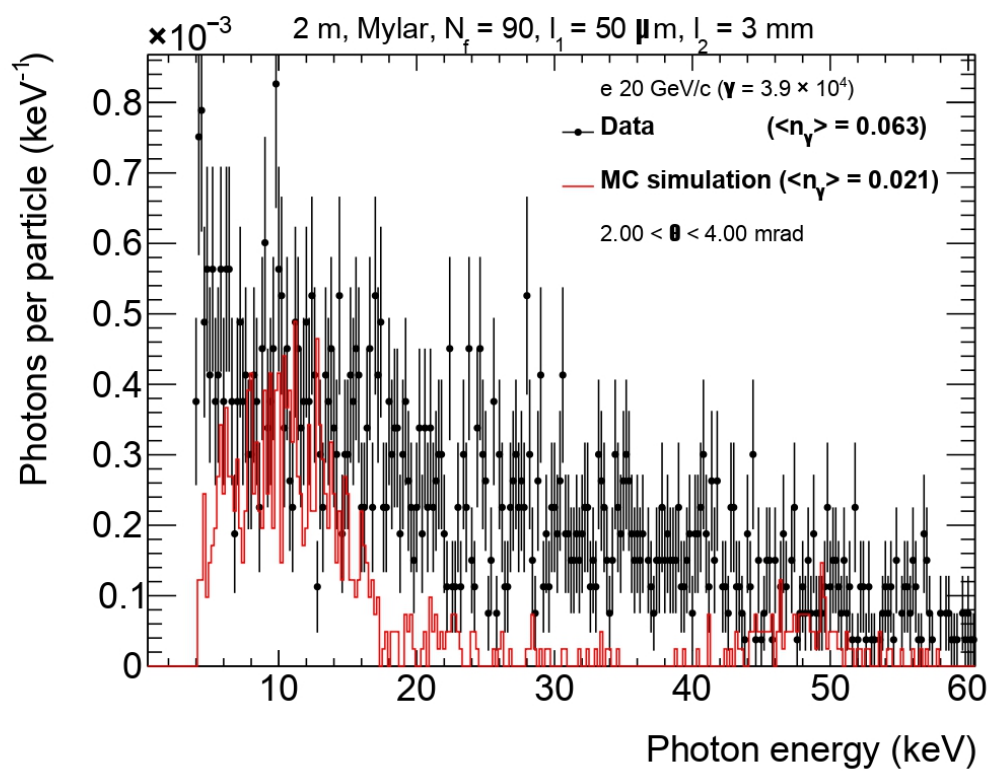
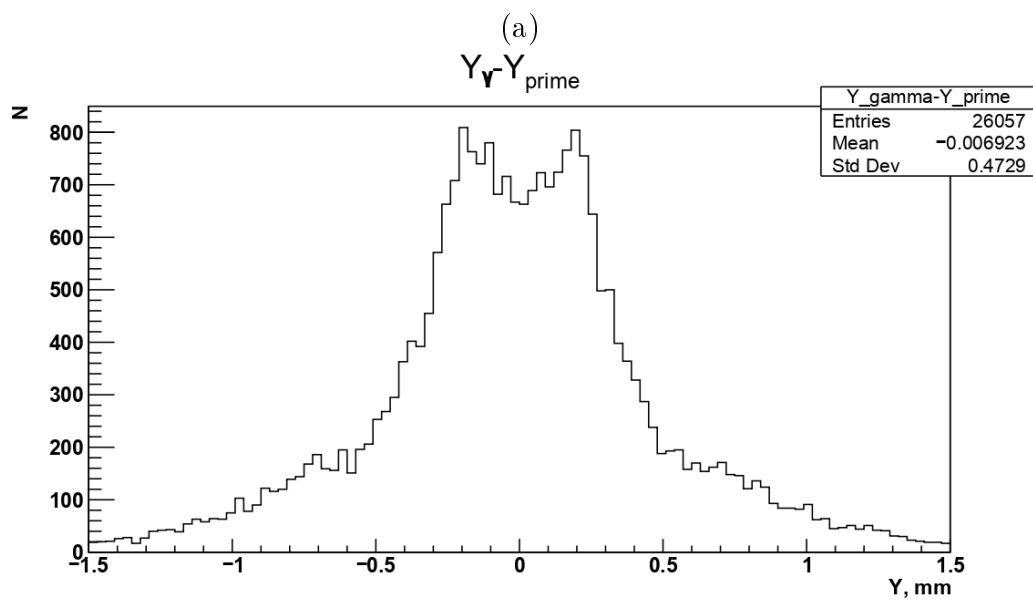
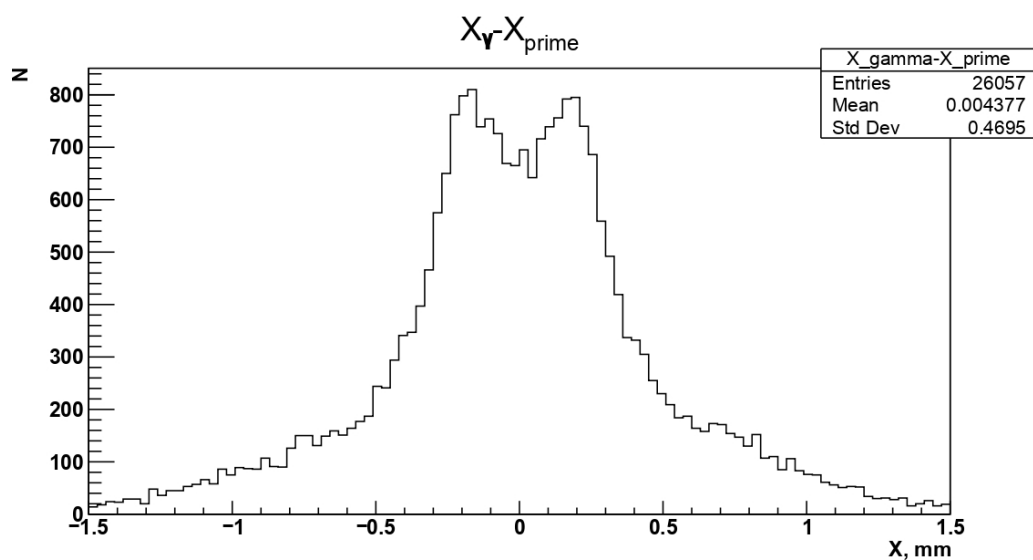


Рисунок 7.11 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

ПРИЛОЖЕНИЕ Е



(б)

Рисунок 7.12 — Истинные проекции кольца зарегистрированных квантов переходного излучения: (а) – проекция на ось X , (б) – проекция на ось Y

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

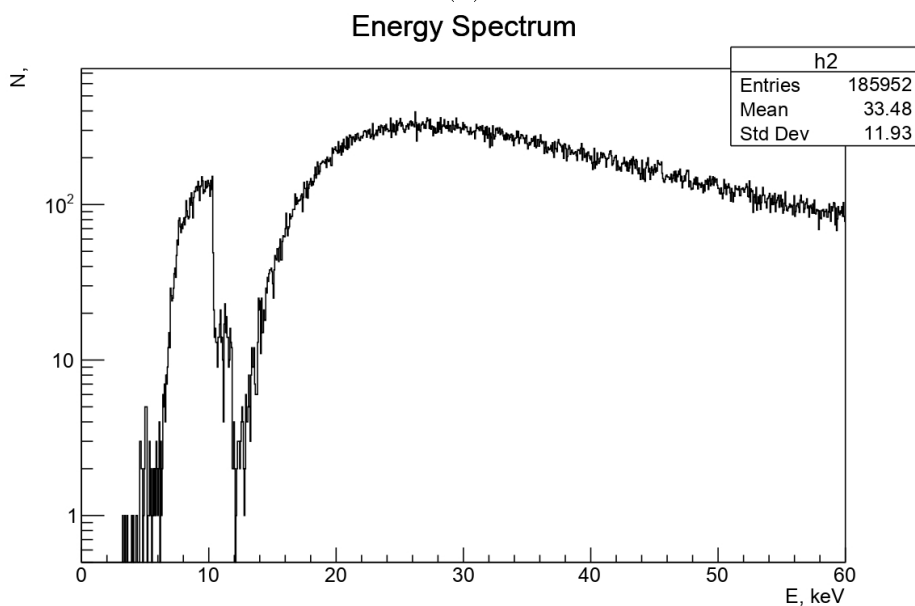
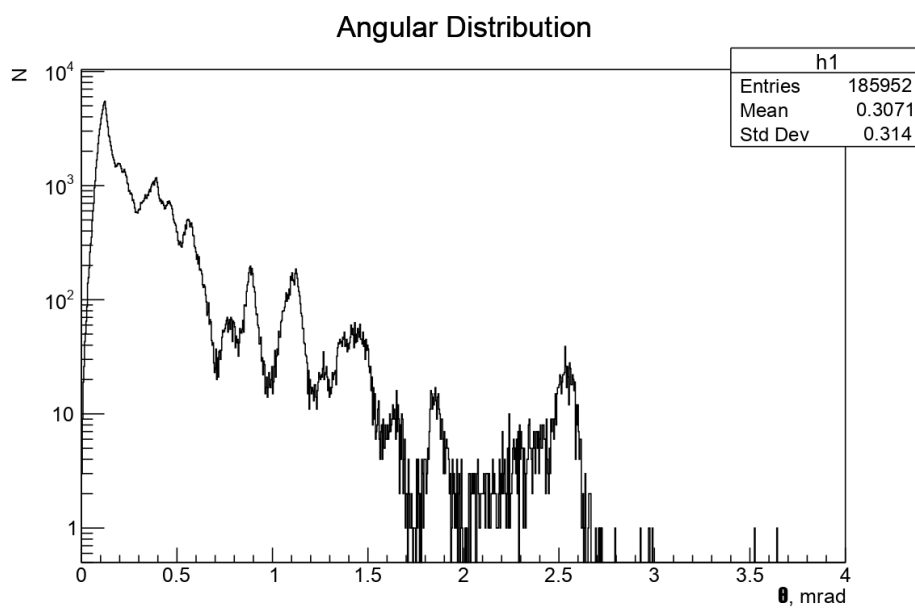


Рисунок 7.13 — Распределения вылетающего из радиатора переходного излучения: (а) — угловое, (б) — энергетическое