



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»



Институт ядерной физики и технологий
Кафедра физики элементарных частиц №40

Выпускная квалификационная работа бакалавра
на тему:

Моделирование детектора переходного излучения на основе GaAs с помощью пакета Geant4

Студент:
Морозихин Александр Николаевич
Группы Б18-102

Научный руководитель:
Тихомиров Владимир Олегович,
к.ф.-м.н.

Москва
2022

Мотивация

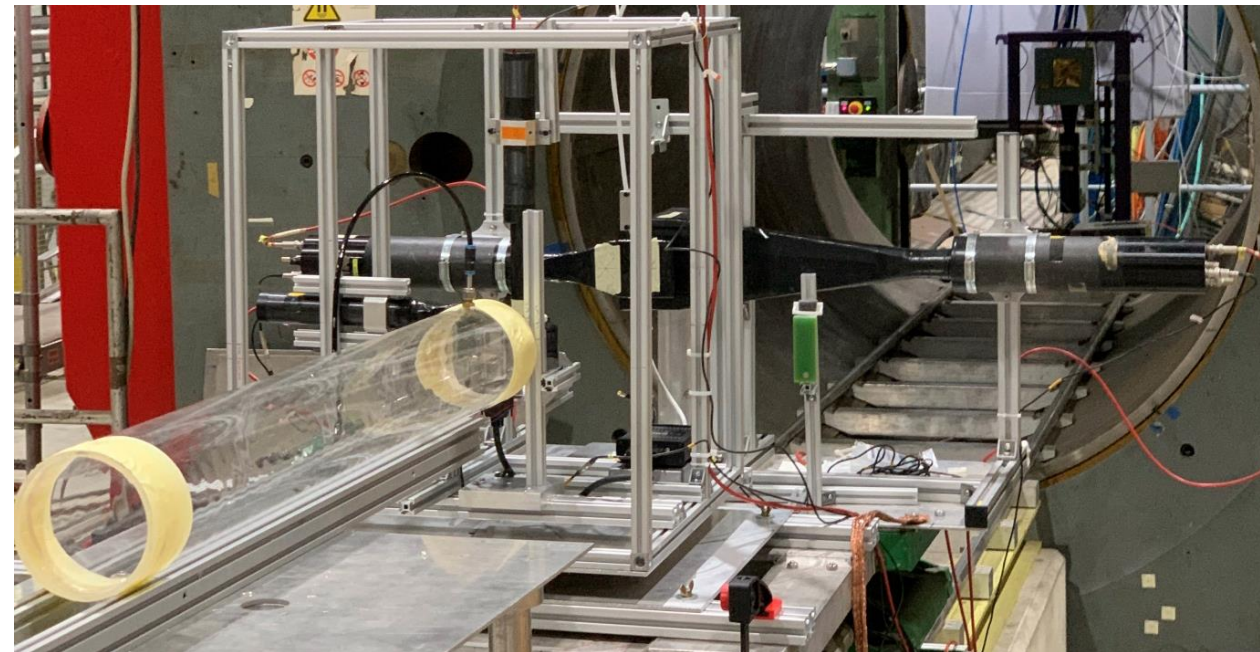
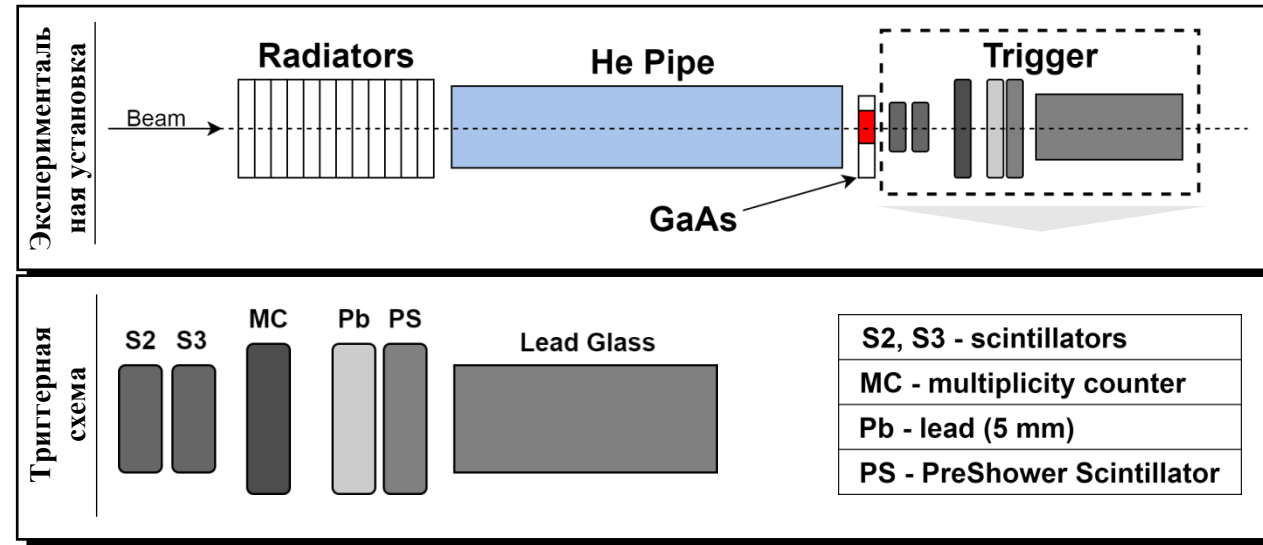
Для изучения возможности разделения электронов и адронов в экспериментах на БАК под малыми углами к встречным пучкам, был разработан концепт детектора - спектрометр малых углов. Одним из его составляющих частей является пиксельный полупроводниковый детектор на основе GaAs. Эта детектирующая установка разработана для реализации процесса идентификации частиц с использованием переходного излучения.

Так в 2021 году в ЦЕРН был проведен эксперимент по изучению процесса разделения электронов и пионов, с использованием данного детектора.

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

Конфигурация эксперимента TestBeam2021



Пиксельный детектор



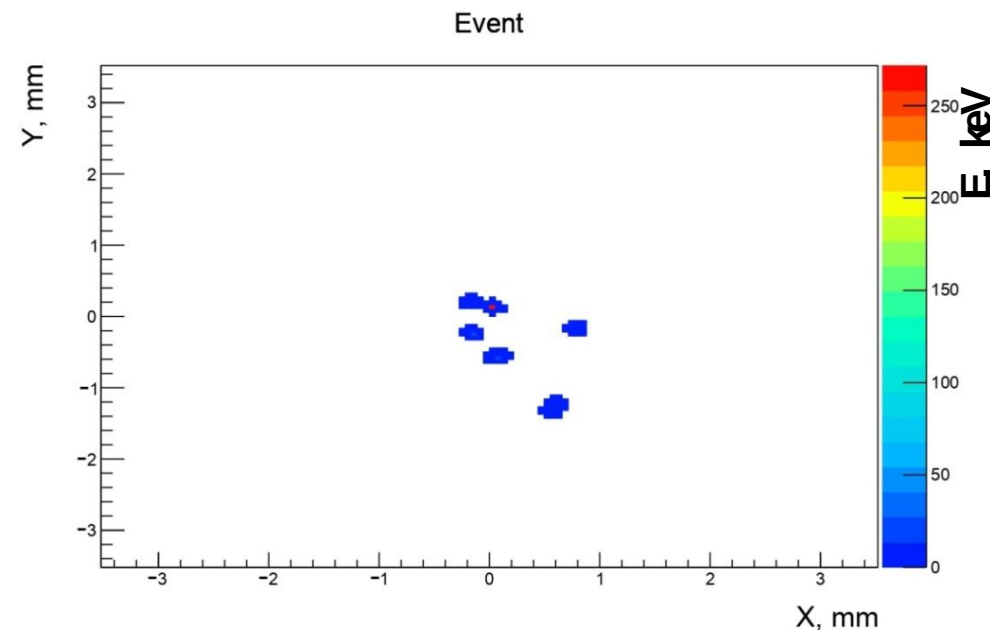
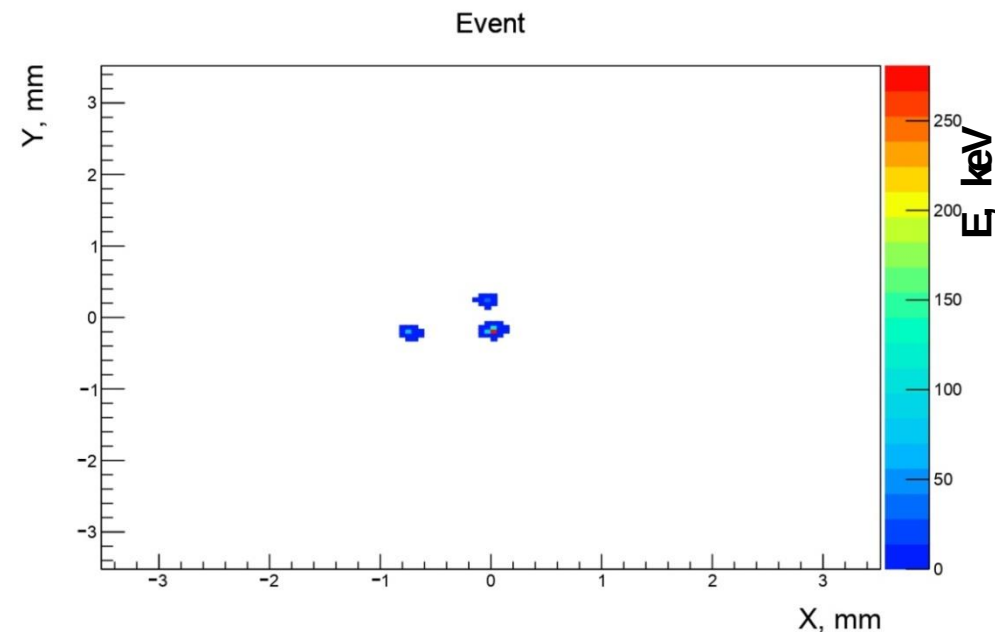
На снимке изображен пиксельный полупроводниковый сенсор, подключенный к считывающей плате компании Medipix. Данный детектор состоит из 65536 пикселей, с каждого из которых, в случае регистрации частицы, поступает сигнал. **В рамках данного эксперимента детектор позволяет:**

- Измерить энергию регистрируемого излучения
- Построить угловое распределение регистрируемого излучения
- Построить распределение множественности регистрируемых квантов переходного излучения

*Дополнительные слайды-1

Визуализация события (МК)

[e^- 20GeV: Mylar 90 layers: 2m He pipe]



Ход работы

Представляемую к защите работу можно разделить **на пять ключевых этапов** реализации в хронологической последовательности:

1.Описание геометрии:

- Радиаторы
- Трубка с гелием
- Сенсор детектора

2.Формирование физического пакета:

- Физические процессы
- Генератор первичных частиц

3.Обработка событий:

- Алгоритм пикселизации
- Формирование результатов

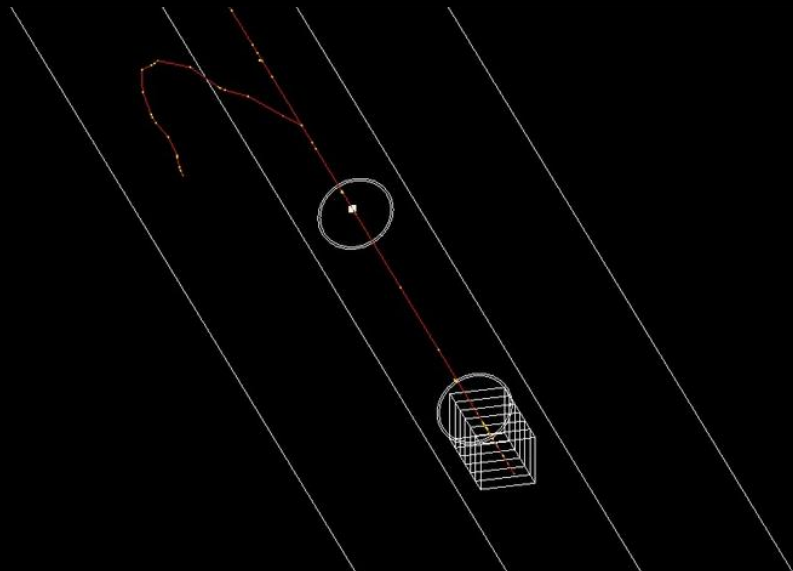
4.Дополнительно:

- Алгоритм расчета диффузии
- Объединение моделирования с алгоритмом кластеризации

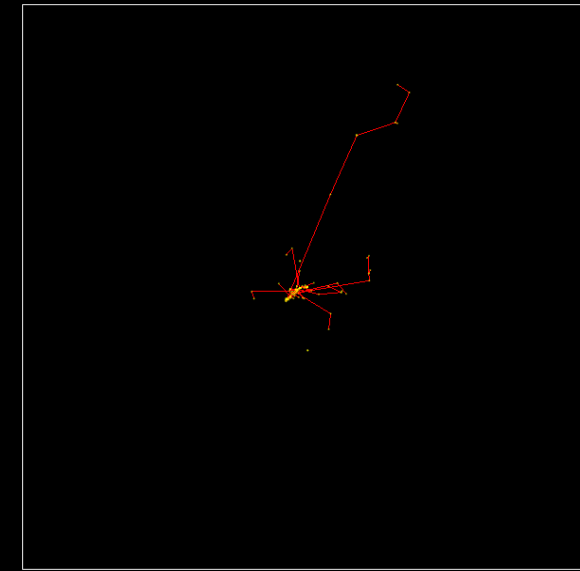
5.Анализ расхождений МК с экспериментальными данными:

- Проверка работы алгоритма пикселизации
- Проверка генерации квантов переходного излучения Geant4

**Дополнительные слайды-1,2,3*



Визуализация геометрии установки описанной в Geant4

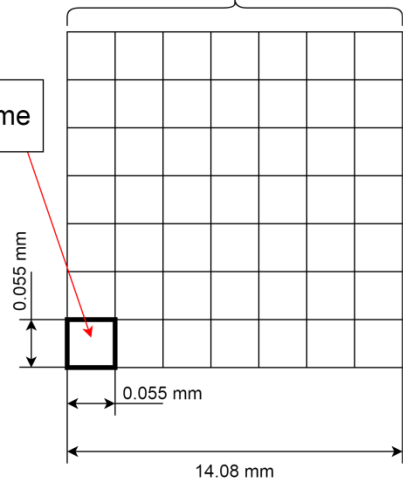


Визуализация события в плоскости сенсора (треки от электронов)

1

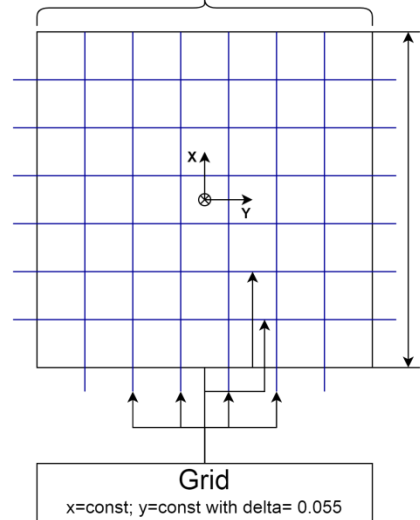
Detector Cell Volume
solid volume divided
pixel volumes

Pixel volume



Detector Solid Volume
solid volume with
analytical grid

Matrix
256 x 256 pixels



Пикселизация событий

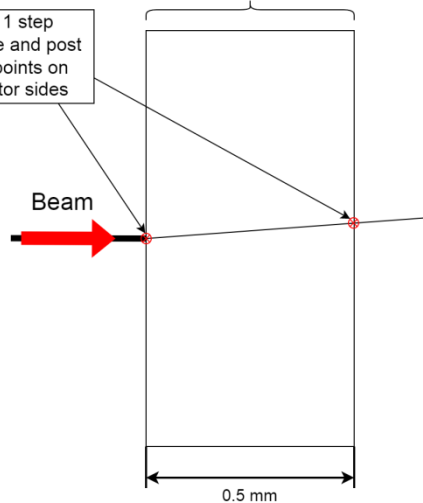
Был осуществлен переход детектора состоящего из 65536 отдельных объемов (пикселей) к **сплошному объему**, чему сопутствовал ввод **алгоритма пикселизации** - сработавшие пиксели определяют **аналитической координатной сеткой**.

2

Detector Volume
1 solid volume

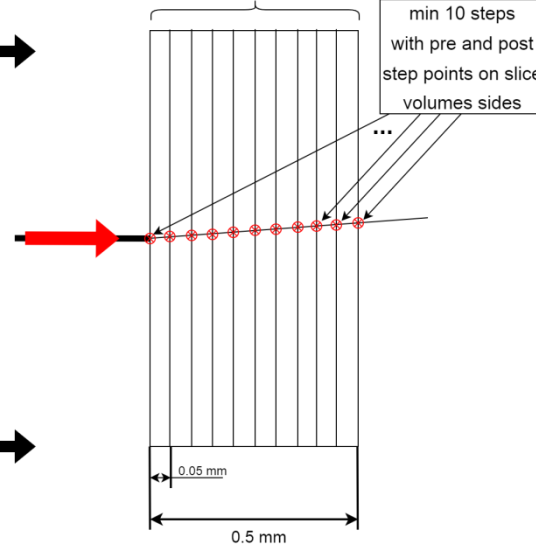
min 1 step
with pre and post
step points on
detector sides

Beam



Detector Volume
with
10 slices (stack of 10
volumes)

min 10 steps
with pre and post
step points on slice
volumes sides



Разбиение на слои

Появилось **разбиение на слои**, что было мотивированно описанием диффузии заряда. Это изменение приводит к увеличению минимального числа шагов трассировки частиц в G4, тем самым способствует более точному моделированию диффузии.

Определение физического пакета моделирования

Gamma

- Transportation
- Photo-electric
- Conversion
- Rayleigh scattering
- Compton scattering
- **RegularXTRad**

Electron

- Transportation
- Ionisation
- Multiple Scattering
- Bremsstrahlung

Additional processes

- Annihilation
- Pair Production
- **Auger Cascade**
- **Fluorescence**
- Decays

Диффузия заряда

Диффузия заряда в детекторе обусловлена тем, что свободные носители заряда двигаясь к считывающей плате – одноименные, следовательно расталкиваются из-за кулоновского взаимодействия.

Из-за диффузии, в процессе регистрации частицы срабатывает не один, а несколько пикселей. **Скопление сработавших пикселей** в результате регистрации одной частицы – **кластер регистрации**.

В объеме детектора, объем, который занимает диффундирующее облако носителей заряда, описывается **распределением Гаусса**. Сигма данного распределения, для представленного детектора, **описывается аналитическим выражением**, полученным научной группой в г. Дубна.

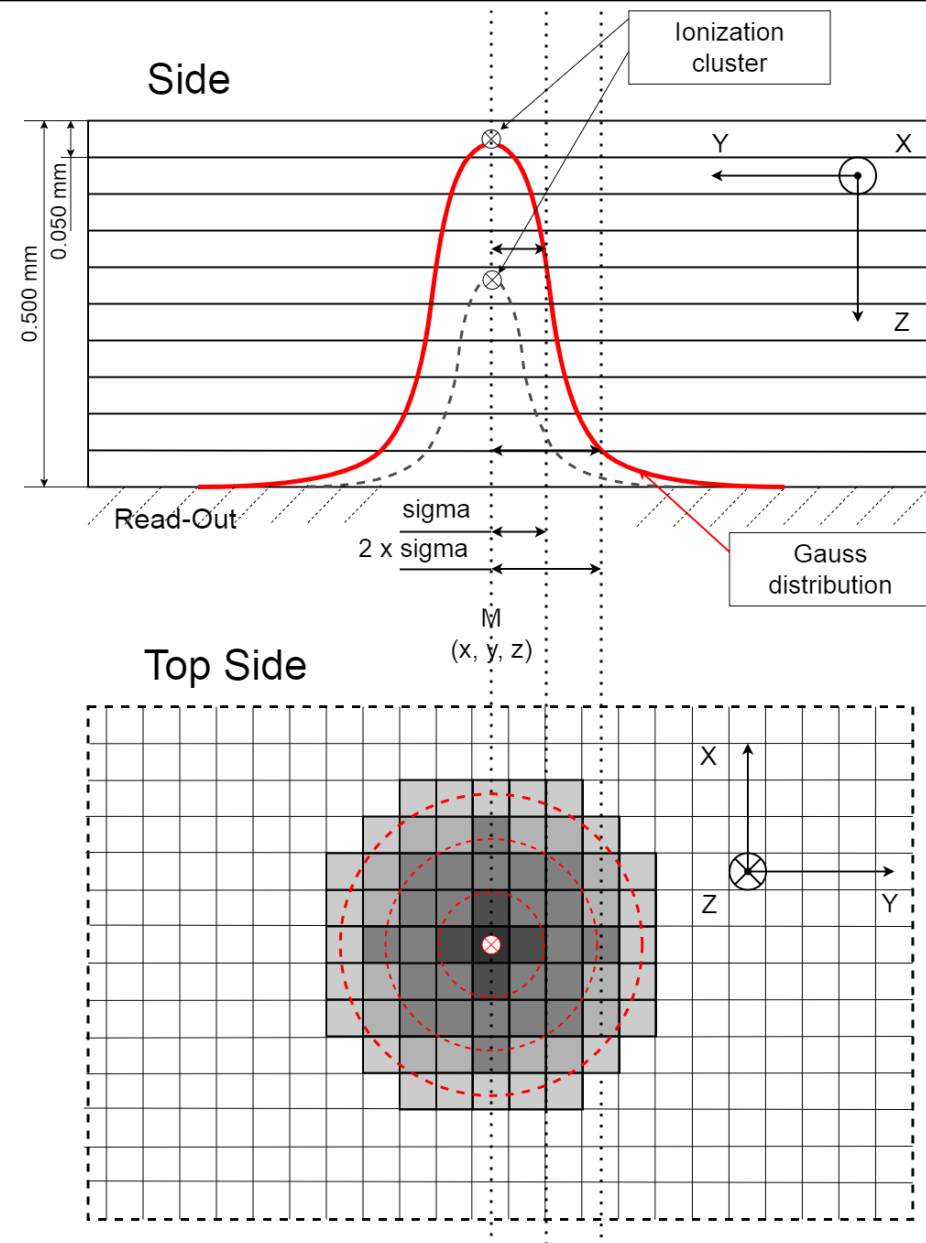
Выражение для сигма диффузии

$$\sigma [\mu m] = 0.024 \times l + 2 \mu m$$

- l – расстояние от точки ионизации до считывающей платы

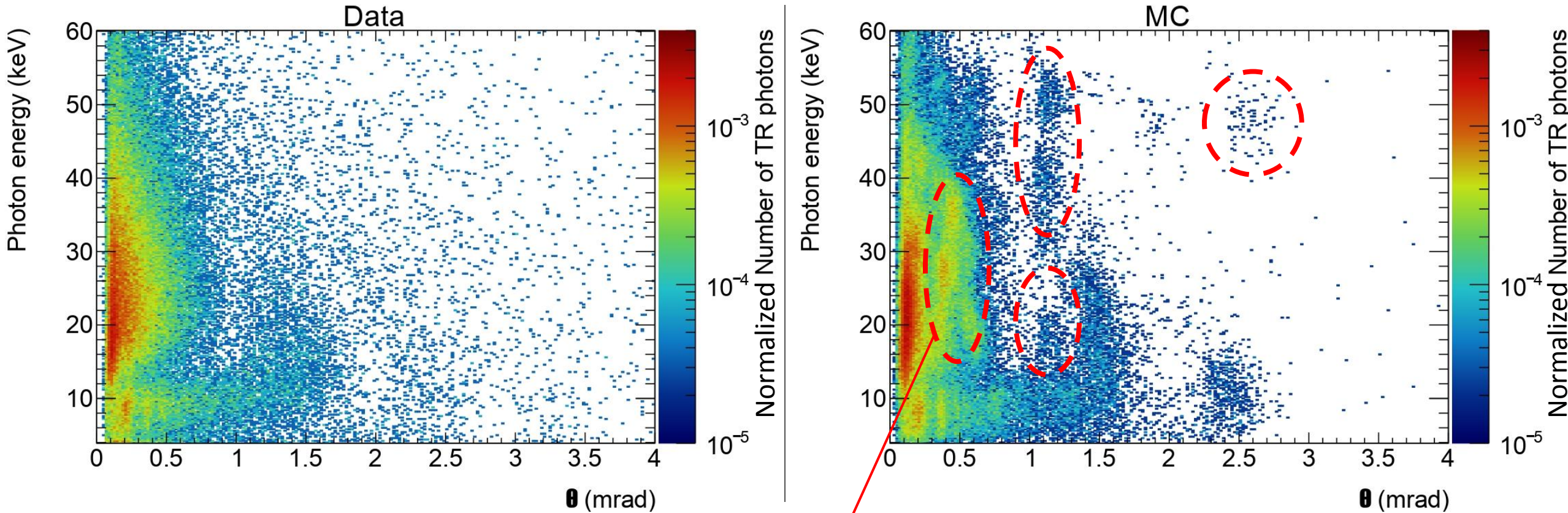
Величина 2 мкм описывает диффузию заряда – размытие точки регистрации частицы при $l = 0$ также присутствует (2 мкм).

Визуальное представление диффузии



Двумерное распределение зарегистрированных квантов
переходного излучения по энергиям и углам

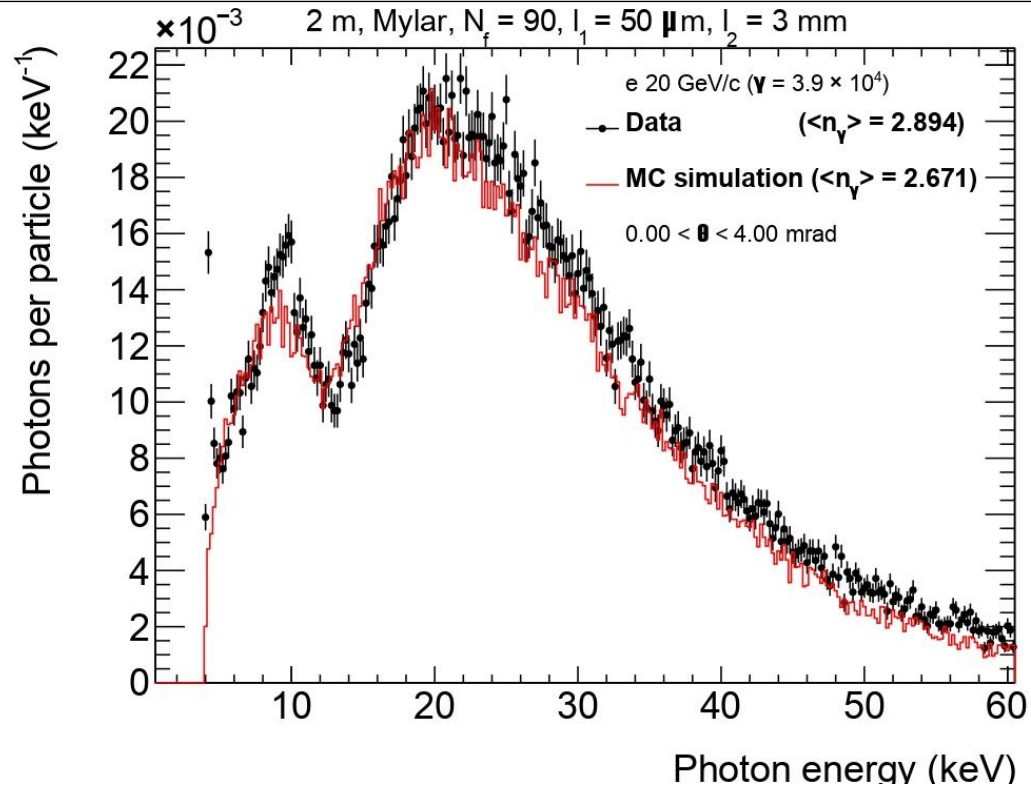
[e^- 20GeV: Mylar 90 layers: 2m He pipe]



Множественные пятна, появление которых обусловлено как формой **углового распределения**, так и **энергетического**, для зарегистрированных квантов переходного излучения в Geant4.

Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения

1

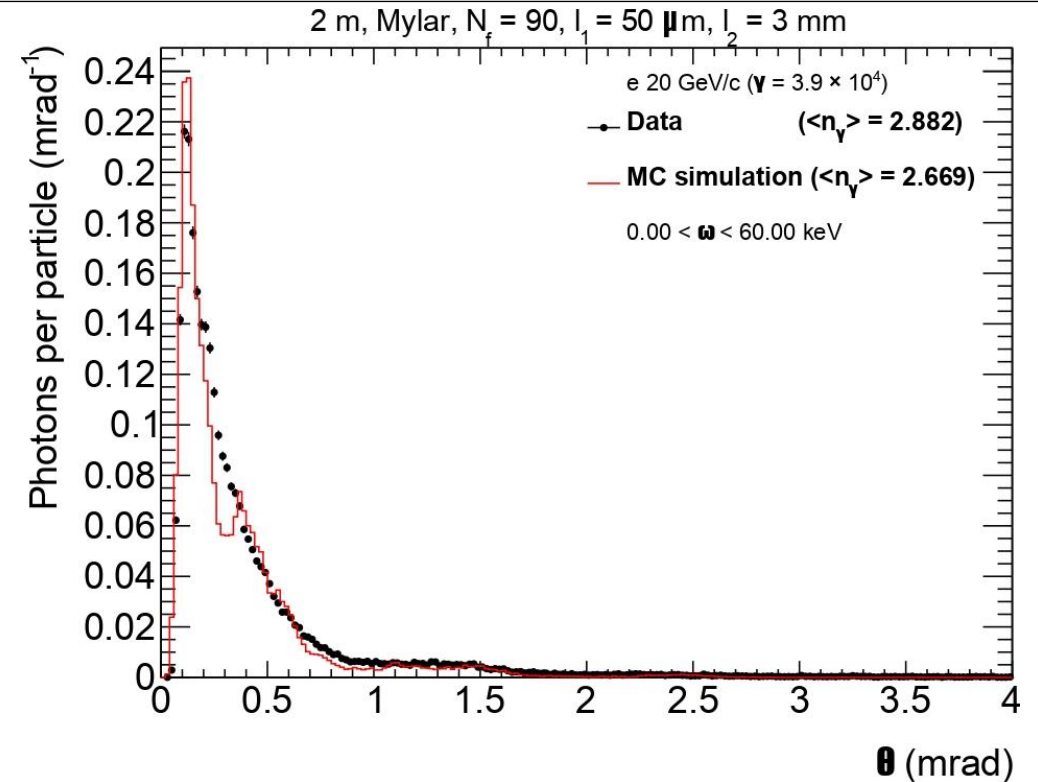


Энергетический спектр достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными с точностью до энергетических калибровок, которые будут проведены после исправления расхождений связанных с угловым распределением

*Дополнительные слайды-2,3

Угловое распределение зарегистрированных квантов переходного излучения

2

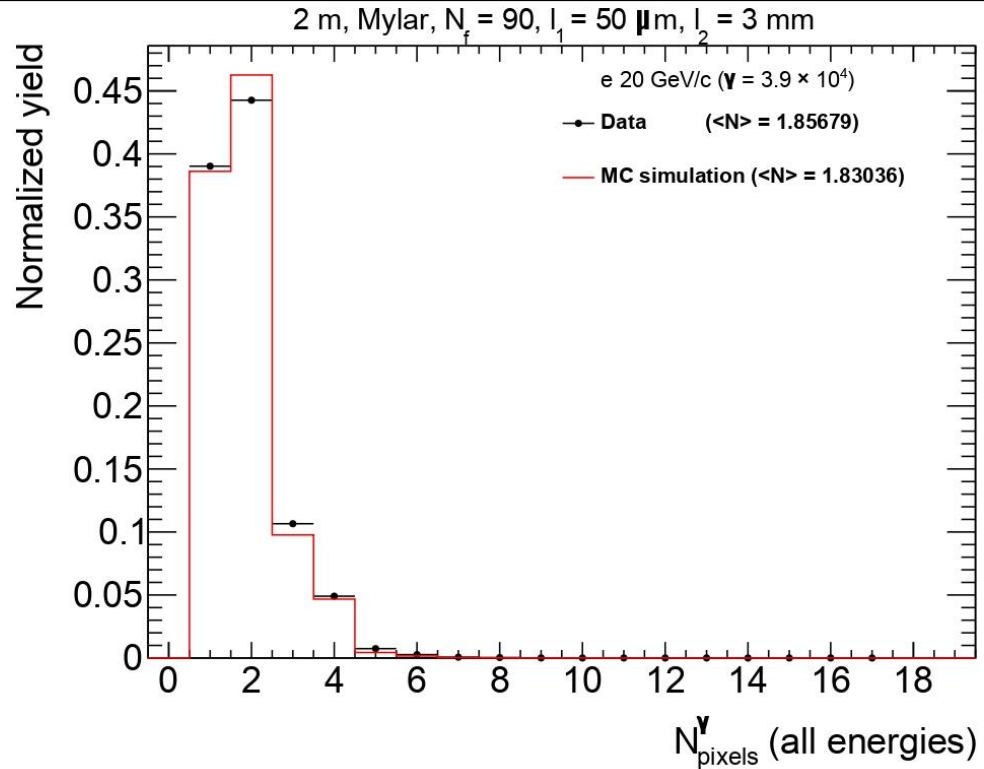


В частности, для углового распределения, в области 0.5 мрад хорошо виден второй пик распределения, который из-за эффекта диффузии заряда в детекторе должен размываться, что видно из экспериментальных данных. Тестовые проверки по изучению такого рода расхождений представлены в дополнительных слайдах.

*Дополнительные слайды-4,5,6

Количество пикселей в кластере регистрации кванта переходного излучения

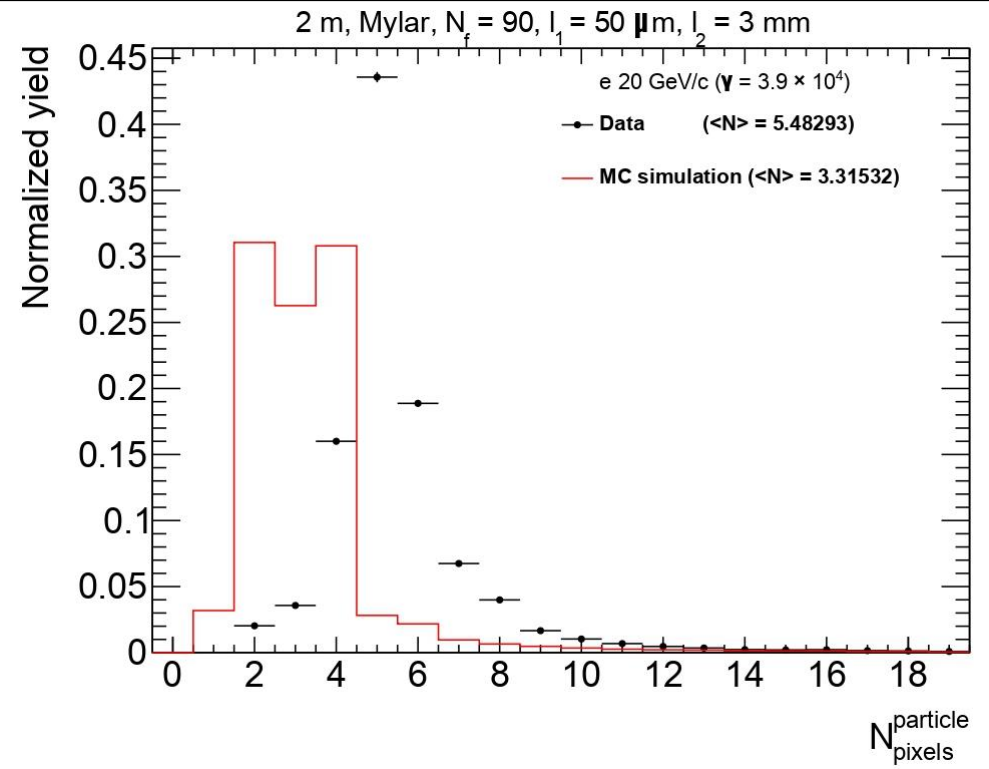
1



Количество пикселей в кластерах для **квантов переходного** излучения в большей степени **определяется диффузией** заряда в детекторе. Из представленного распределения видно, что, введенный в моделирование, алгоритм расчета диффузии дает **хорошее согласие** с данными полученными в эксперименте.

Количество пикселей в кластере регистрации первичной частицы

2



Относительно количества пикселей в кластере регистрации **первичной частицы**, оно также сильно зависит от эффекта **внутренних наводок пикселей**. Энерговыделение первичной частицы на порядок больше энерговыделения кванта переходного излучения, что характеризуется **большим по амплитуде током** в детекторе, который **наводит заряд** на соседние, следовательно, они **срабатывают**.

Заклучение по G4 TestBeam2021 Simulation

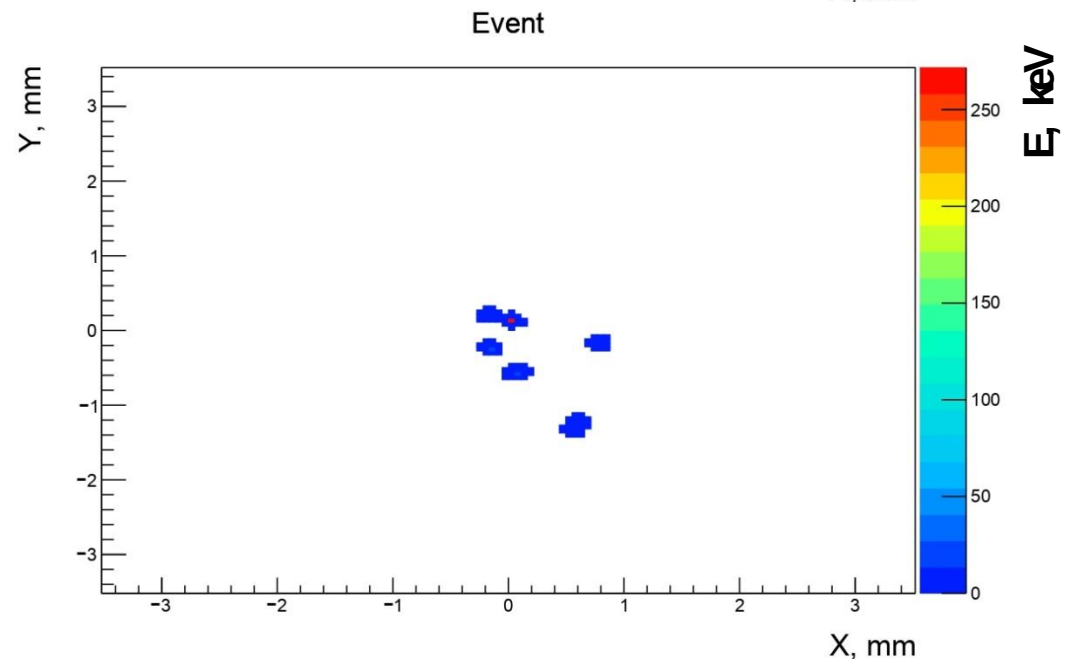
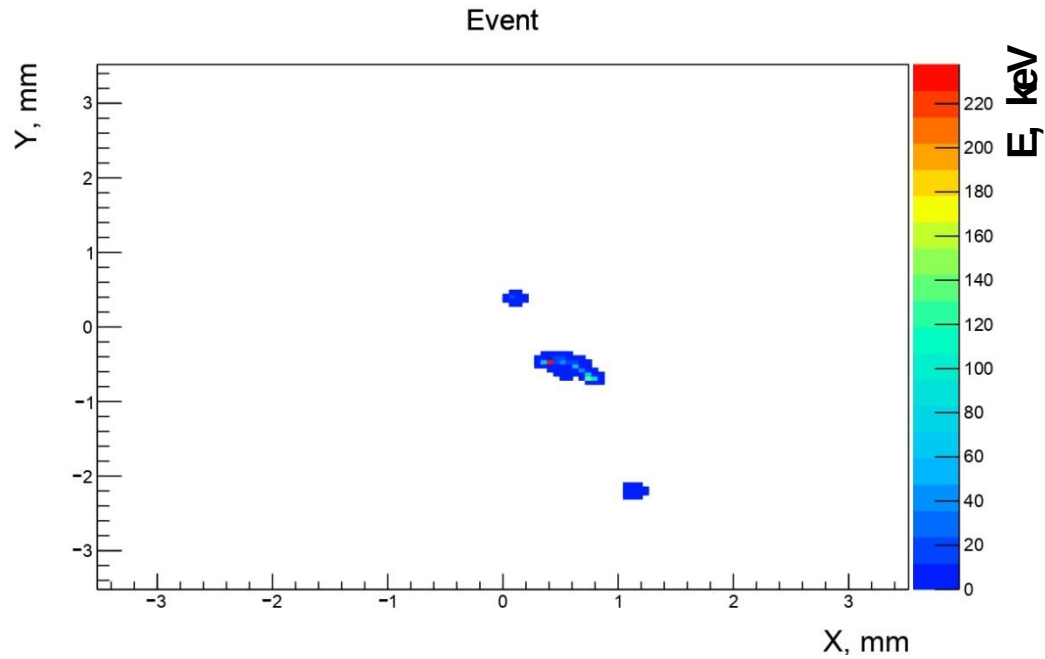
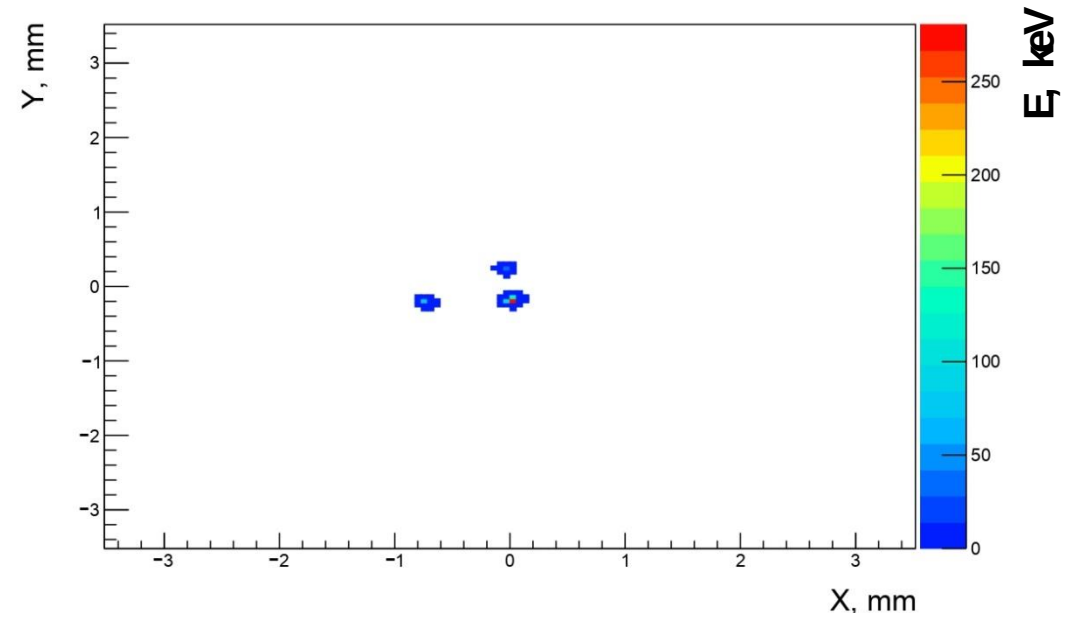
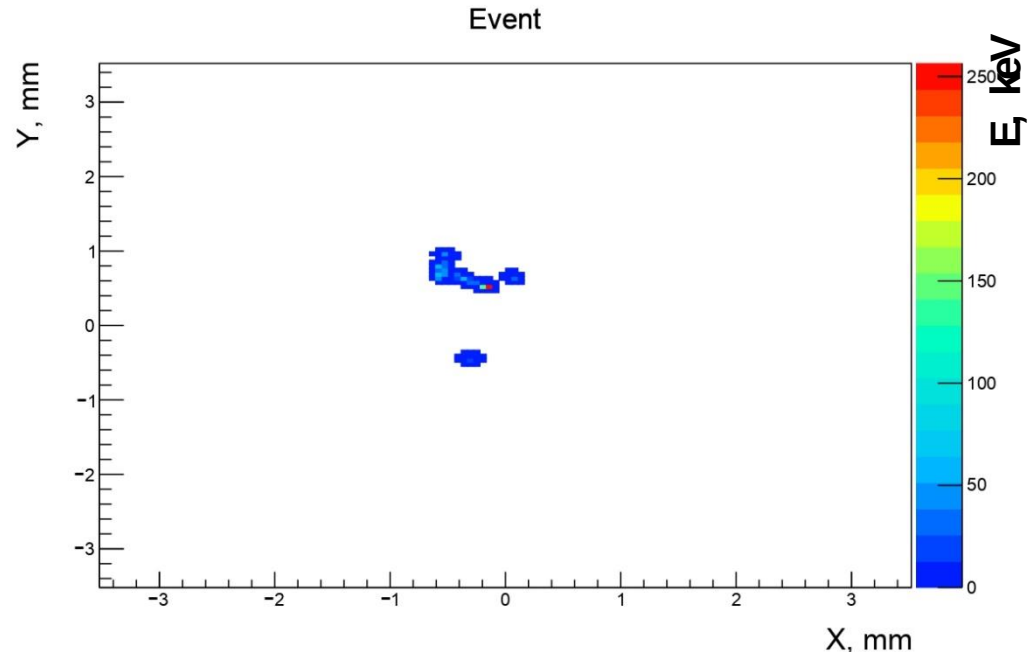
Реализовано:

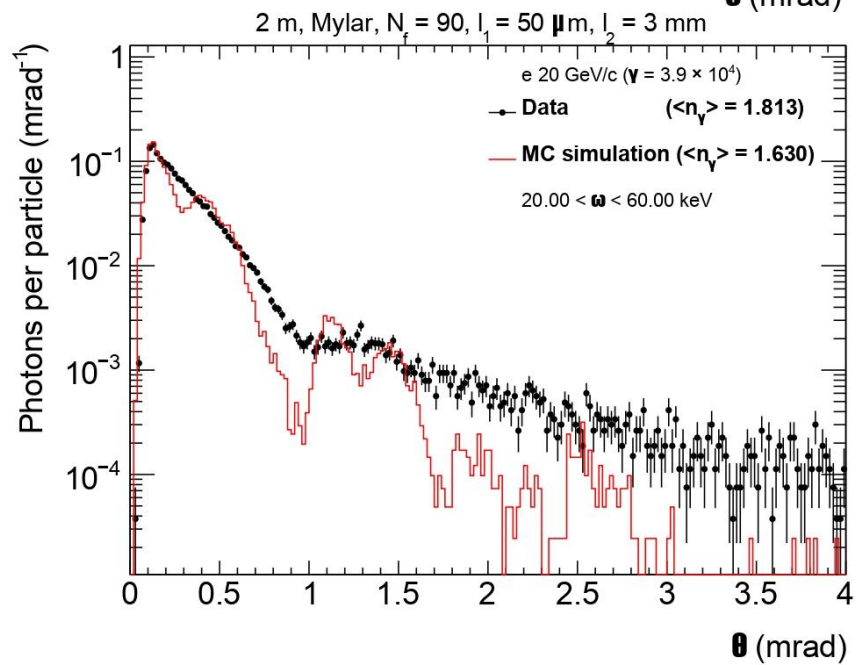
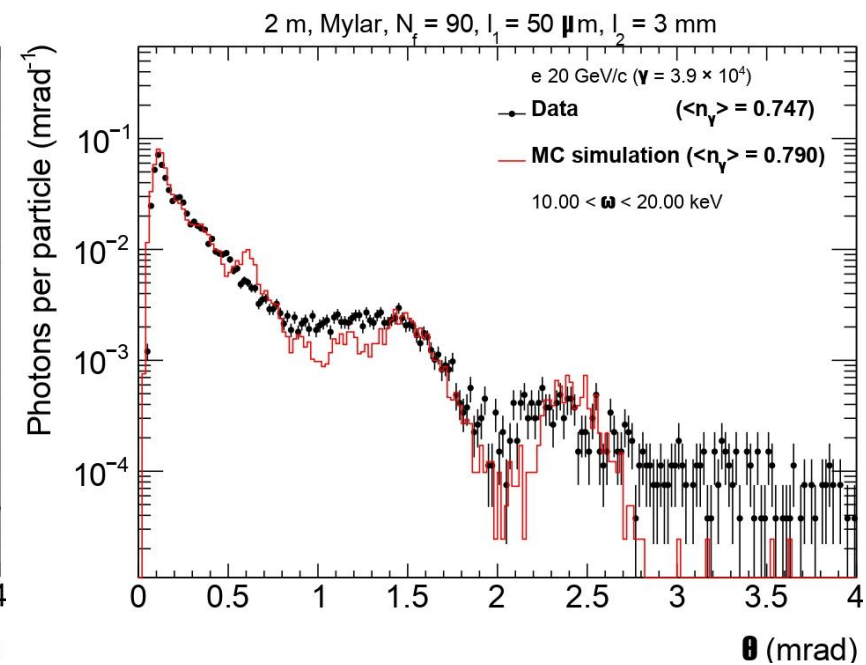
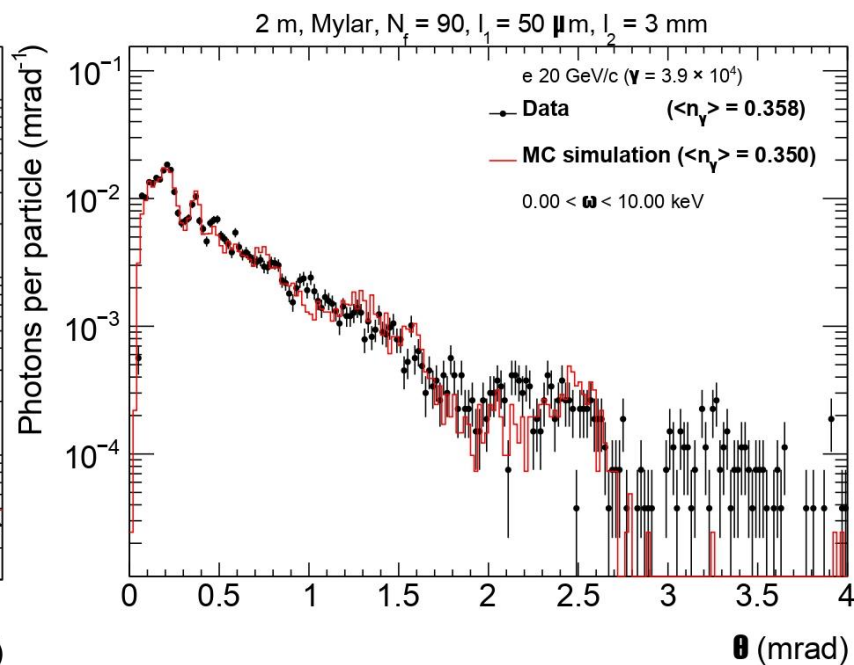
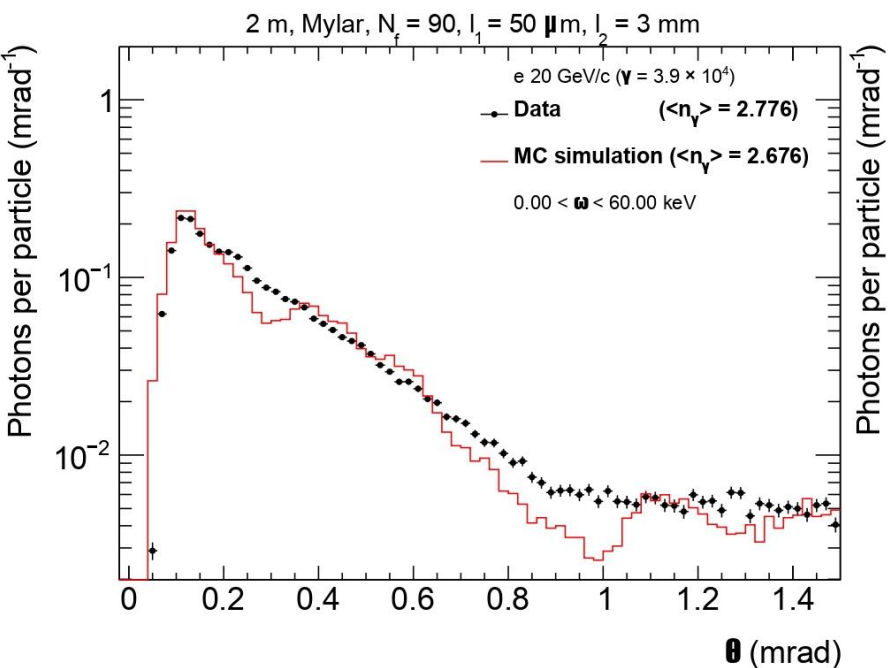
- описание геометрии эксперимента;
- формирование G4 физического пакета для моделирования эксперимента;
- введение классификатора регистрируемых частиц с помощью G4Step;
- алгоритм пикселизации событий;
- введение диффузии заряда в детекторе;
- объединение G4 моделирования с алгоритмом кластеризации;
- анализ выявленных расхождений

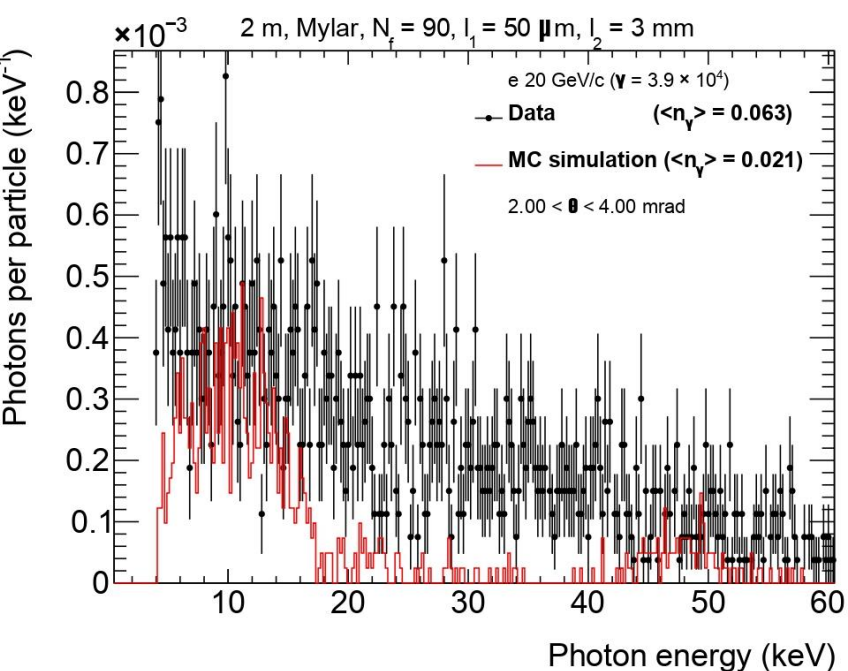
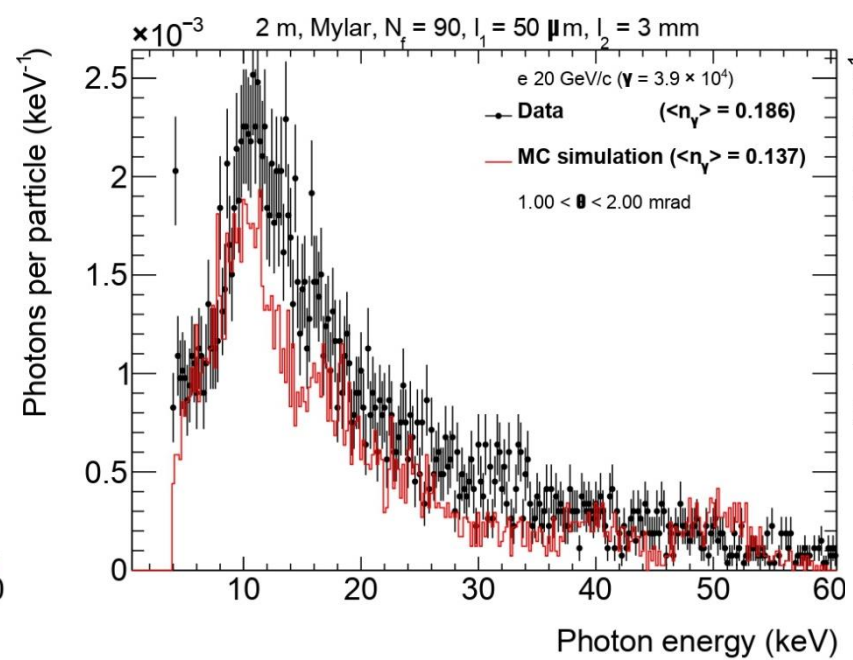
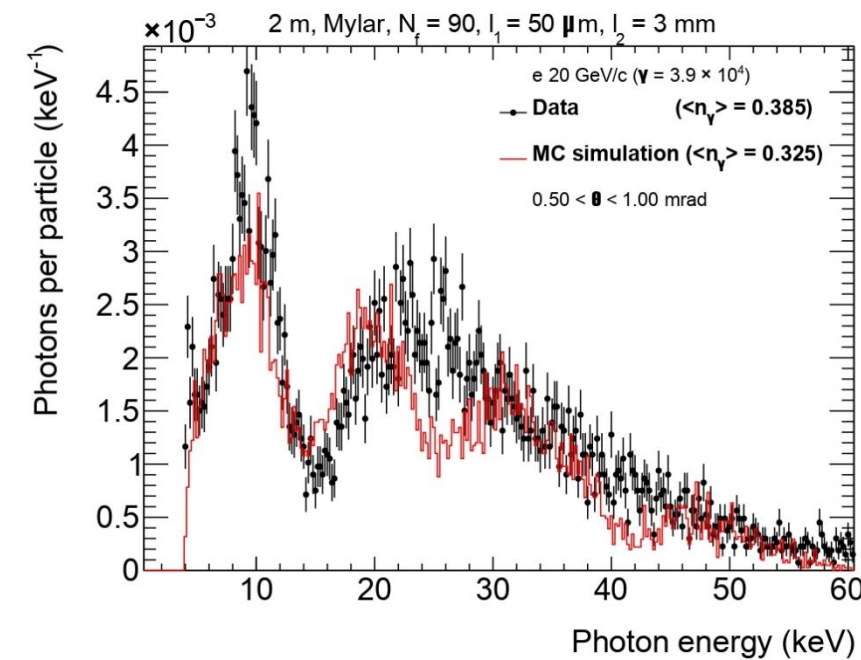
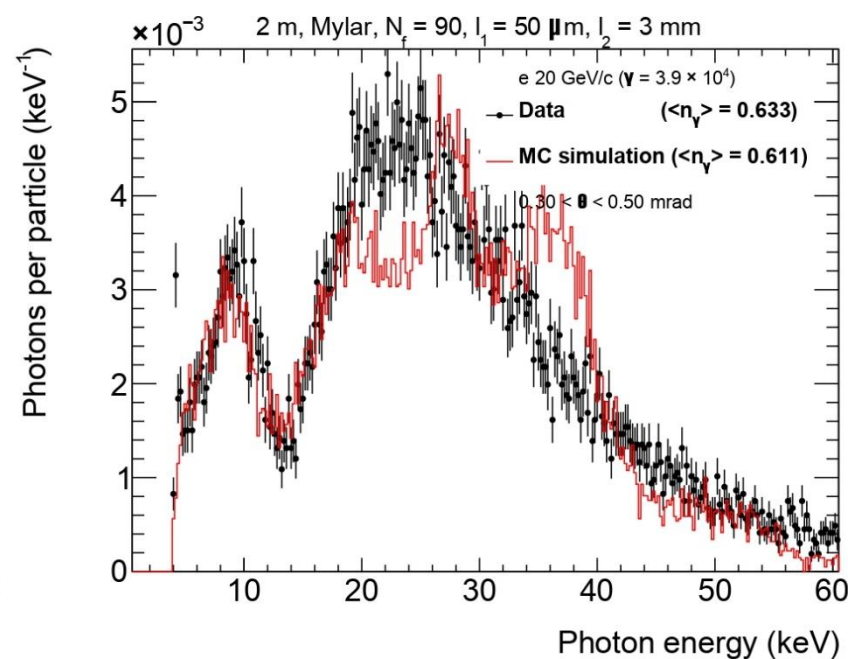
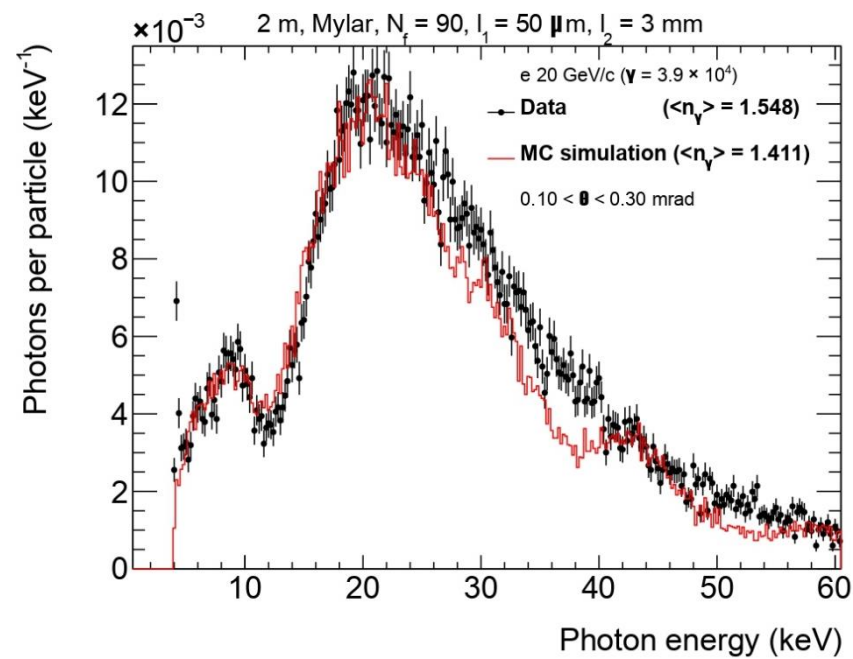
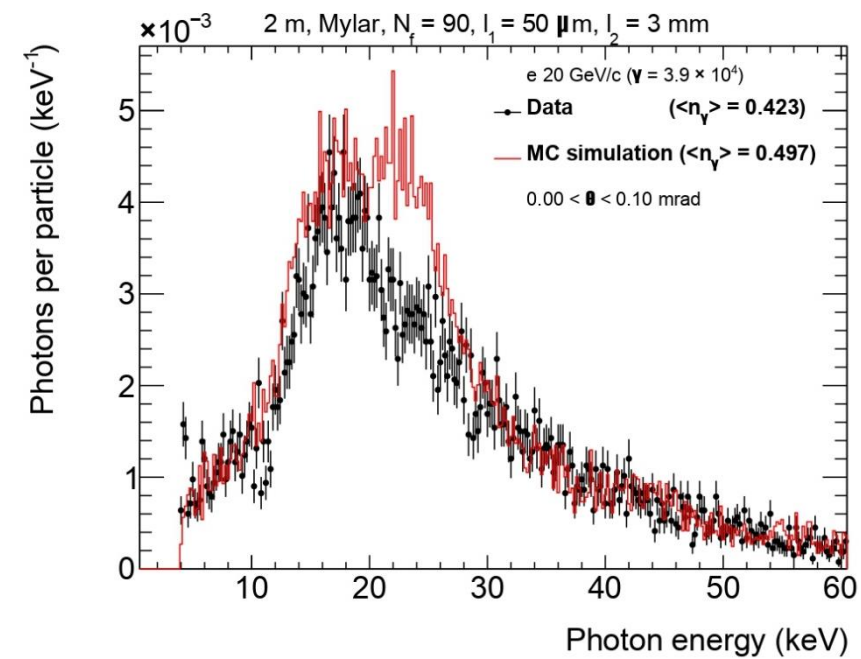


В ходе работы была **реализована Geant4 модель** полупроводникового пиксельного детектора на основе GaAs. Были **получены результаты** и **проведен** их подробный **анализ**, в ходе которого был **сформирован вывод** и предпосылки к продолжению работы по данному направлению: базовое физическое описание процесса переходного излучения в Geant4 не подходит для описания работы подобного рода детектора, что выражено в явном несоответствии углового распределения регистрируемых квантов переходного излучения экспериментальным данным. Необходимо использовать другой физический пакет.



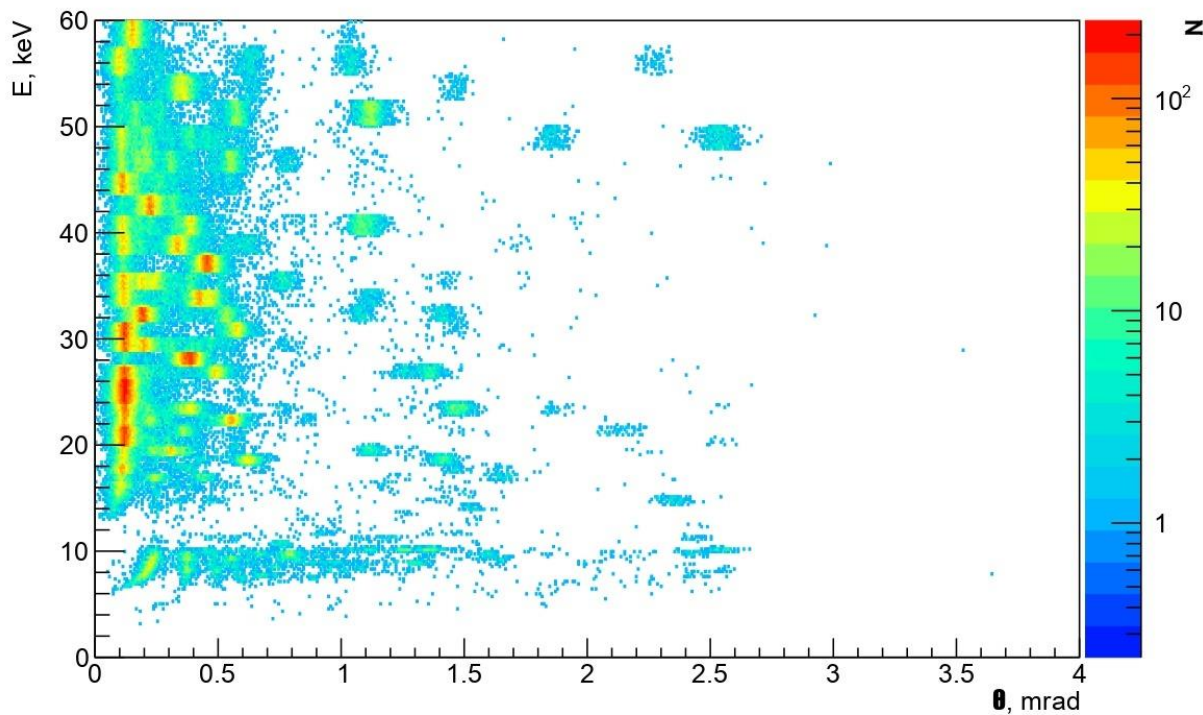




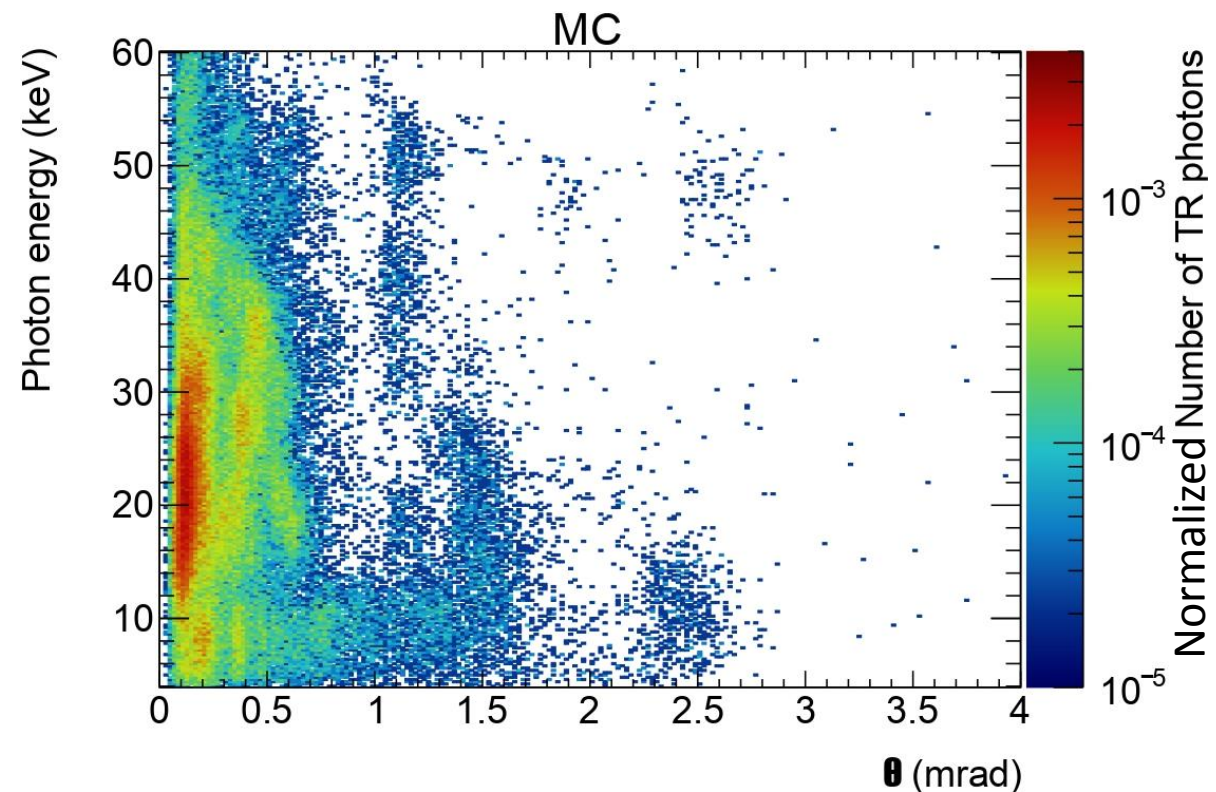


Двумерное распределение квантов переходного излучения
вылетевших из радиатора по направлению к детектору

Spectrum



Угловое распределение **зарегистрированных** квантов переходного излучения



Для поиска причины наблюдаемых расхождений были реализованы **две проверки**:

1. Проверка работоспособности алгоритма пикселизации
2. Получение спектра переходного излучения вылетающего из радиаторов по направлению к детектору

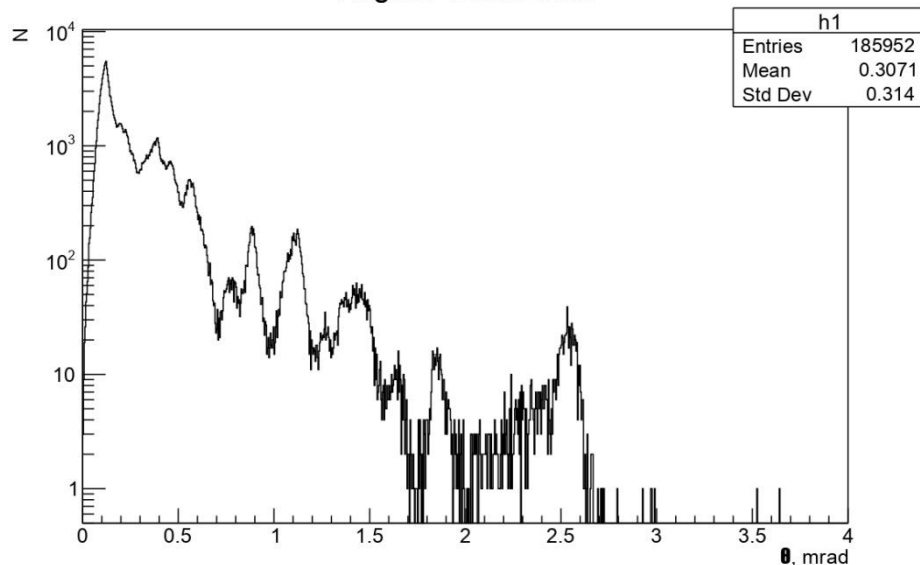
В ходе **первой проверки**, представленной в дополнительных слайдах (*слайд-6*), установлено, что **определение координат** регистрации частицы на матрице детектора происходит **верно**.

Далее, в рамках **второй проверки**, необходимо проверить, какой **спектр генерируется Geant4** для переходного излучения и вылетает из радиаторов. Полученный слева спектр имеет множество пиков, характерных для углового распределения.

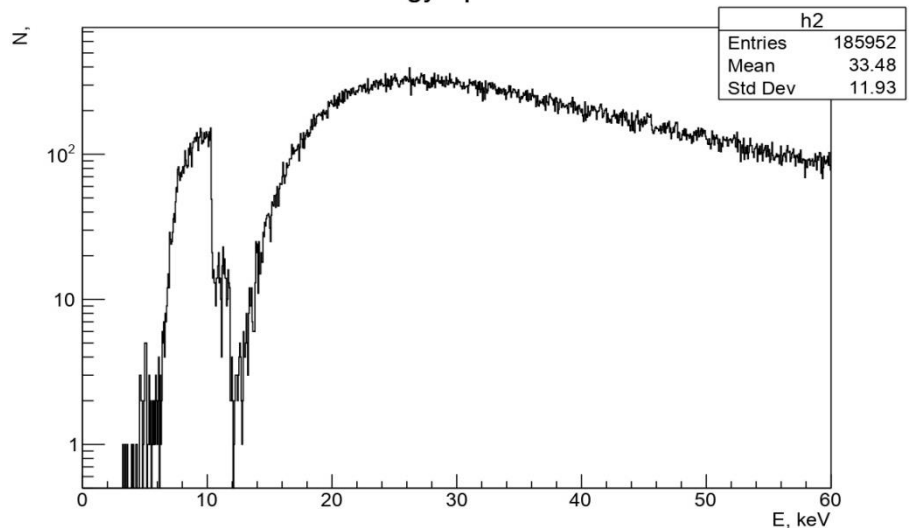
Распределения вылетающих из радиаторов квантов переходного излучения

1

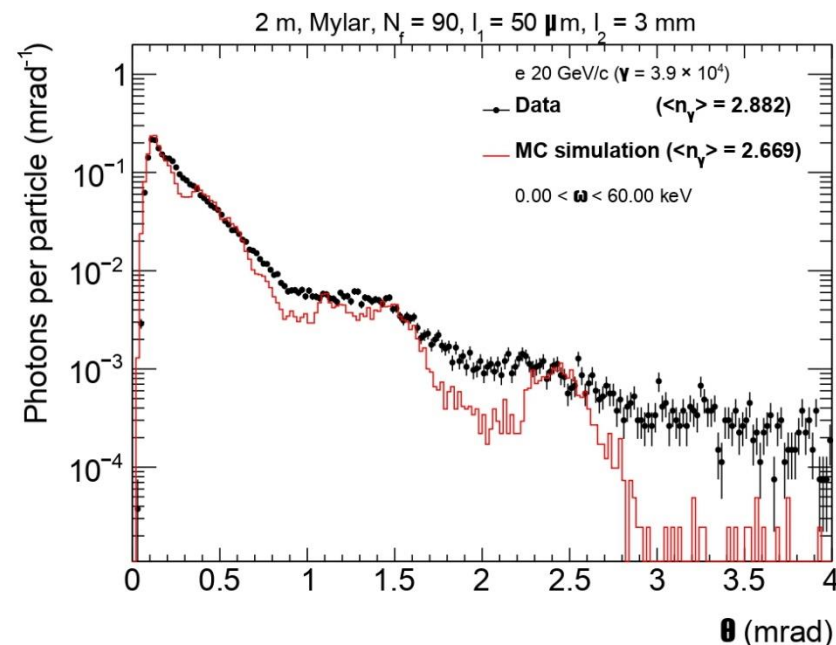
Angular Distribution



Energy Spectrum



Угловое распределение поглощенных квантов переходного излучения



Промежуточный вывод

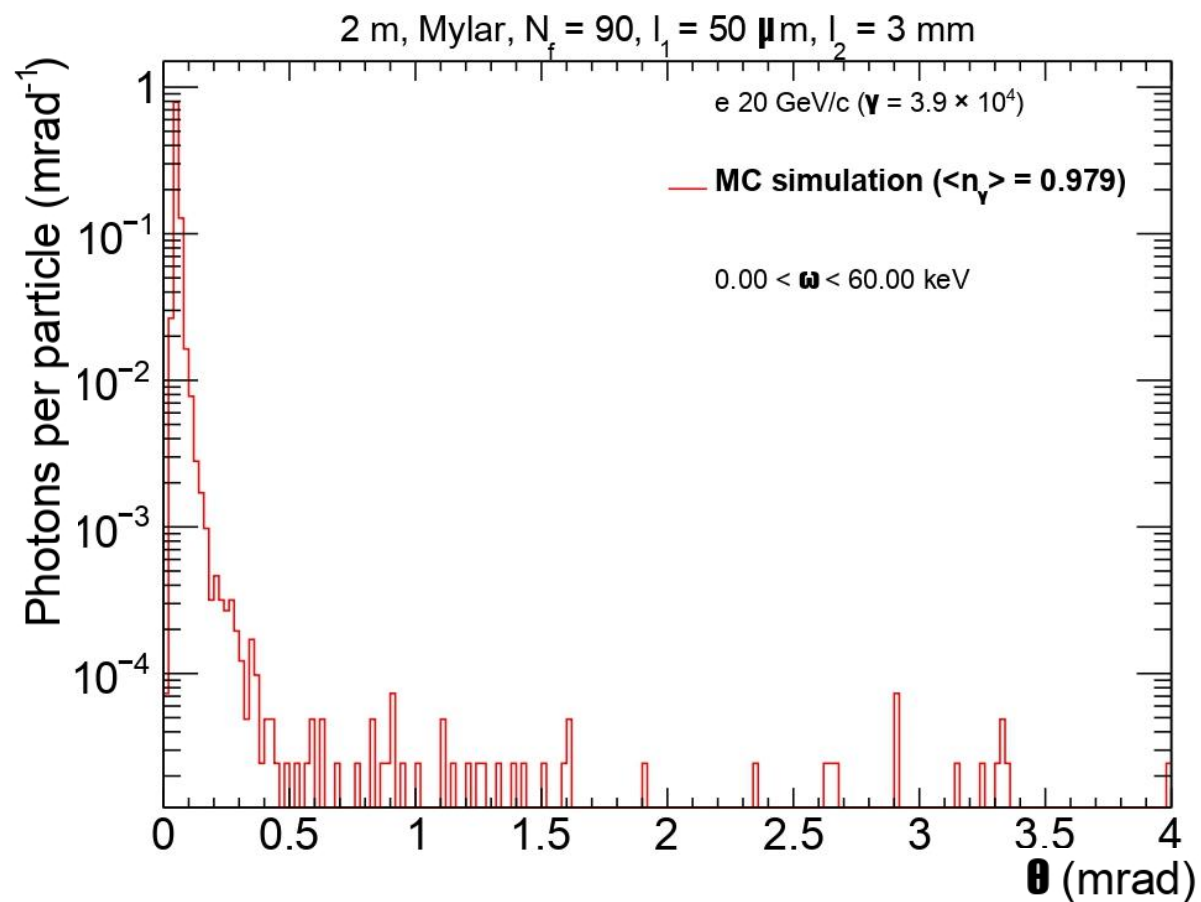
2

Видно, что в Geant4 с углами более **3 мрад** кванты переходного излучения почти **не генерируются**. В области от 1.5 до 2.5 мрад также видно малое количество генерируемых квантов. Сложная структура в области 0.5 мрад прослеживается и в полном моделировании.

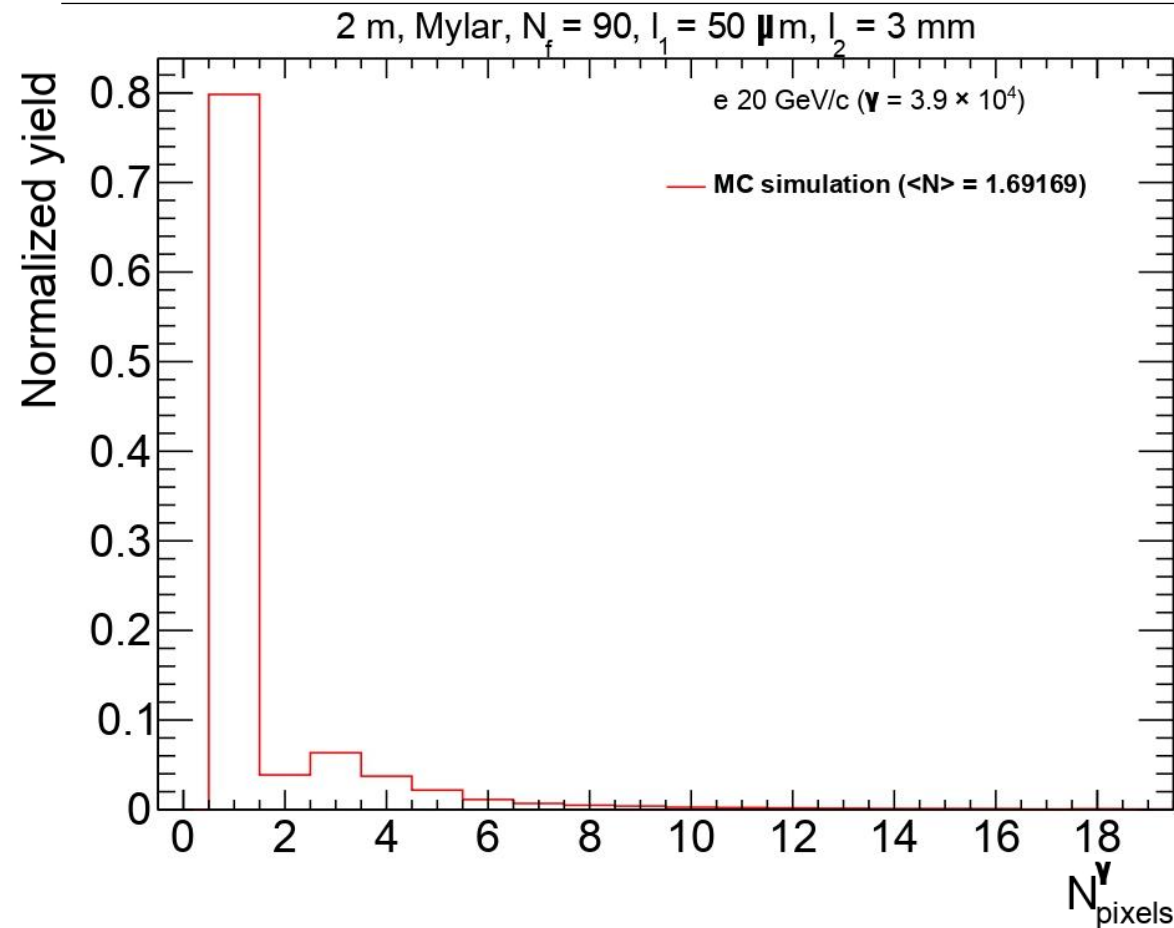
Наблюдаемые расхождения моделирования с экспериментальными данными для зарегистрированных квантов переходного излучения при углах **более 3 мрад**, а также в областях **0.5, 1, 2 мрад**, позволяет сформировать вывод: базовый **физическая пакет переходного излучения не подходит** для моделирования подобного рода экспериментов. Следовательно, необходимо произвести **настройку** физического пакета.

3

Угловое распределение полученное в результате тестовых проверок



Множественность пикселей в кластере регистрации квантов в результате тестовых проверок



Сгенерированный квант с энергией в 30 кэВ и первичная частицы направлены в центры соответствующих пикселей, расстояние между которыми 2 ширины одного пикселя. Ожидался тонкий и высокий пик углового распределения в области ~ 0.05 мрад, что и наблюдается на представленных распределениях. Также кванты прилетают в центры соответствующих пикселей $\rightarrow$ ожидается наиболее вероятно 1 пиксель в кластере – распределение по числу пикселей в кластере.

Перечень физических процессов

Gamma

- Transportation
- Photo-electric
- Conversion
- Rayleigh scattering
- Compton scattering
- RegularXTRad

Electron

- Transportation
- Ionisation
- Multiple Scattering
- Bremsstrahlung

Additional processes

- Annihilation
- Pair Production
- **Auger Cascade**
- **Fluorescence**
- Decays

Модульный метод определения физических пакетов

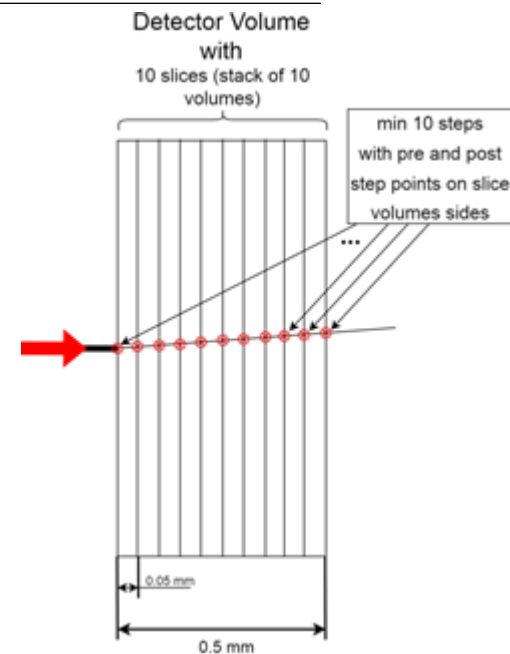
```

26 PhysicsList::PhysicsList(DetectorConstruction* ptr)
27 :   G4VModularPhysicsList(),
28   fDetector(ptr)
29 {
30     fDecayPhysicsList = new G4DecayPhysics();
31     fEmPhysicsList = new G4EmStandardPhysics(1);
32 }

```

Так как в Geant4 представлена возможность подключения физических процессов пакетами, сформированными по типу взаимодействия, был выбран путь именно такого определения физических процессов. За исключением рождения ожэ-электронов, флуоресценции, а также переходного излучения – они подключались отдельными процессами, так как не входят не в один из представленных пакетов.

Пороги на трассировку



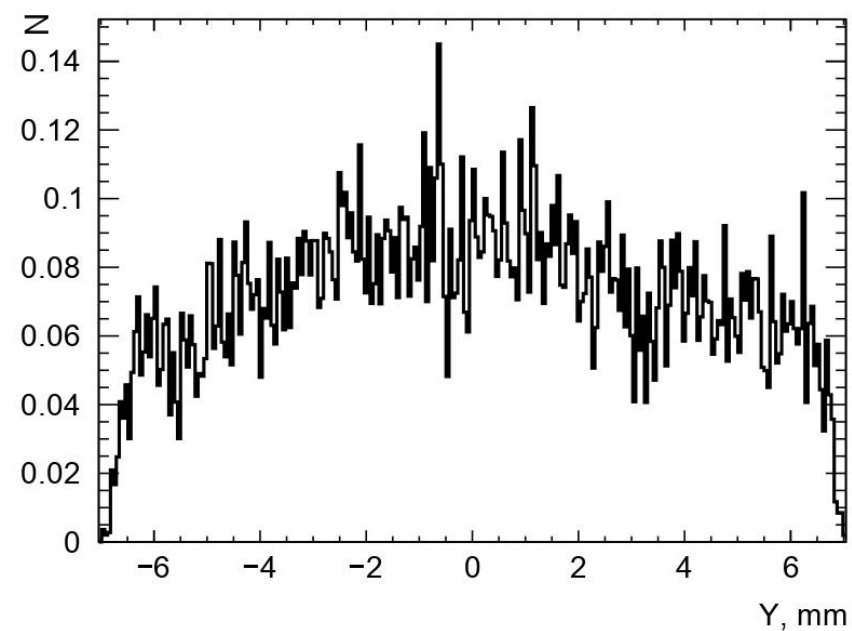
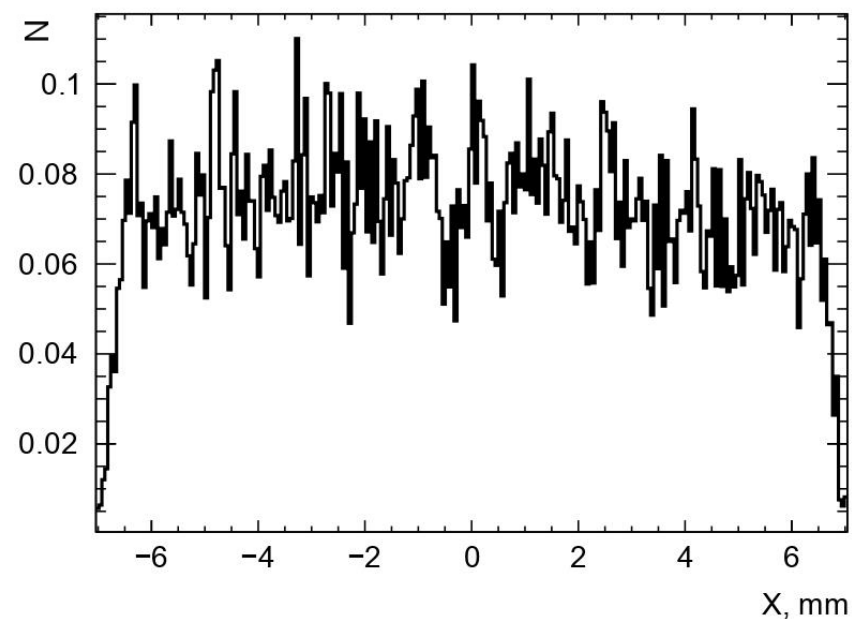
```

(0.001*mm, G4ProductionCuts::GetIndex("gamma"));
(0.001*mm, G4ProductionCuts::GetIndex("e-"));
(0.001*mm, G4ProductionCuts::GetIndex("e+"));
(0.001*mm, G4ProductionCuts::GetIndex("proton"));

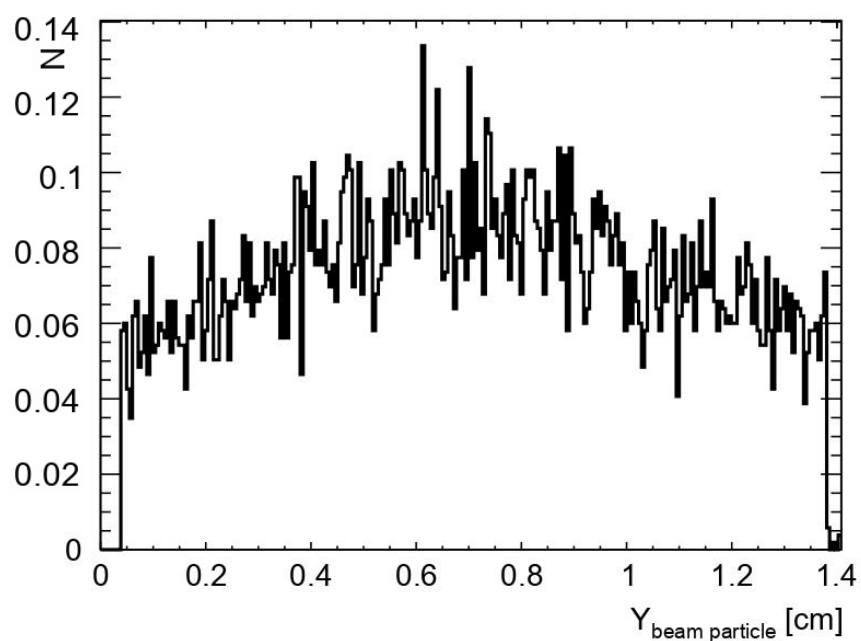
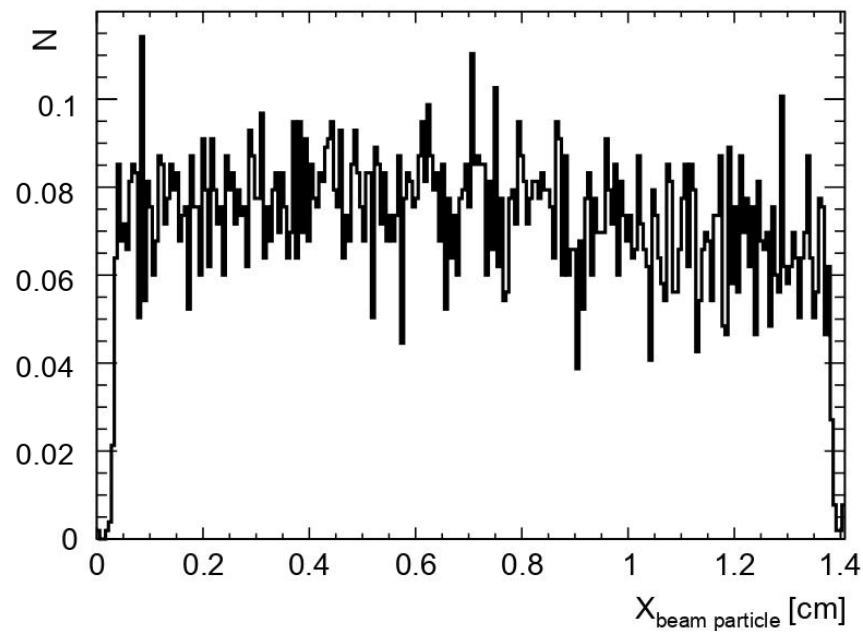
```

Характерные размеры слоя: 50 мкм, а задаваемые пороги на трассировку частиц в G4 (как видно в приведенном выше листинге): 1 мкм, что на порядок меньше толщины слоя.

Смоделированный зарегистрированный профиль пучка



Экспериментальный зарегистрированный профиль пучка



Представляемый в пояснительной записке смоделированный профиль был выполнен с неправильным разбиением данных на отдельные бины. На слайде представлены два профиля: смоделированный и исходный, экспериментальный, с соответствующим разбиением на бины – размеры одного пикселя. По оси X пределы выбраны исходя из размеров сенсора.

Для генерации используется G4ParticleGun.