



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

Отчет:

Моделирование детектора переходного излучения на основе GaAs с помощью пакета Geant4

Студент:

Морозихин Александр Николаевич
Группы М22-115

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.

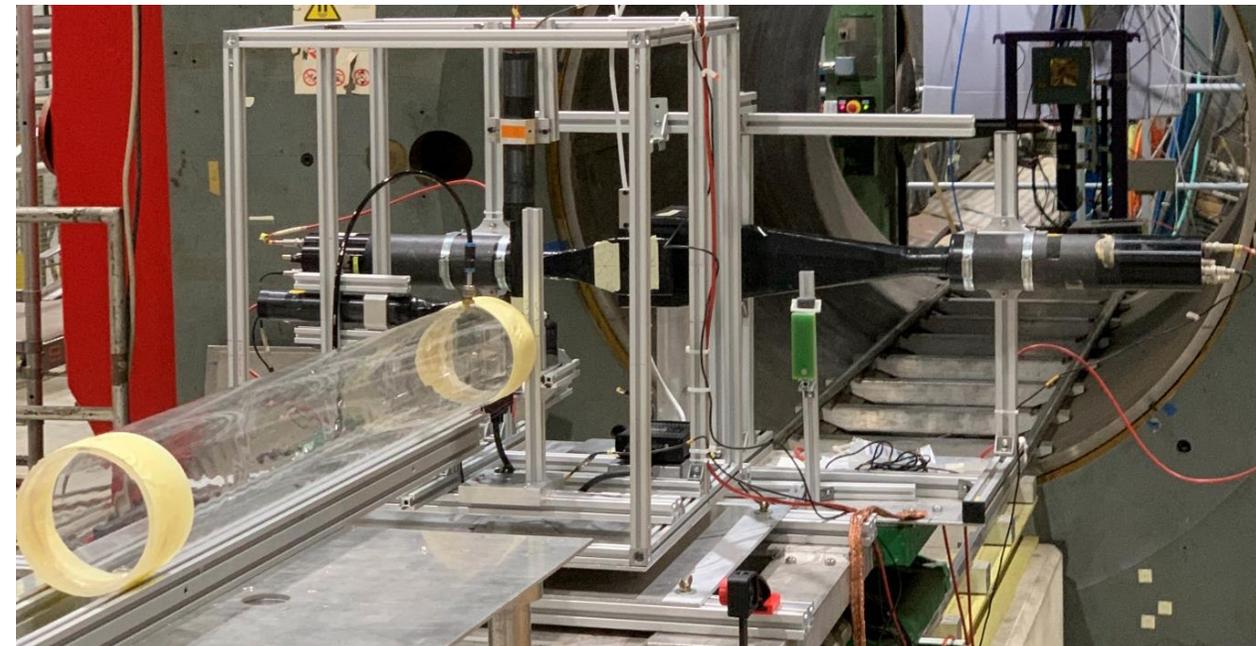
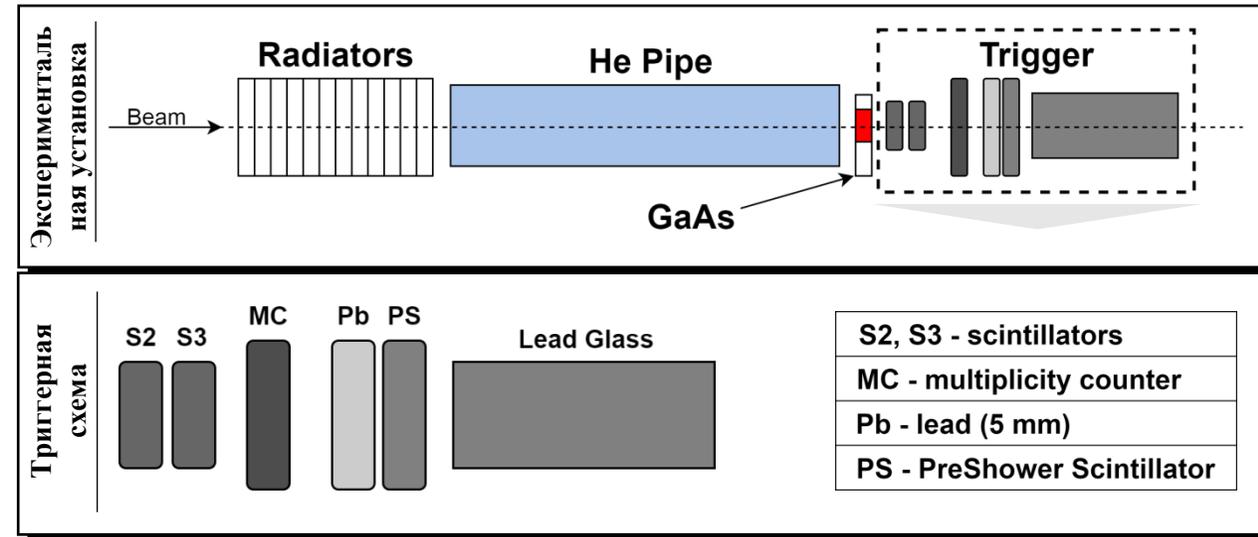
Так в 2021 году в ЦЕРН был проведен эксперимент по изучению процесса разделения электронов и пионов, с использованием данного детектора.

**Дополнительные слайды-1,2*

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



Ход работы

В течении этого семестра решены следующие задачи:

1.Исправление ошибок в работе Geant4:

- Выбор подходящей модели радиаторов, которая лучшим образом будет описывать угловое распределение квантов ПИ для малых углов
- Исправление ошибки генерации квантов переходного излучения в Geant4 (угловое распределение после 2.5 МРад)

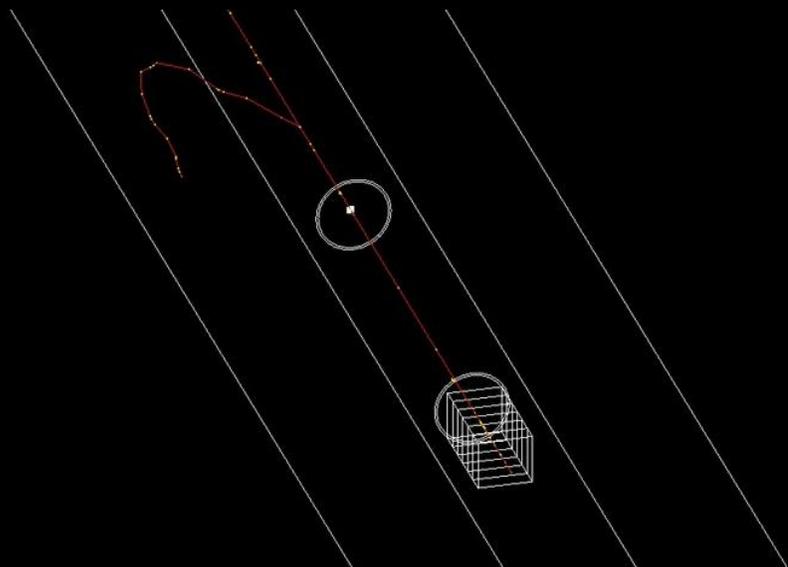
2.Доработка модели:

- Переработка процесса учета зарегистрированных матрицей детектора частиц
- Учет Dummy излучения (в процессе)

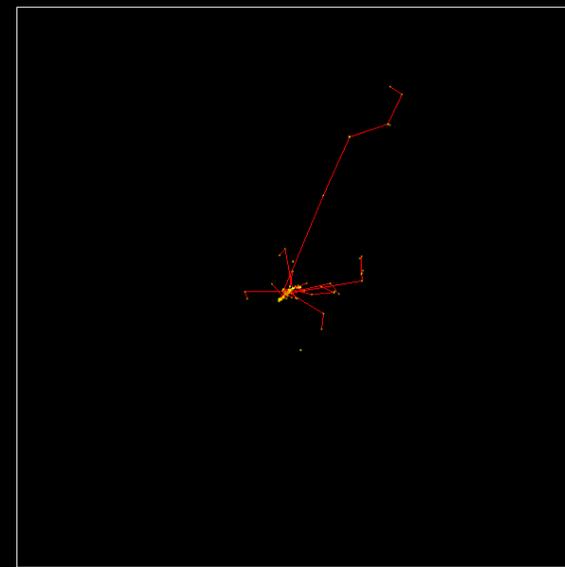
3.Дополнительно:

- Применение методов машинного обучения для моделирования диффузии заряда в детекторе при регистрации квантов ПИ

**Дополнительные слайды-4,5*



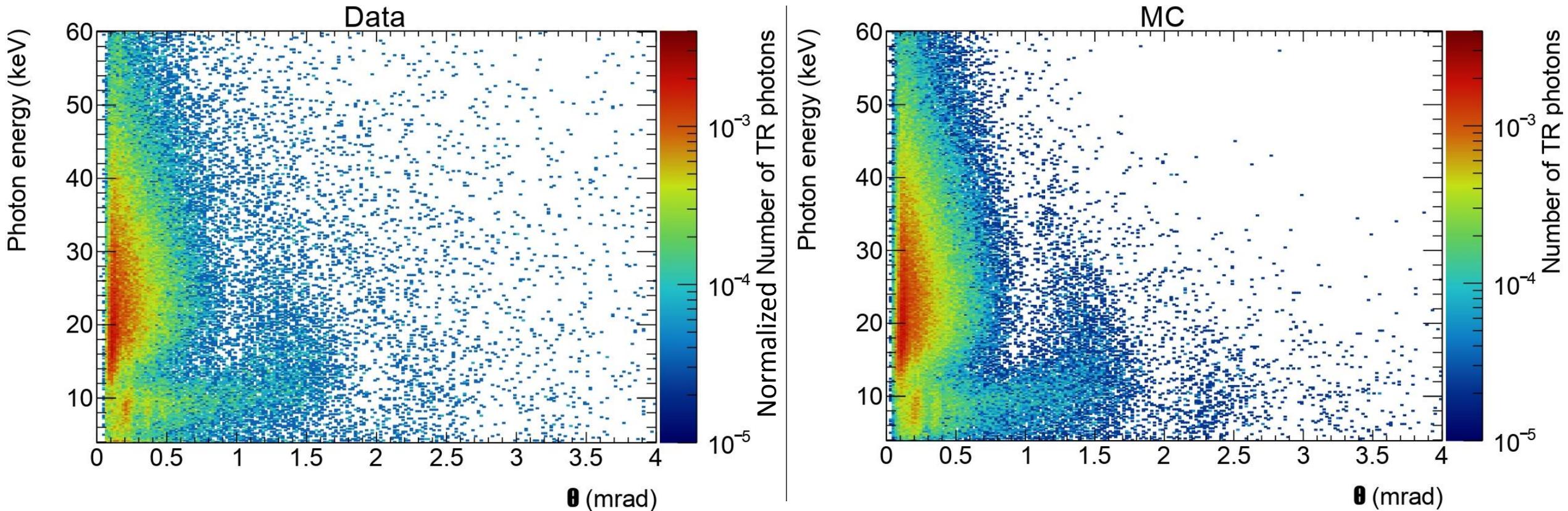
Визуализация геометрии установки описанной в Geant4



Визуализация события в плоскости детектора (треки от электронов)

Двумерное распределение зарегистрированных квантов переходного излучения по энергиям и углам

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

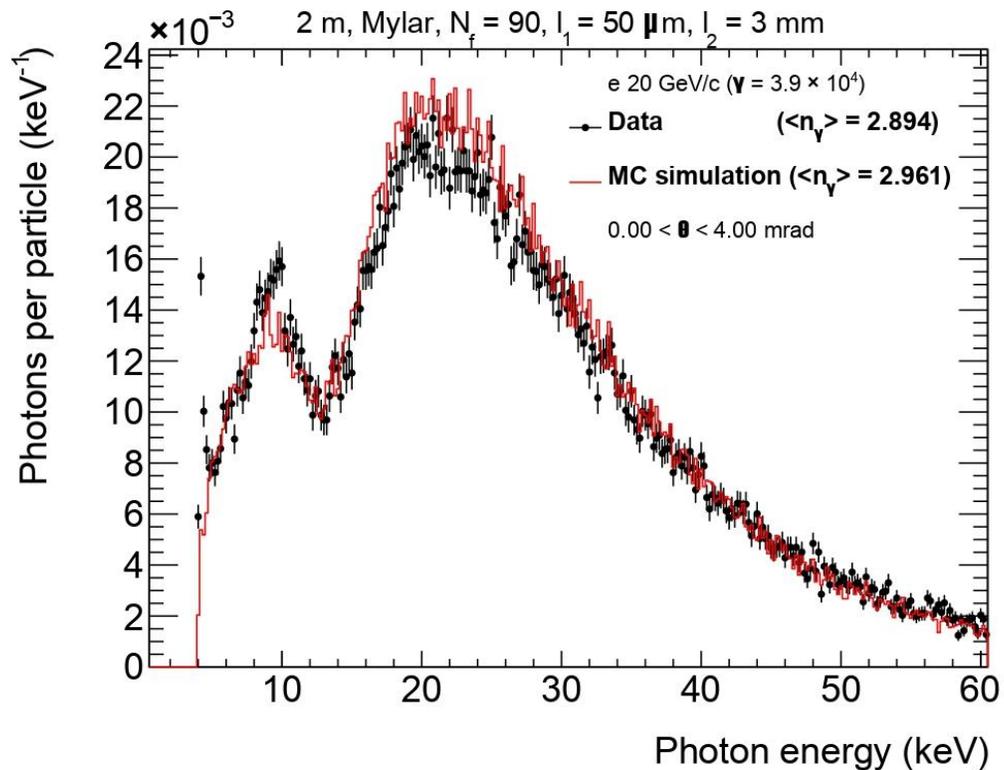


Подбор оптимальной модели описания радиаторов, а также исправление ошибки генерации квантов ПИ значительно улучшило визуальное согласование экспериментальных и моделированных данных.

**Дополнительные слайды-3*

Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения

1

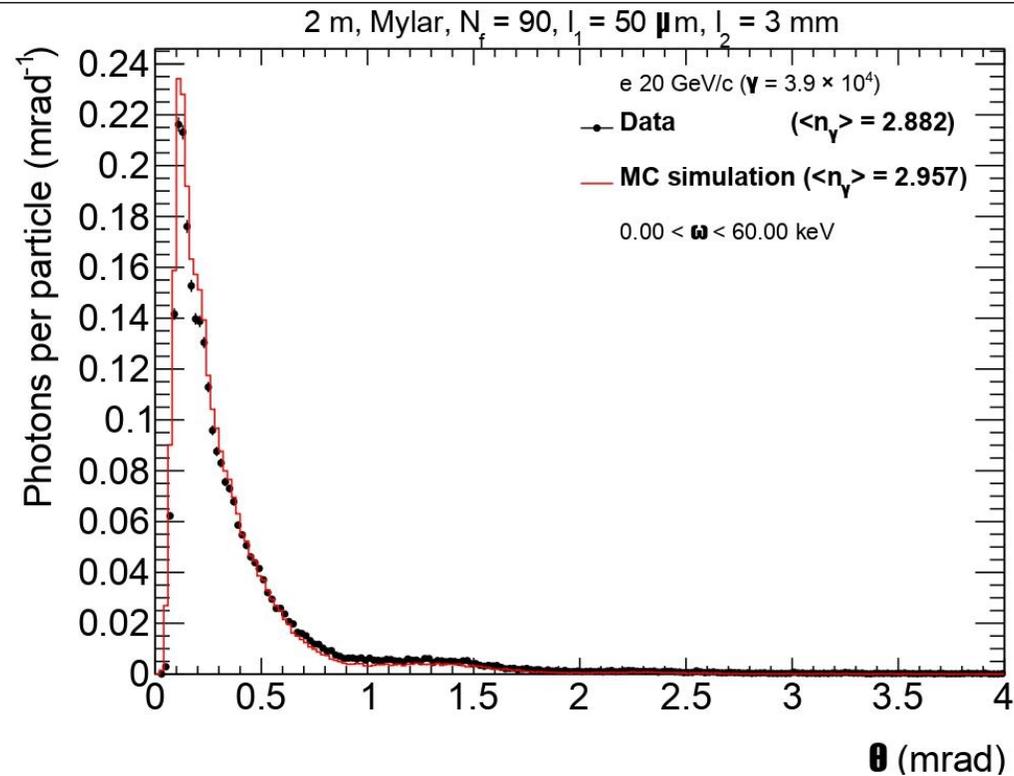


После примененных изменений энергетический спектр достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными по сравнению с результатами прошлого семестра. Также наблюдается недостаток событий в области малых энергий.

*Дополнительные слайды-4,6 (прошлые результаты)
-8 (дополнительные актуальные)

Угловое распределение зарегистрированных квантов переходного излучения

2



Реализованные изменения модели были нацелены на исправление проблемы согласования углового распределения зарегистрированных квантов ПИ, полученного в результате эксперимента, и МК распределения.

*Дополнительные слайды-4,5(прошлые результаты)
-7 (дополнительные актуальные)

Было проведено моделирование с выражением для расчета сигма, полученным из уравнения диффузии:

$$\sigma[\mu m] = 1.3 * \sqrt{\frac{2nk_B d l T}{eU_{bias}}}$$

С использованием языка Python построен примитивный перцептрон для решения задачи регрессии – по входным параметрам **число пикселей в кластере** и **энергия зарегистрированного кванта** восстановить координату Z в объеме детектора, где квант ПИ поглотился.

$$k = \sqrt{\frac{\langle l_{exp} \rangle}{\langle l_{test} \rangle}} = 1.0964$$

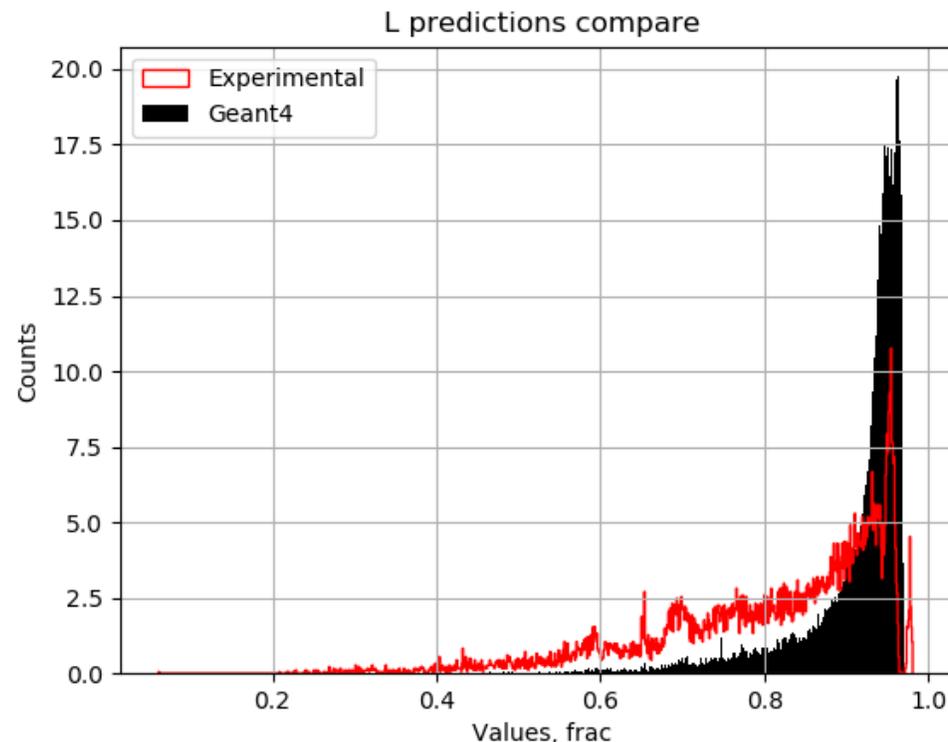
В первом приближении, был рассчитан дополнительный множитель к выражению для сигма диффузии (выражение выше), в результате построения **распределения восстановленных l** для экспериментальных данных и тестовых данных МК. Таким образом:

$$\sigma[\mu m] = 1.425 * \sqrt{\frac{2nk_B d l T}{eU_{bias}}}$$

Коэффициент скорости обучения, число итераций, оптимизатор, число нейронов были выбраны на основе базовых примеров решения задач регрессии в МО.

**Дополнительные слайды-9, 10, 11*

Распределения восстановленных l



Данные	Среднее	Максимум	Минимум
Experimental	0.912	0.996	0.064
Simulation test	0.808	0.981	0.060

На тестовых данных ошибка восстановления l составила порядка 12.1% (60.5 мкм), что для средней глубины поглощения ПИ ~400 мкм в пересчете сигма диффузии ±1 мкм

Заклучение по G4 TestBeam2021 Simulation

Реализовано:

- Исправлена ошибка генерации квантов ПИ в Geant4 связанная с угловым распределением
- Подобрана более удачная модель радиаторов ПИ в Geant4, описывающая сложную структуру углового распределения при малых углах
- Переработан процесс отбора зарегистрированных матрицей детектора частиц
- Произведена оценка коэффициента диффузии в первом приближении с помощью методов машинного обучения

В процессе:

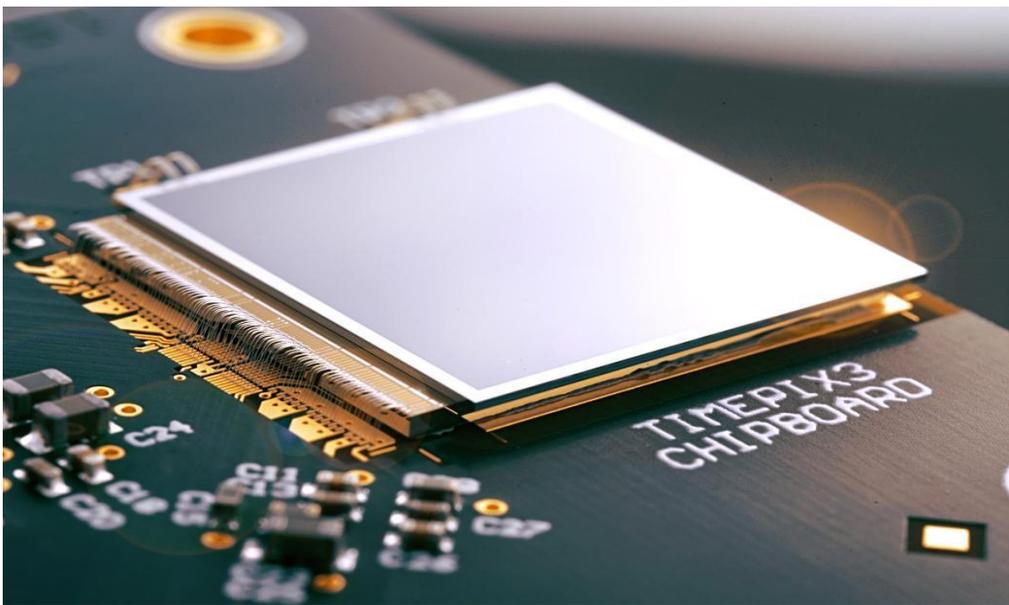
- Учет Dummy излучения
- Кросс-ток

В течении этого семестра была проведена работа по доработке модели. Исправлены как внутренние ошибки программного пакета Geant4, так и произведена модернизация уже описанных алгоритмов. Также была проведена инициативная работа по оценке коэффициента диффузии с помощью алгоритмов машинного обучения.

На следующий семестр запланирована реализация учета Dummy излучения, кросс тока, а также пересмотр результатов полученных при оценке коэффициента диффузии с помощью машинного обучения.



Пиксельный детектор



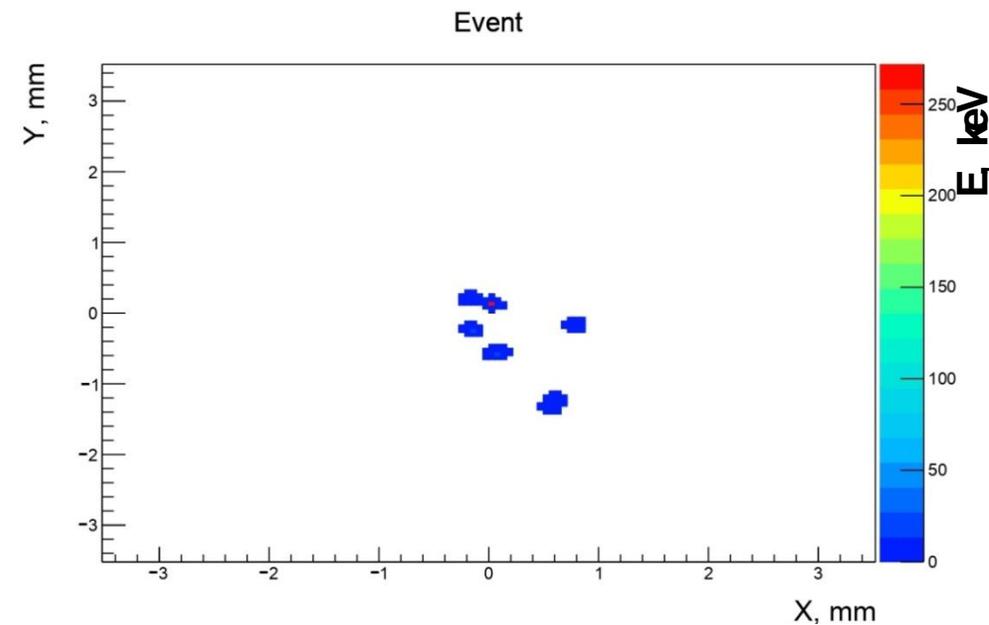
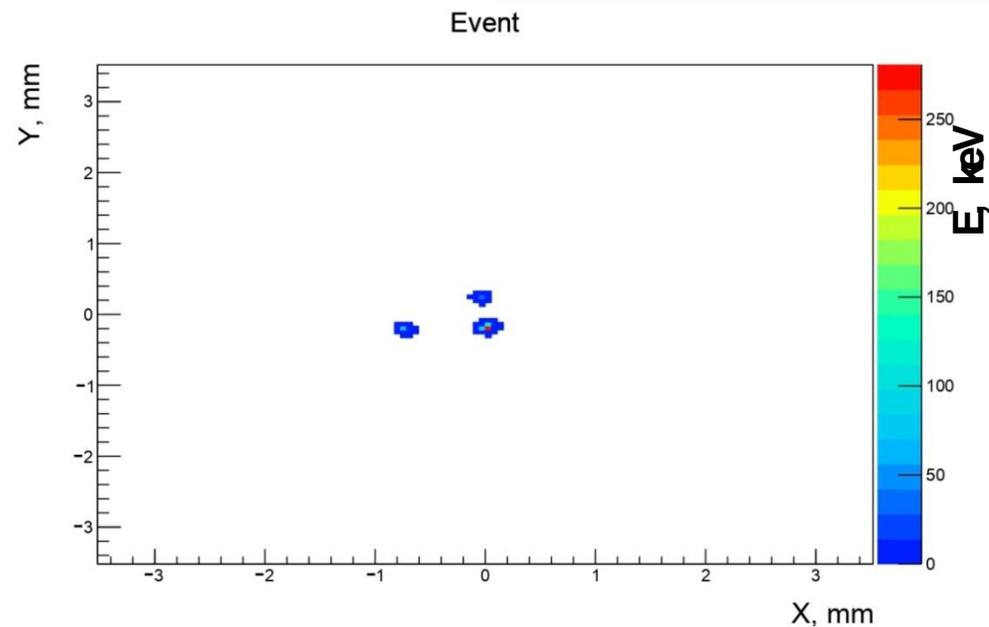
На снимке изображен пиксельный полупроводниковый сенсор, подключенный к считывающей плате компании Medipix. Данный детектор состоит из 65536 пикселей, с каждого из которых, в случае регистрации частицы, поступает сигнал. **В рамках данного эксперимента детектор позволяет:**

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

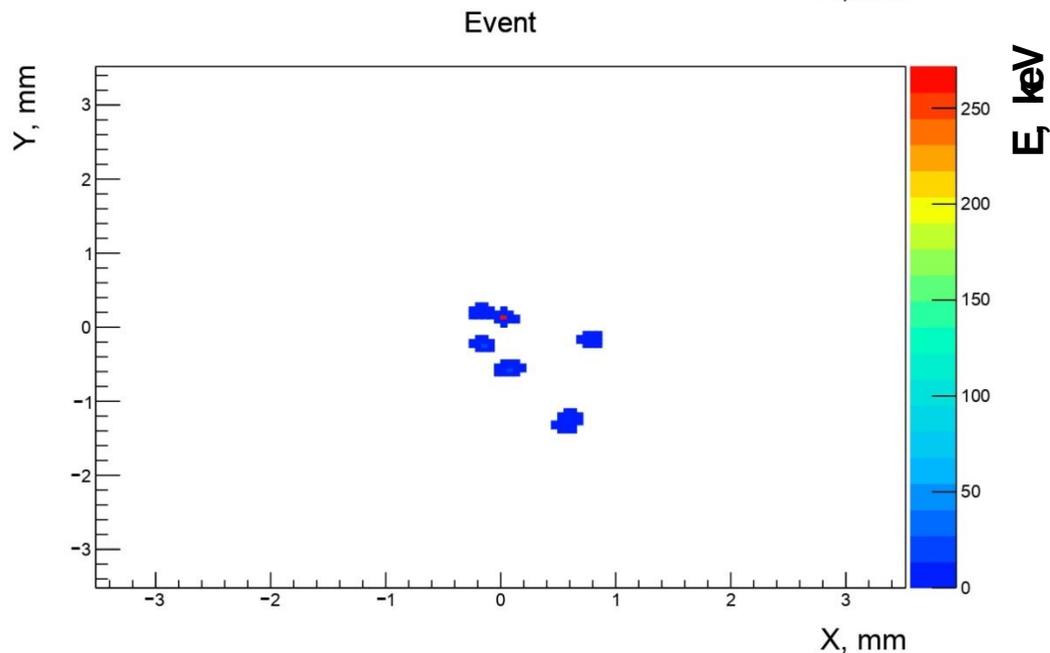
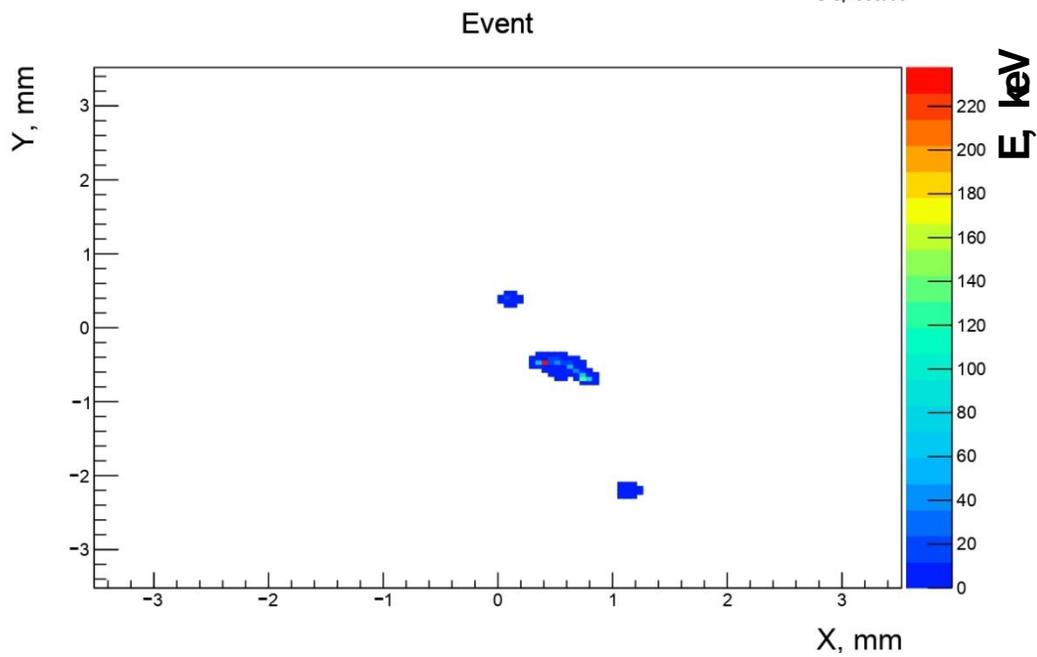
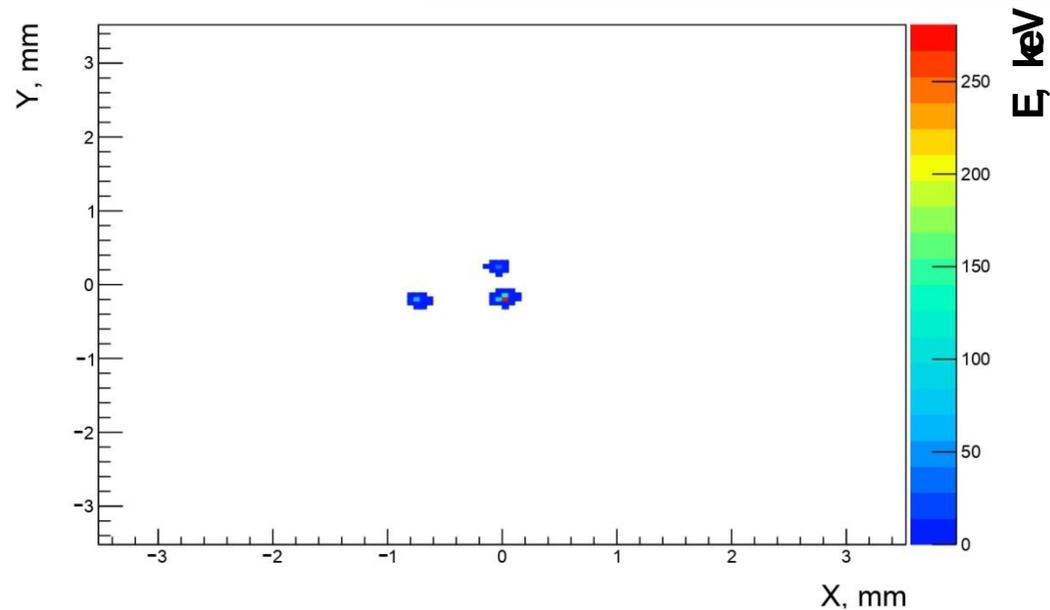
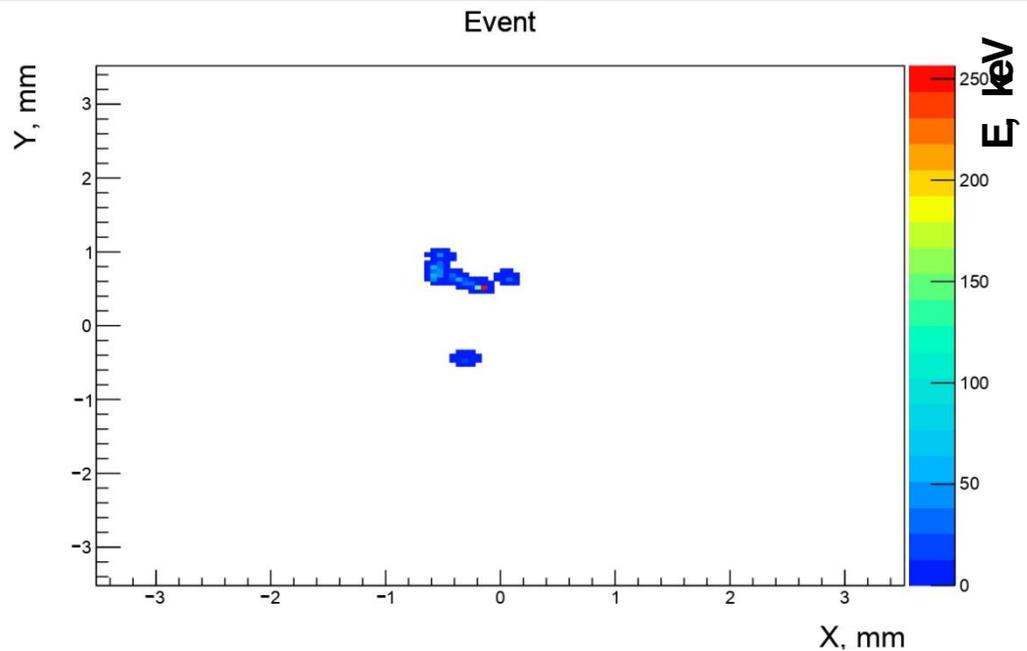
*Дополнительные слайды-1

Визуализация события (МК)

$[e^- 20\text{GeV}: \text{Mylar } 90 \text{ layers}: 2\text{m He pipe}]$

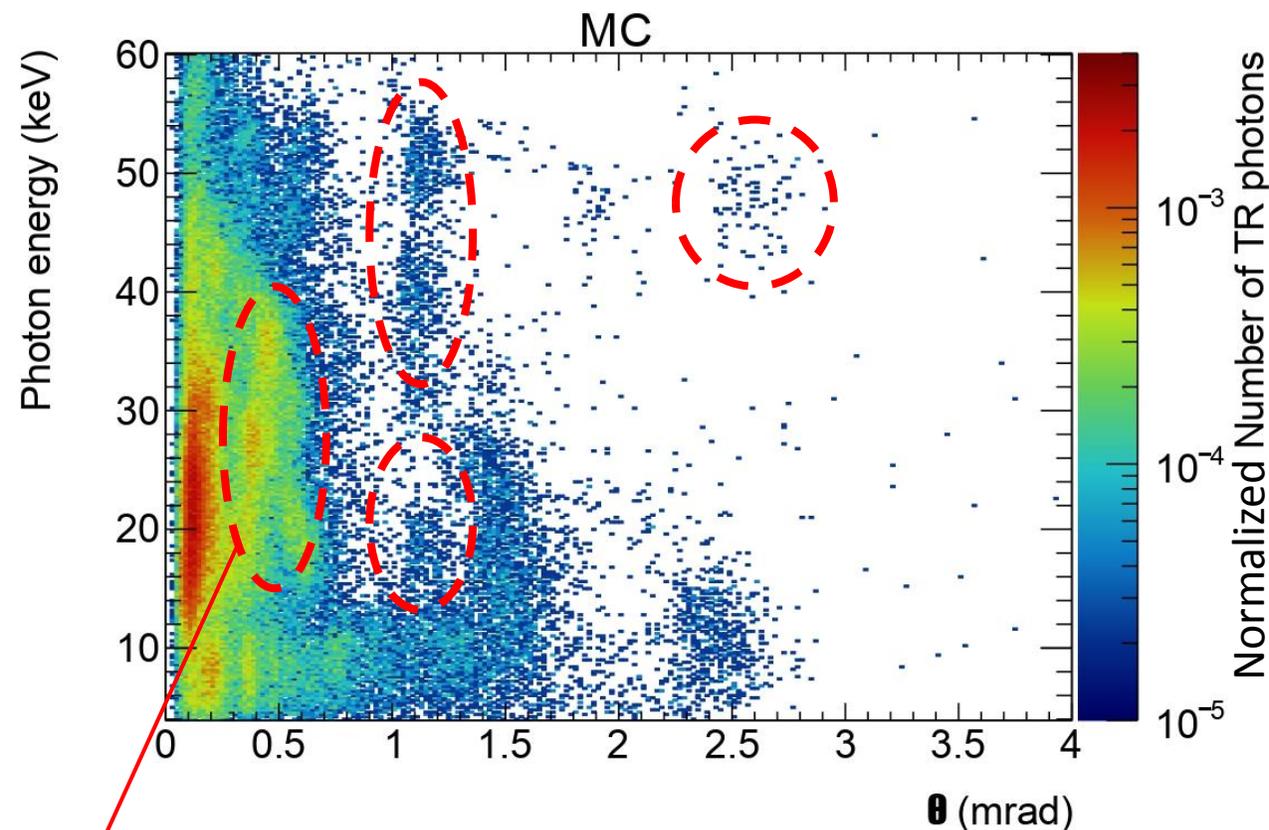
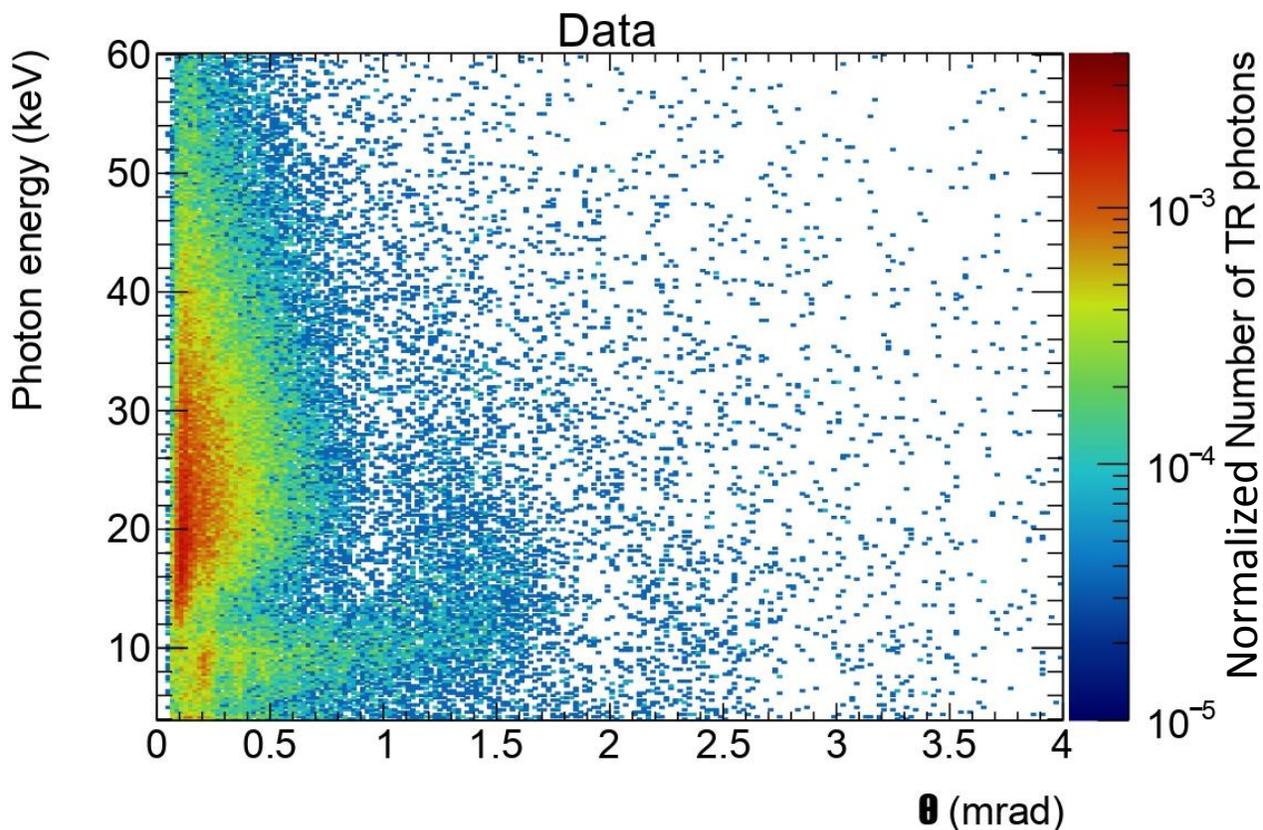


Визуализация событий (МК)

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

Двумерное распределение зарегистрированных квантов переходного излучения по энергиям и угла

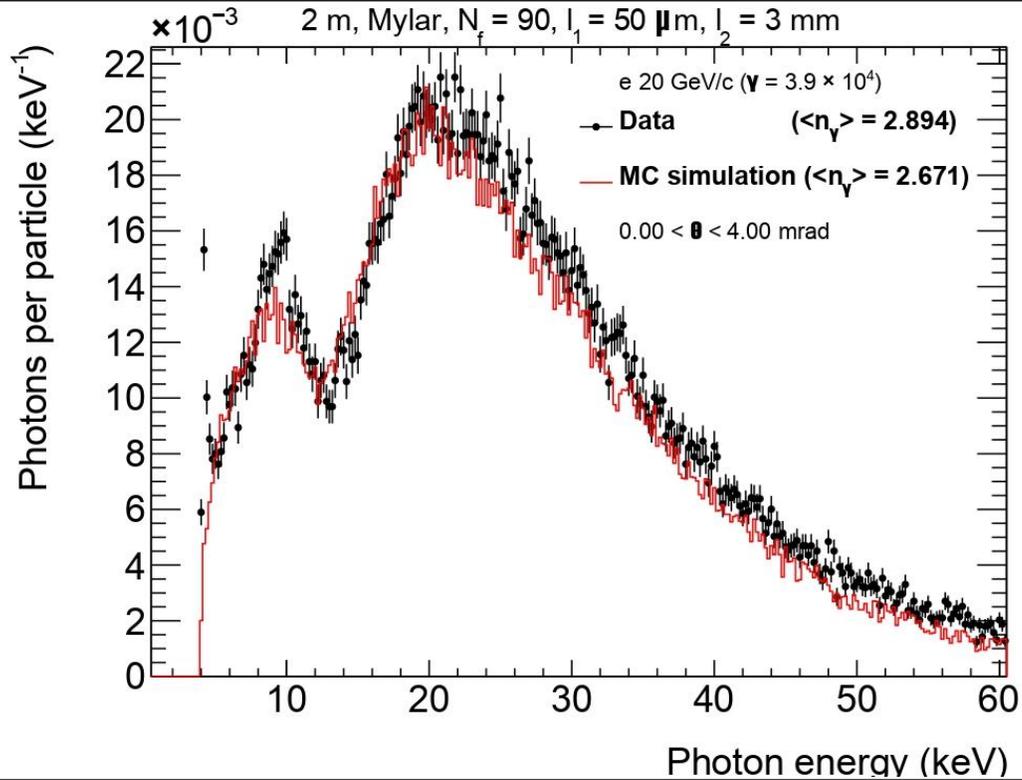
$[e^- 20\text{GeV}; \text{Mylar } 90 \text{ layers}; 2\text{m He pipe}]$



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

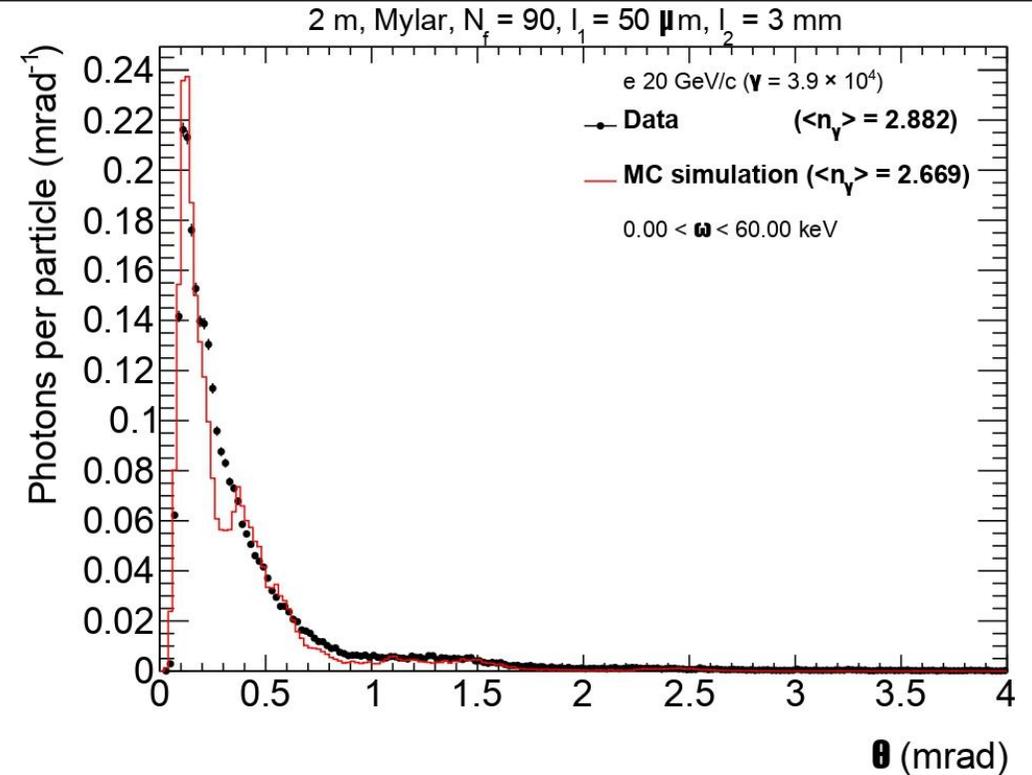


Энергетический спектр достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными с точностью до энергетических калибровок, которые будут проведены после исправления расхождений связанных с угловым распределением

*Дополнительные слайды-2,3

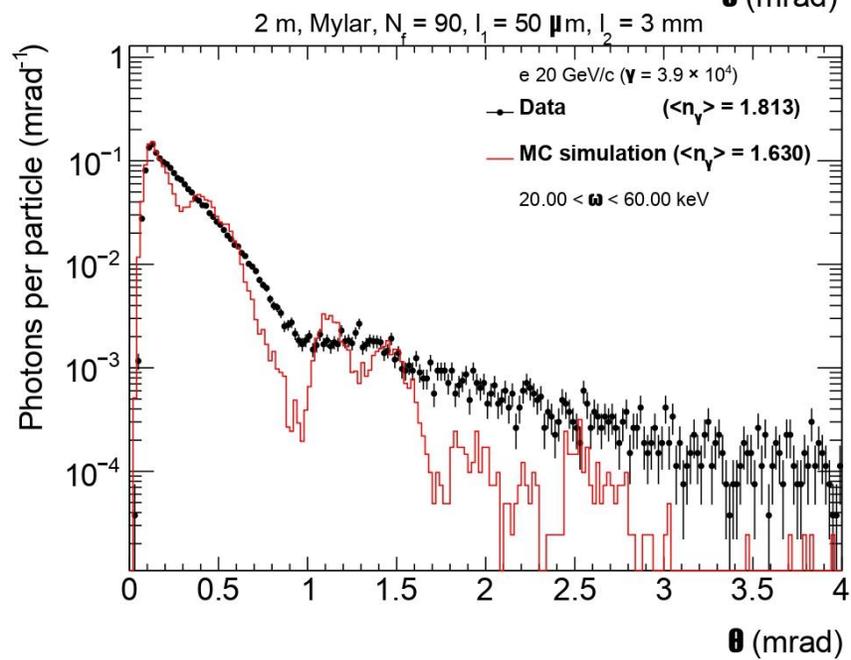
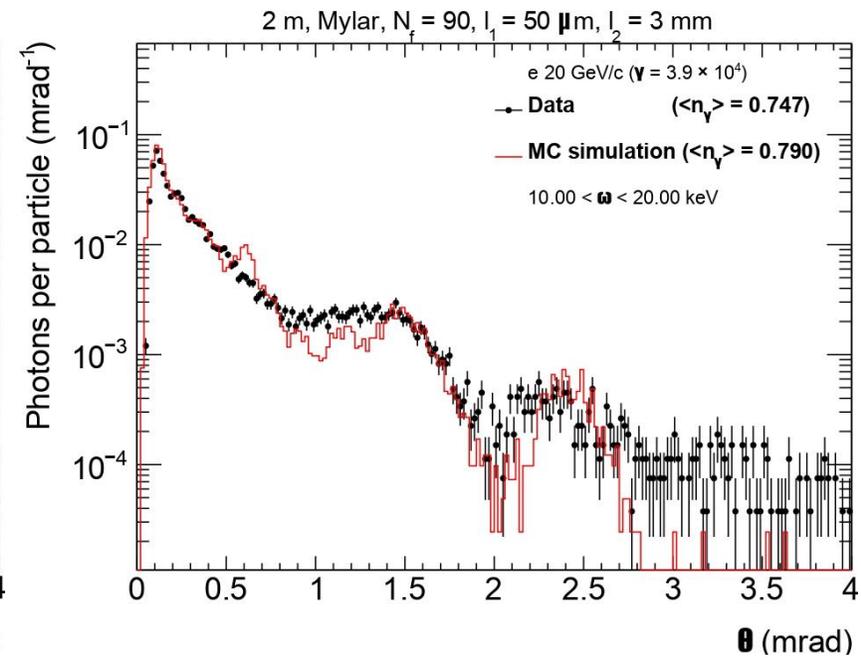
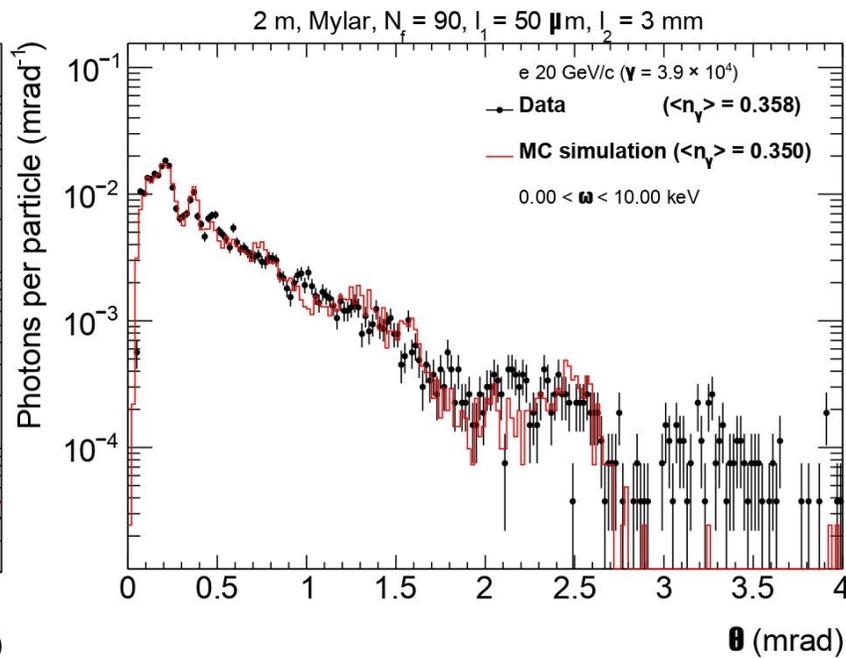
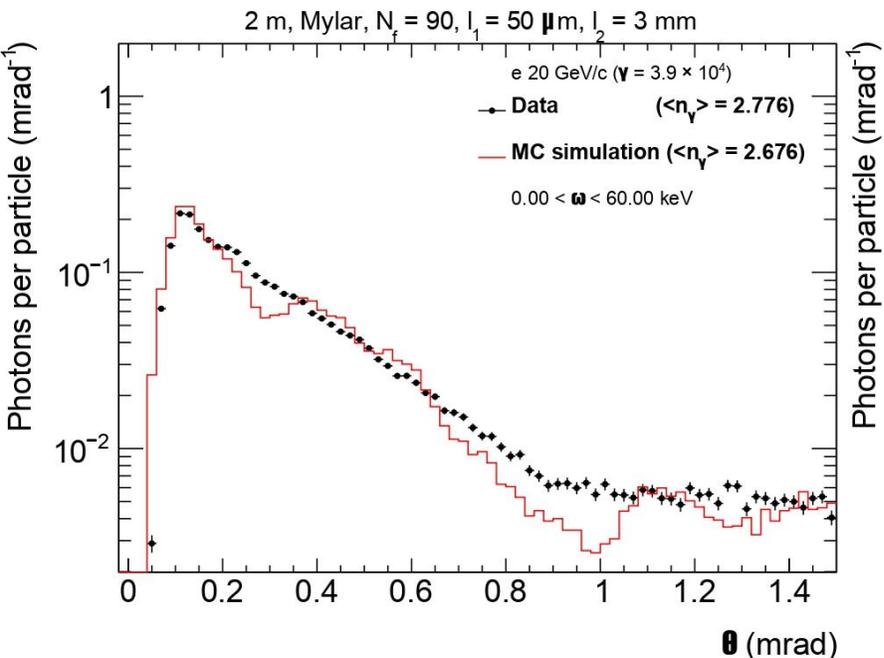
Угловое распределение зарегистрированных квантов переходного излучения

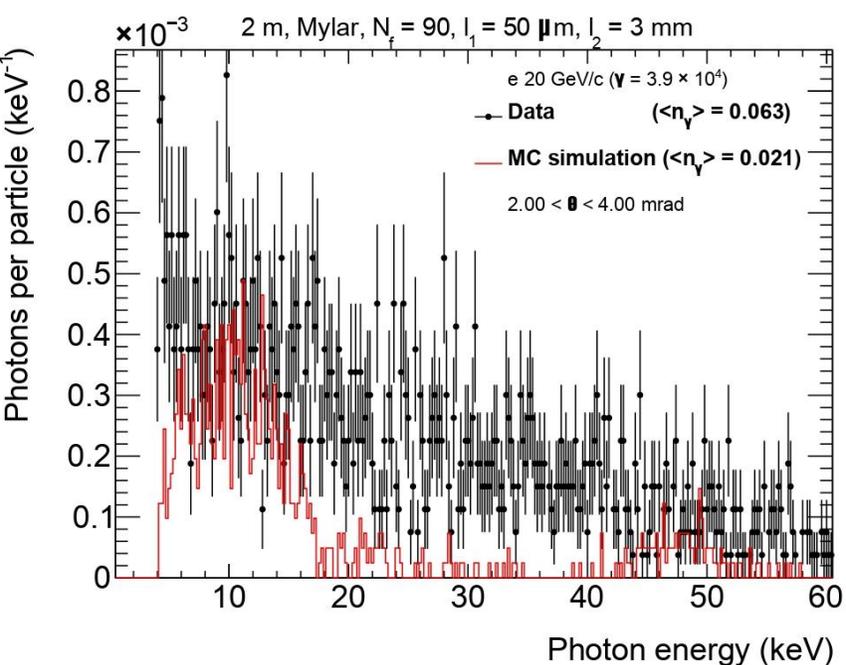
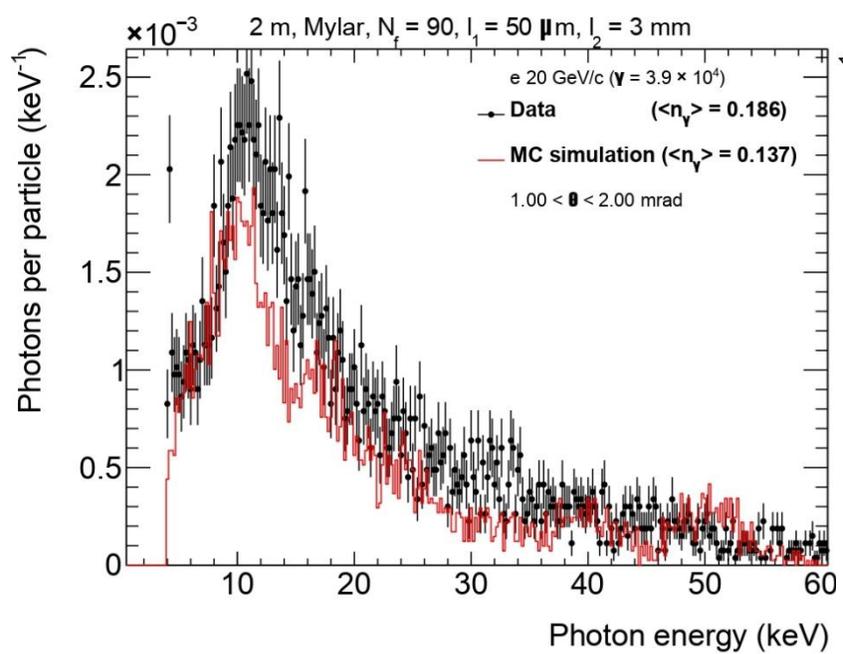
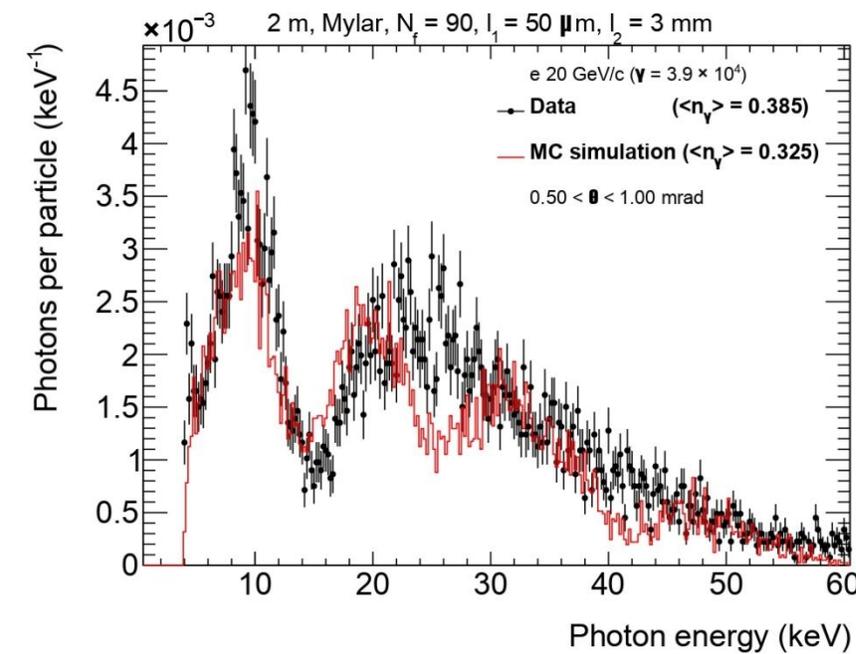
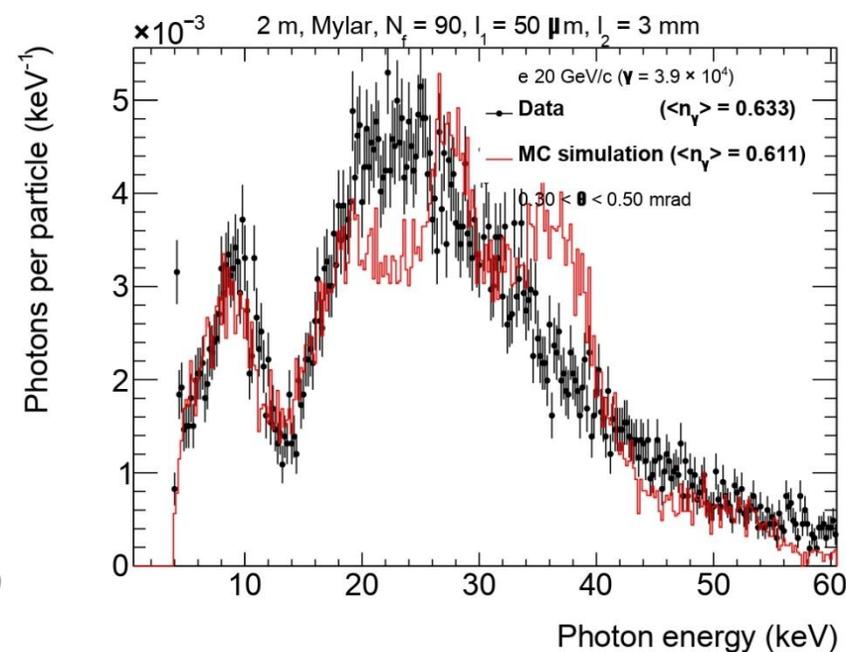
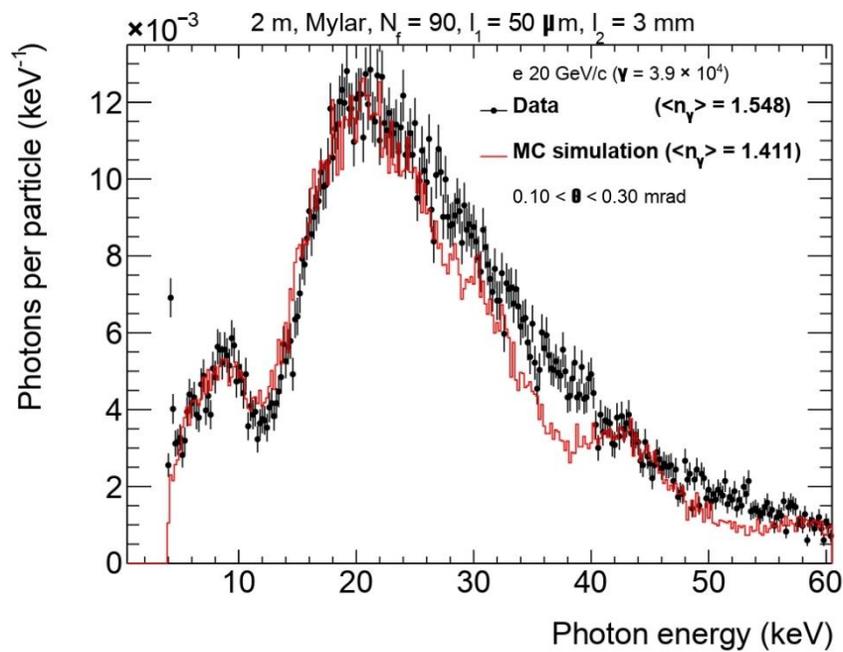
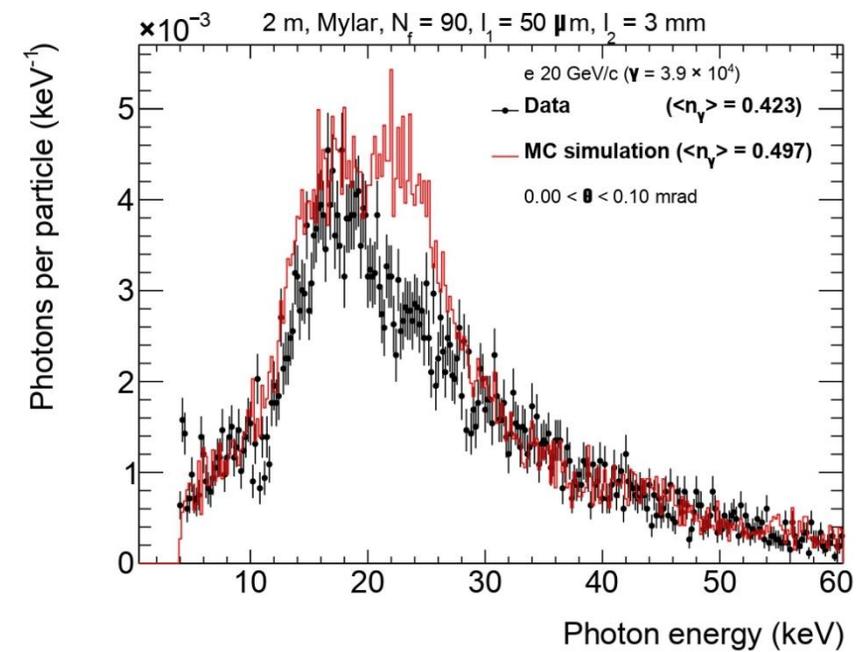
2

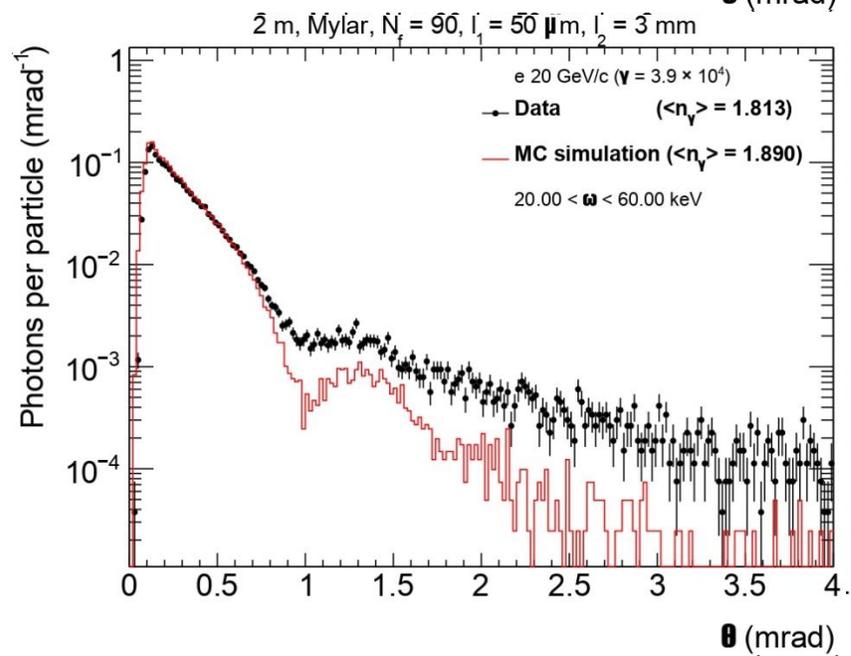
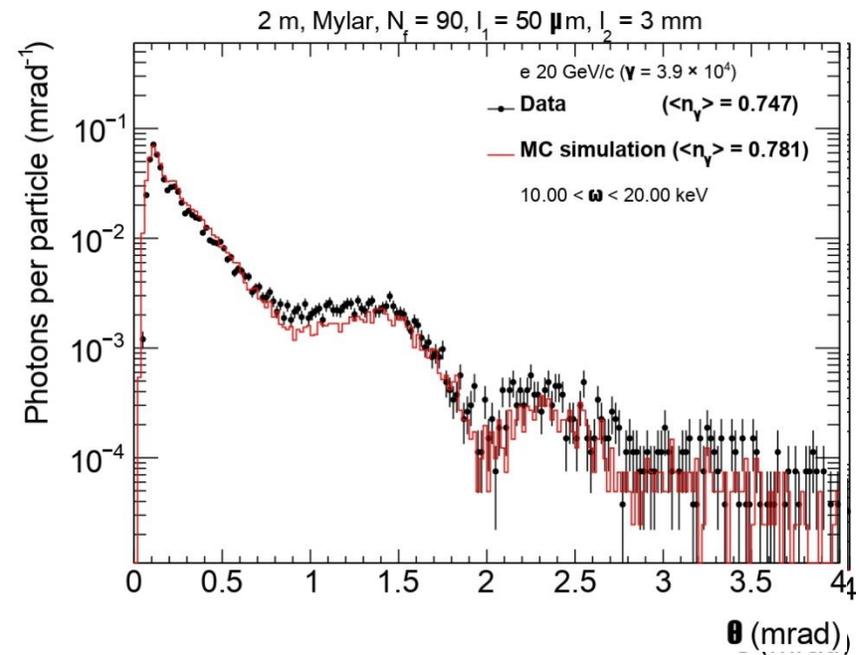
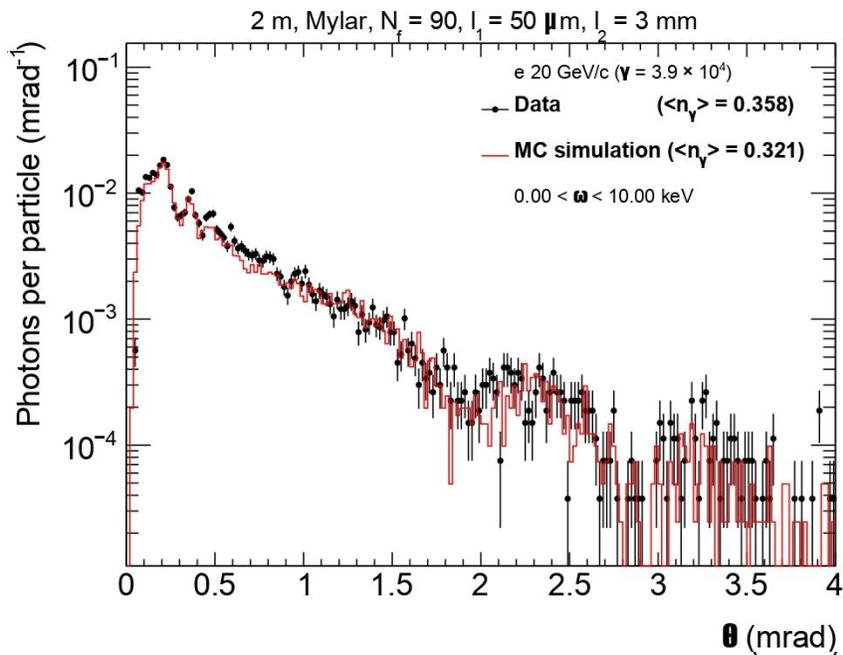
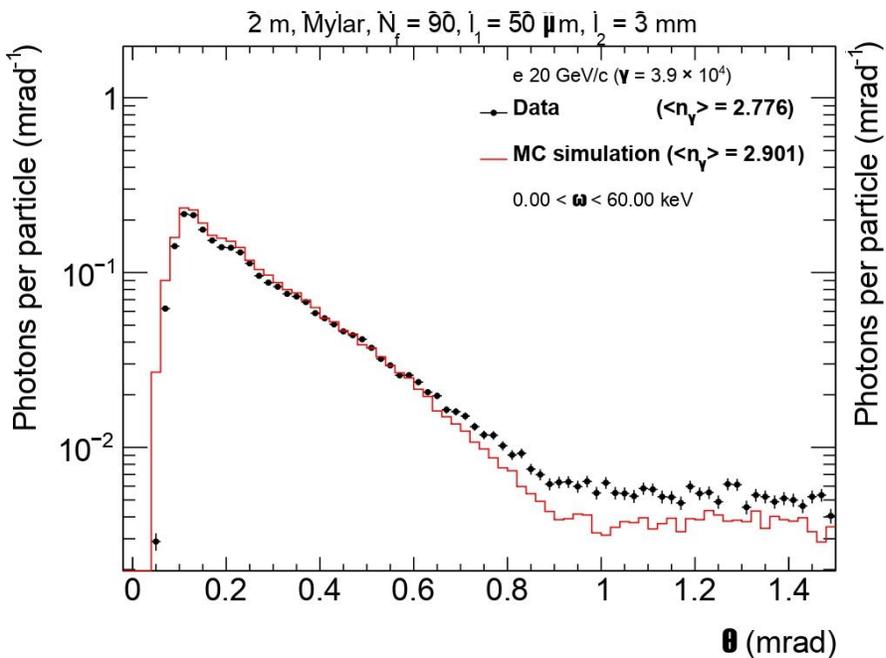


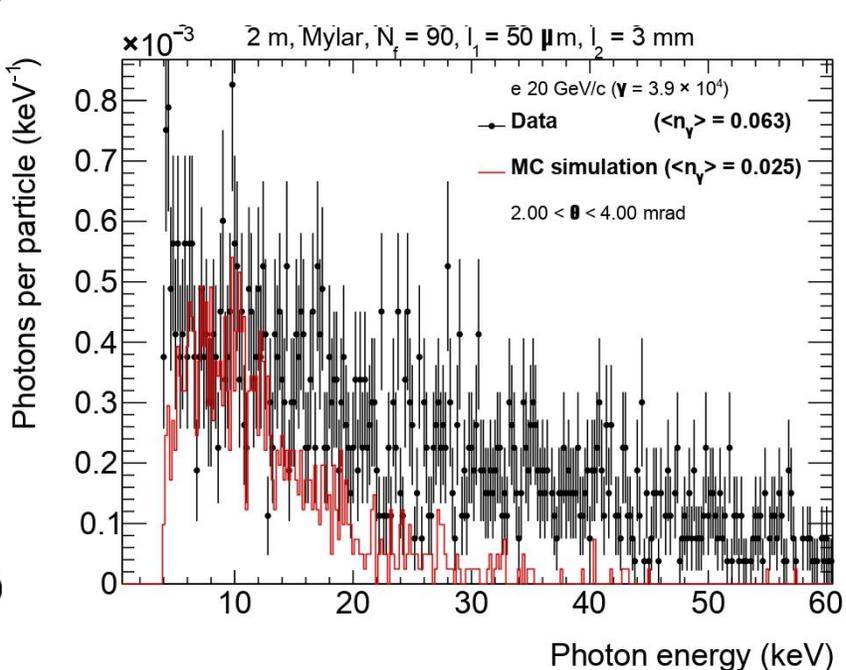
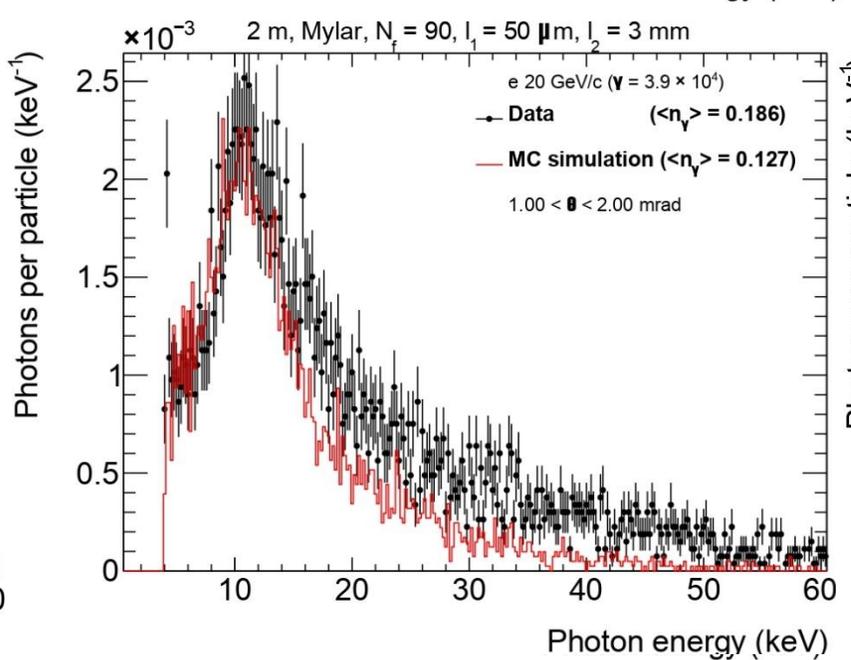
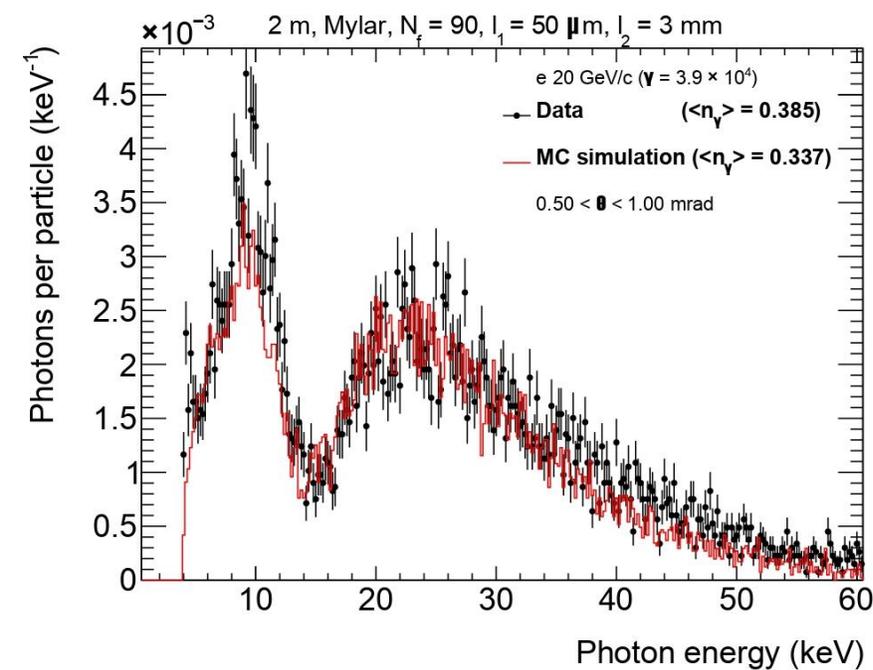
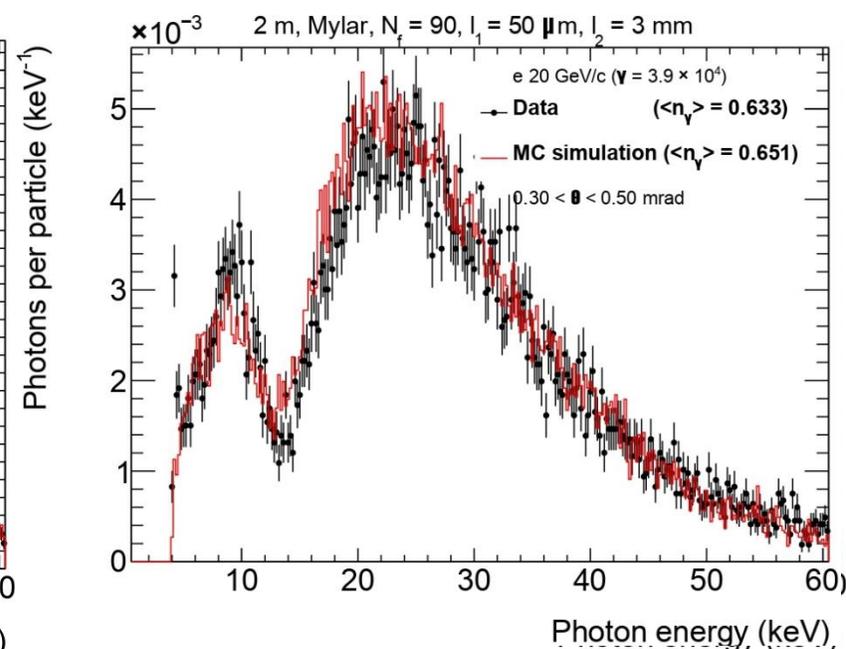
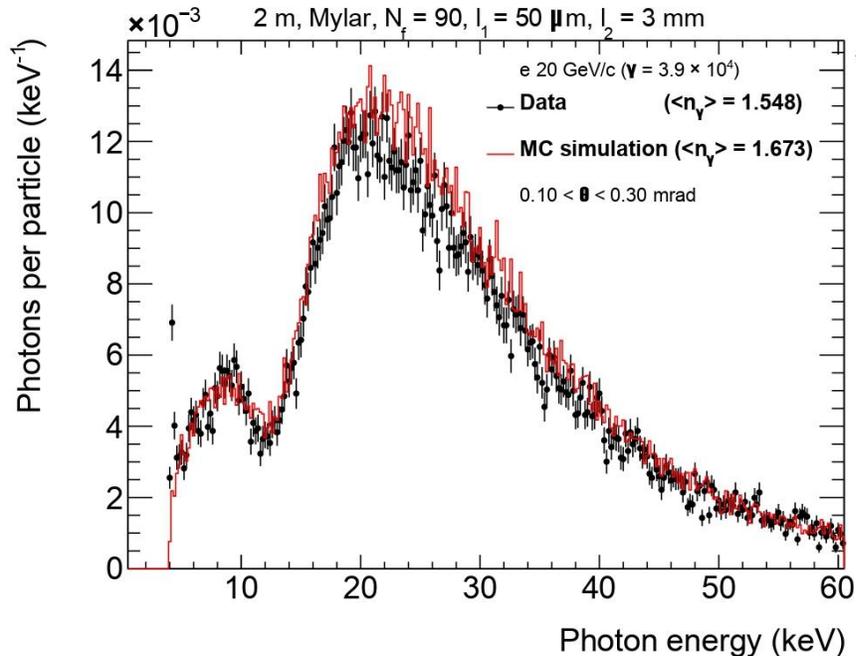
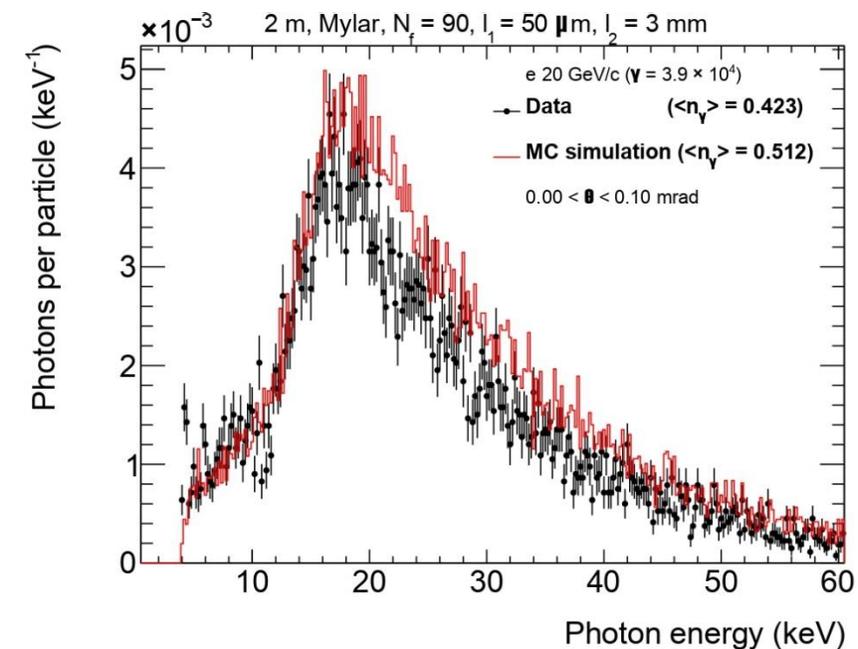
В частности, для углового распределения, в области **0.5 мрад** хорошо виден **второй пик** распределения, который из-за эффекта диффузии заряда в детекторе **должен размываться**, что видно из экспериментальных данных. Тестовые проверки по изучению такого рода расхождений представлены в дополнительных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

*Дополнительные слайды-4,5,6









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.

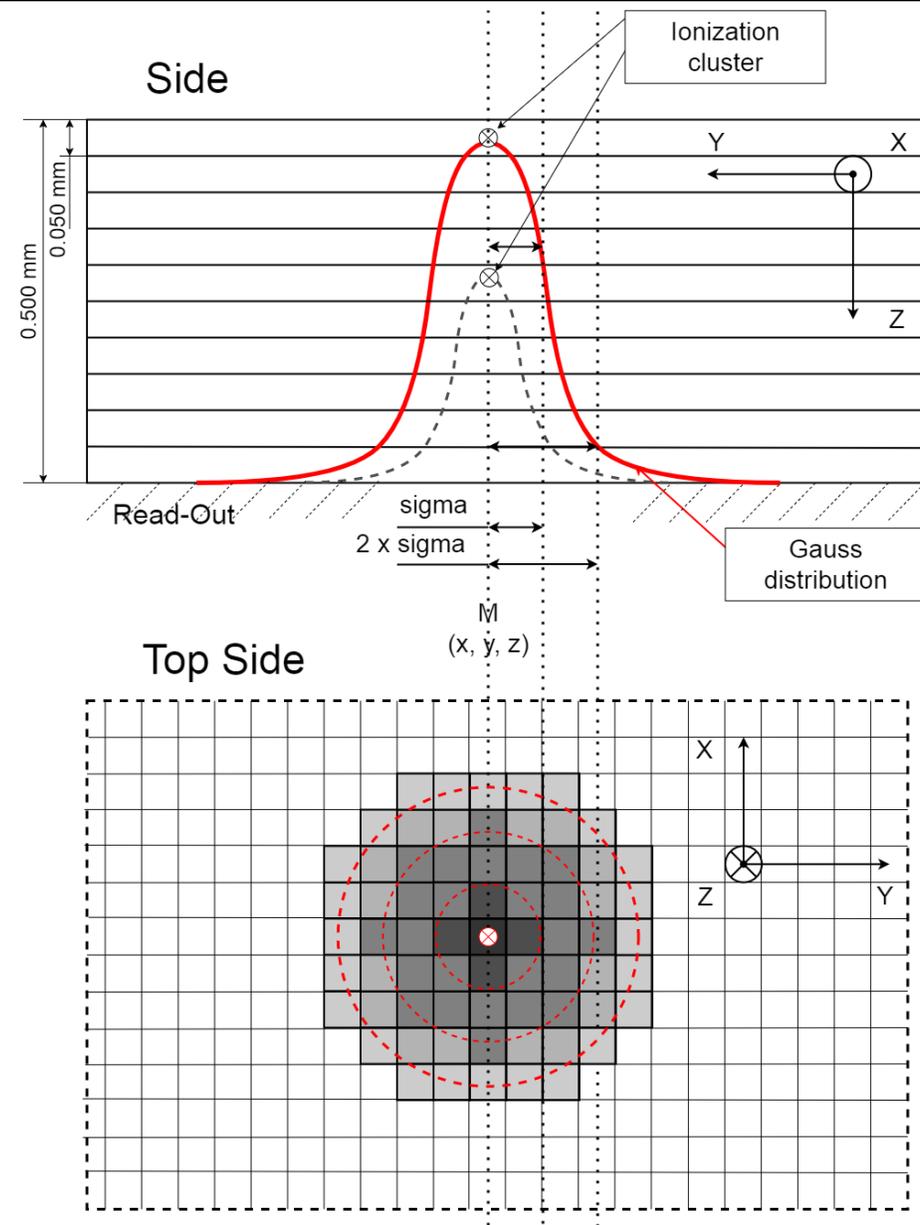
Выражение для сигма диффузии

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

- 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).

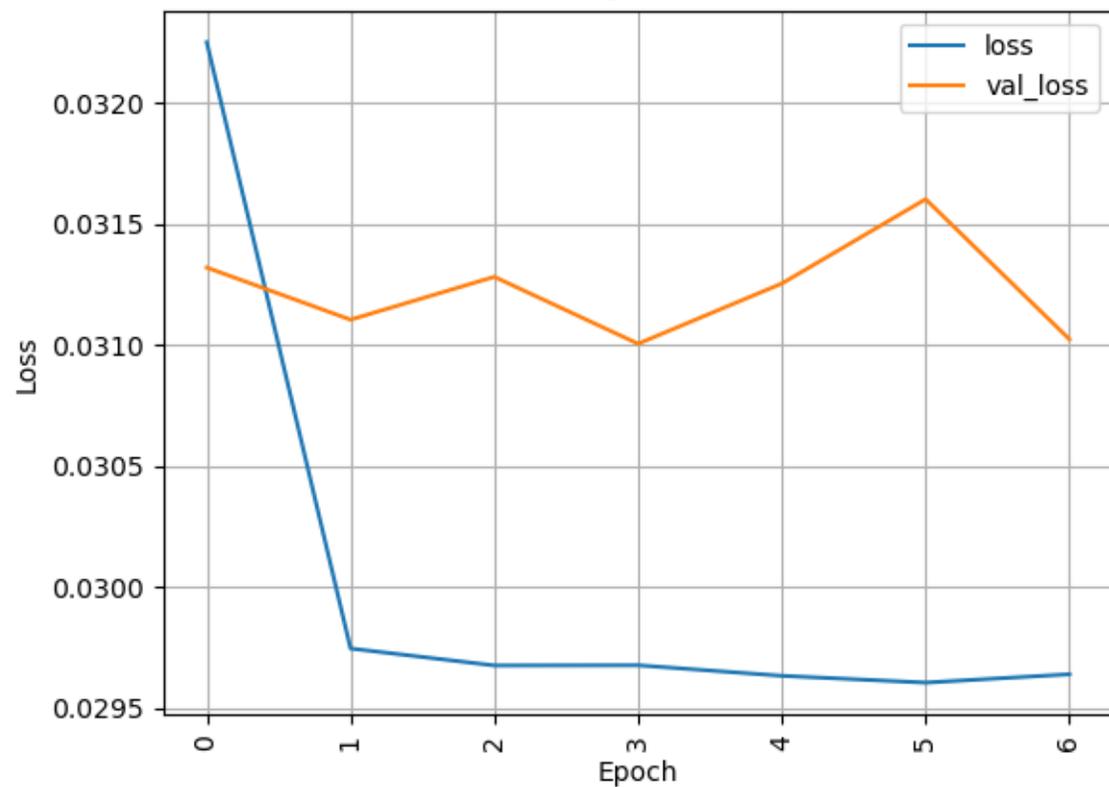
Визуальное представление диффузии



Функция потерь на этапе обучения

1

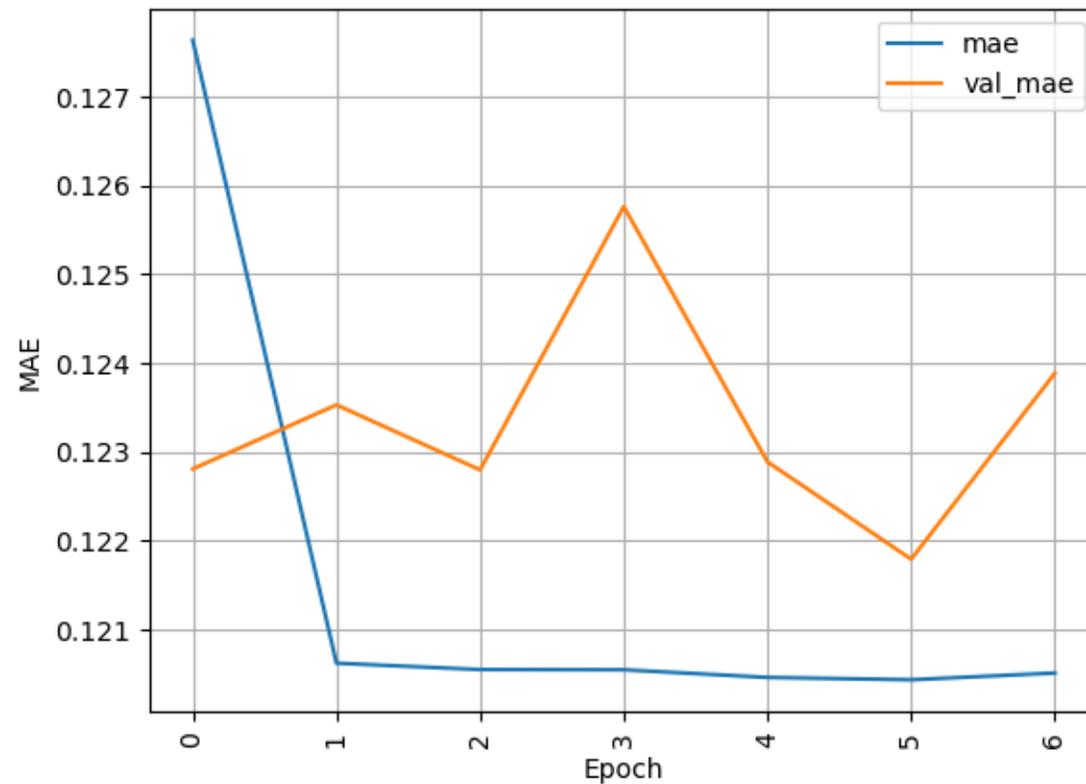
Model regression loss



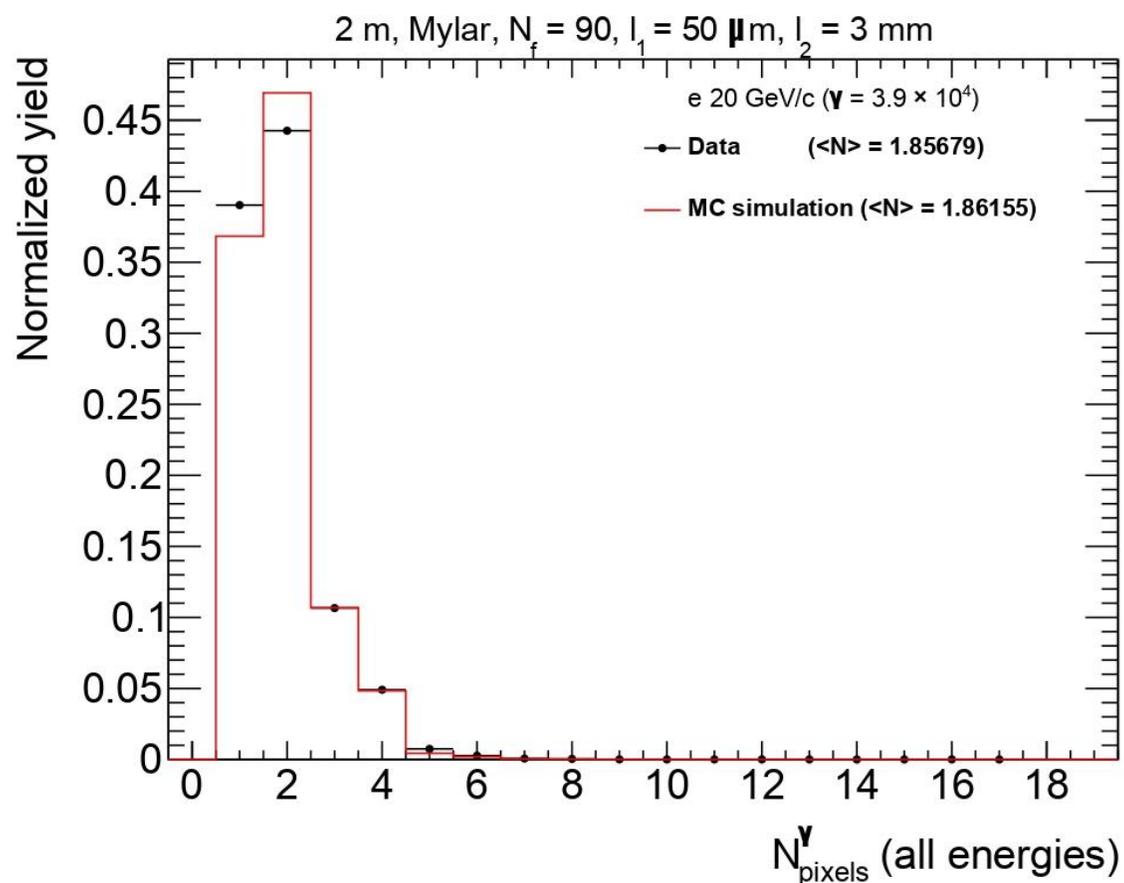
Значение MAE на этапе обучения

2

Model regression MAE

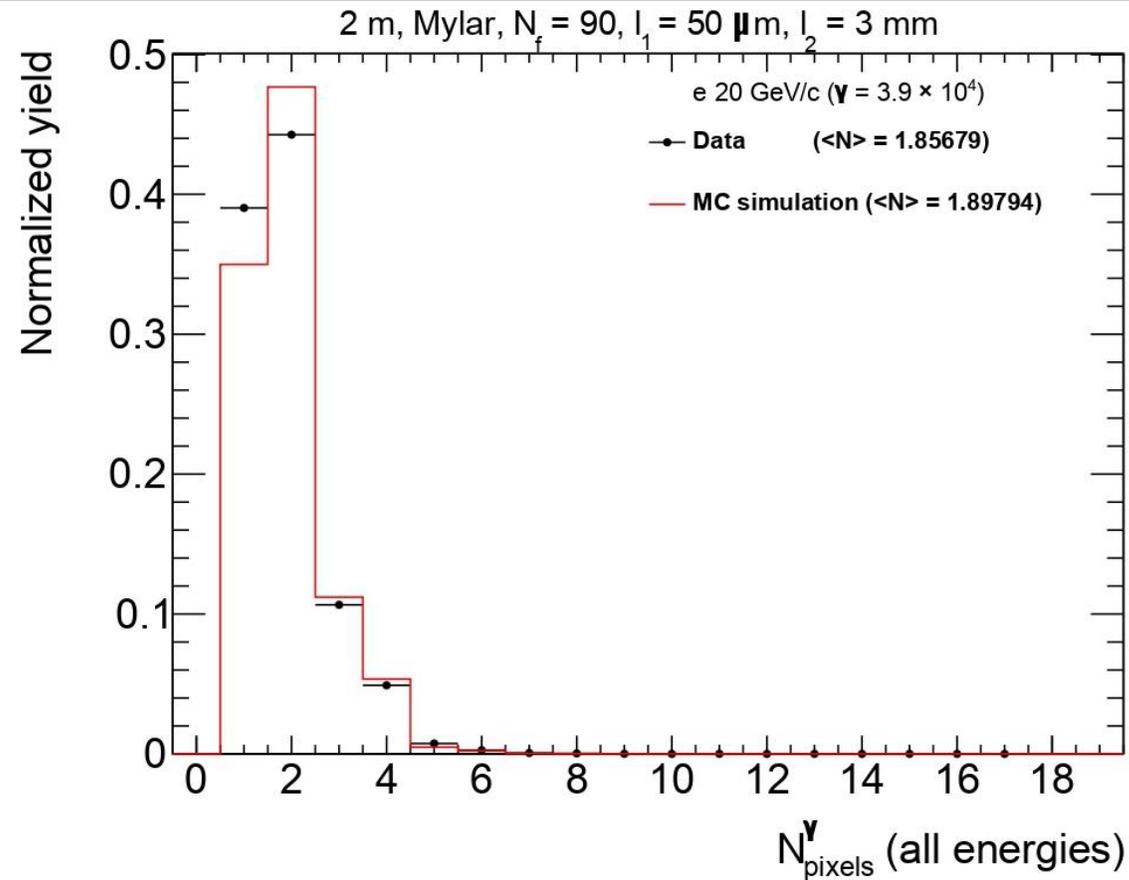


Количество пикселей в кластере регистрации ПИ (измеренная формула) 1



$$\sigma [\mu\text{m}] = 0.024 * l + 2\mu\text{m}$$

Количество пикселей в кластере регистрации ПИ (мат. Формула * коэффициент диффузии МО) 2



$$\sigma [\mu\text{m}] = 1.425 * \sqrt{\frac{2nk_B d l T}{e U_{\text{bias}}}}$$