

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

УДК 539.120.71

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ 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

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
1 Эксперимент Test Beam 2021	4
1.1 Цель эксперимента. Его задачи	4
1.2 Конфигурация эксперимента	5
1.3 Наборы экспериментальных данных	6
2 Полупроводниковые детекторы	8
2.1 Полупроводники. GaAs и его преимущества	8
3 Практическая часть	10
3.1 Формулировка задач	10
3.2 Представление результатов результатов моделирования	11
3.3 Диффузия заряда в полупроводниковом детекторе	14
3.4 Машинное обучение и коэффициент диффузии	16
4 Заключение	19
Приложение А	22
Приложение Б	25
Приложение В	29
Приложение Г	32

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.

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

Основные задачи на этот семестр:

- исправить внутреннюю ошибку Geant4 при генерации квантов ПИ
- переопределить алгоритм отбора регистрируемых частиц при моделировании
- ввести в моделирование Dummy излучение

Дополнительной задачей является :

- оценка коэффициента диффузии заряда в детекторе с помощью методов машинного обучения

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 энерговыделению регистрируемого излучения и количеству регистрируемых квантов переходного излучения, но и по новому критерию: угловое распределение регистрируемых квантов переходного излучения, которое на прямую 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.

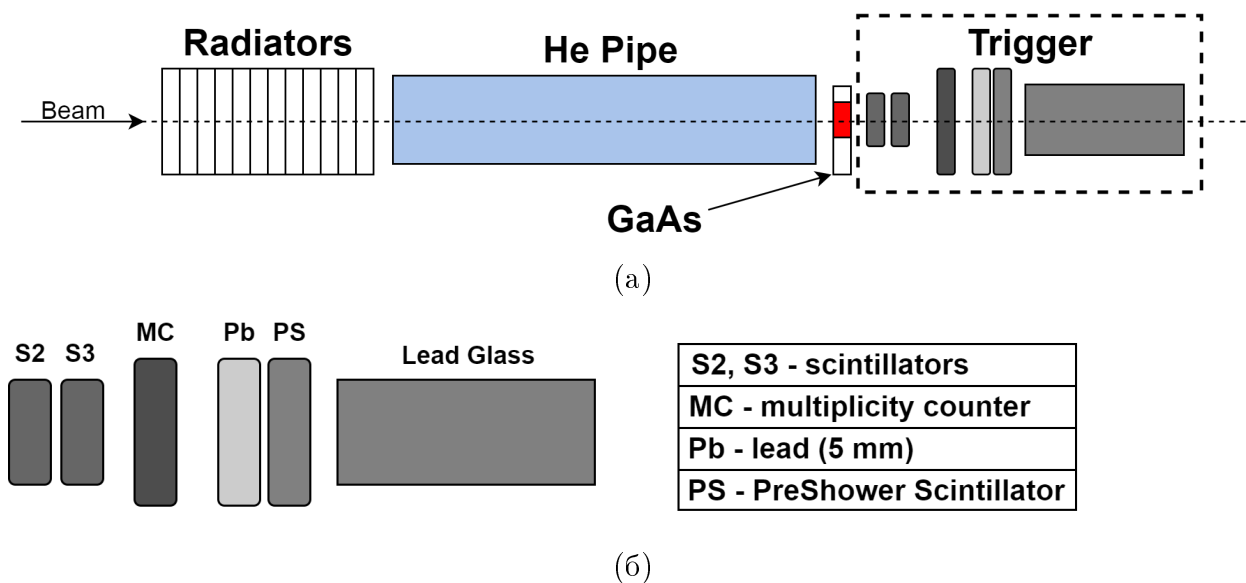


Рисунок 1.1 — Экспериментальная установка Test Beam 2021: (а) – общая схема экспериментальной установки, (б) – триггерная схема

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 регистрировались ППД на основе GaAs.

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 He 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 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.

2.1 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 многократного 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 *гамма*-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 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1 ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧ

Ранее было установлено сильное расхождение производимого моделирования с экспериментальными данными. Для углового распределения МК наблюдались две особенности:

- после 2.5 mrad недостаточная генерация квантов ПИ
- область малых углов плохо согласуется с экспериментальными данными

Первая особенность является внутренней ошибкой Geant4. При генерации ПИ в программном пакете стояло ограничение на угол. Данная проблема исправлена локально.

Вторая проблема связана с недостатками выбранной модели радиаторов ПИ для моделирования. В течении прошлого года, группа исследователей установила ряд неточностей в процессе генерации квантов ПИ от радиаторов [15]. В результате, была разработана новая модель, которая учитывает неоднородность растяжения пленки и флуктуации размеров зазоров внутри радиатора.

Также было совершено изменение в процессе отбора частиц зарегистрированных в матрице детектора. Ранее отбирались только кванты ПИ, поглотившиеся в ячейках сенсора. Теперь, для большего соответствия реальному эксперименту учитывается все, что дало некоторое энерговыделение в интересующем объеме.

Комплексное применение данных уточнений привело к улучшению степени соответствия МК экспериментальным данным.

3.2 ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Последующий анализ результатов работы данного алгоритма представляет следующий перечень спектров и распределений:

- двухмерный спектр энергии и углов зарегистрированных квантов переходного излучения
- угловое распределение регистрируемых квантов переходного излучения для разных диапазонов энергий
- энергетическое спектр квантов переходного излучения в различных угловых пределах

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.

В **Приложении А** представлены угловые распределения зарегистрированных квантов ПИ для различных диапазонов энергий в логарифмическом масштабе, а в **Приложении Б** представлены энергетические спектры для различных диапазонов углов. В **Приложении Г** и **Приложении Д** соответственно представлены угловые и энергетические спектры до применения вышеуказанных изменений.

Основным графиком, который комплексно демонстрирует результаты для данного эксперимента, является двухмерный спектр по углам и энергиям для зарегистрированных квантов переходного излучения. На рисунке 3.1 представлен график полученный в ходе эксперимента – экспериментальные данные, а на рисунке 3.2 спектров, как результат проведенного моделирования.

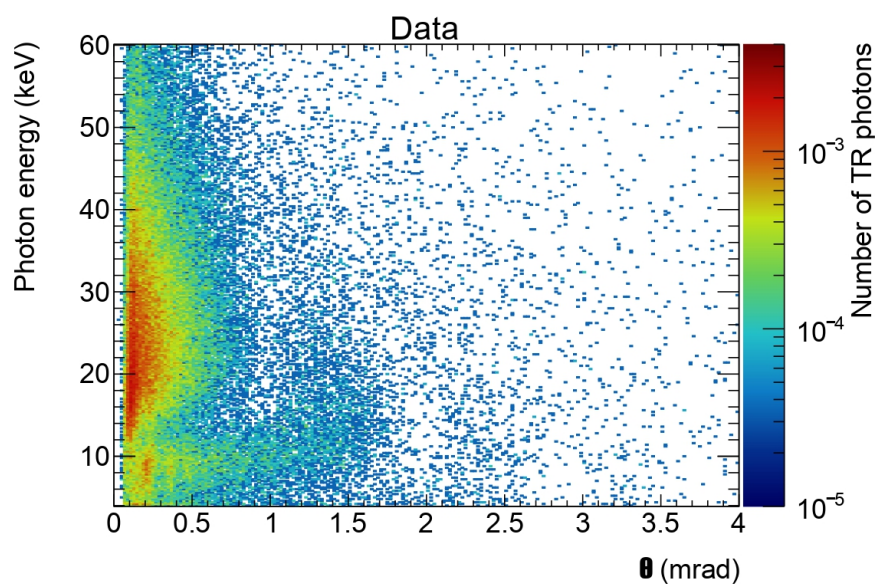


Рисунок 3.1 — Экспериментальный спектр по углам и энергиям зарегистрированных квантов переходного излучения

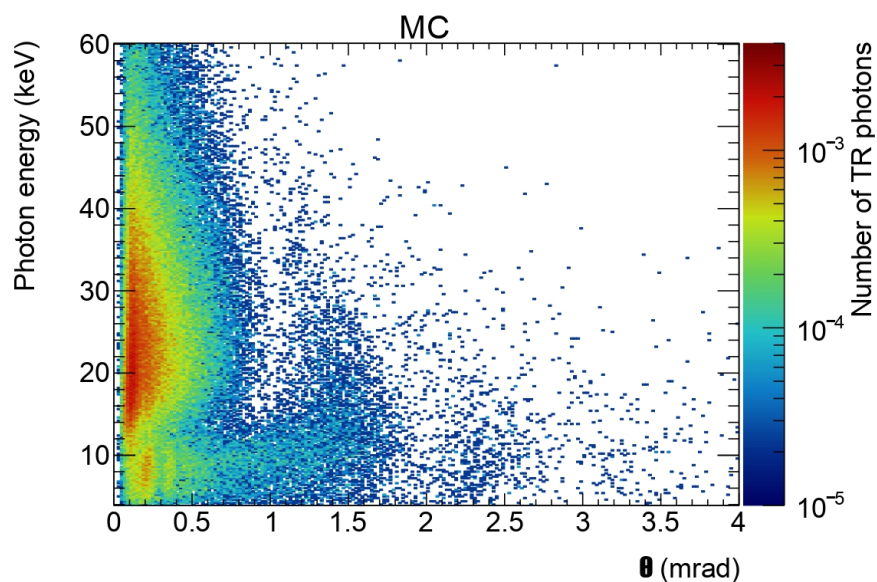


Рисунок 3.2 — Спектр по углам и энергиям зарегистрированных квантов переходного излучения полученный в ходе Geant4 моделирования

Угловое распределение зарегистрированных квантов ПИ:

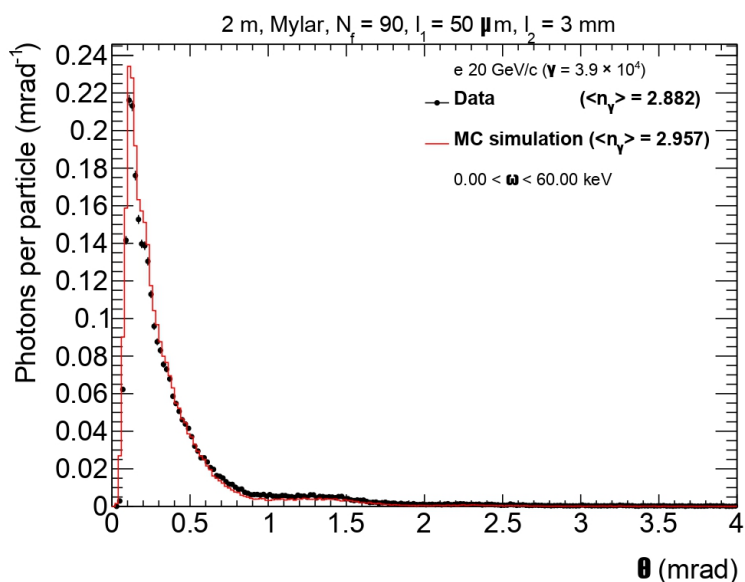


Рисунок 3.3 — Угловое распределение зарегистрированных квантов ПИ

Для энергетических спектров, сформированных отбором квантов переходного излучения зарегистрированных в указанных диапазонах углов, степень расхождения с экспериментальными данными визуально снизилась. Предполагается, что добавление и правильный учет фонового излучения (dimmu излучения) приведет к большей степени согласия данных МК и эксперимента.

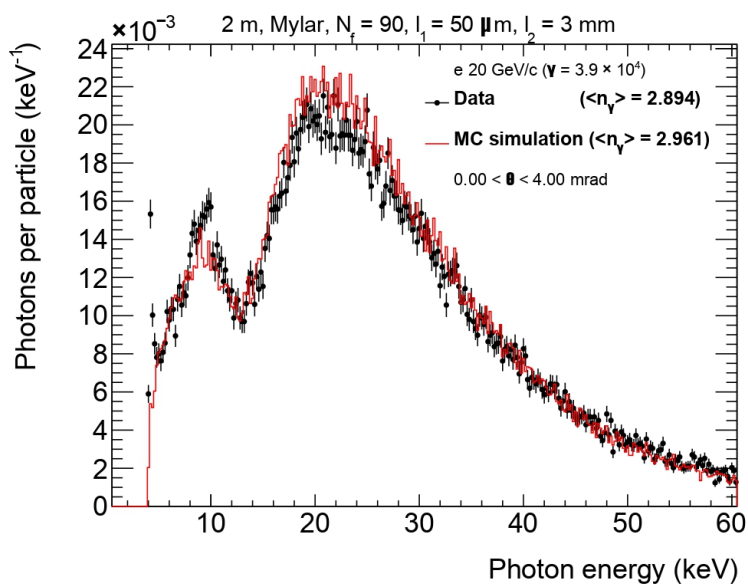


Рисунок 3.4 — Энергетический спектр квантов переходного излучения

3.3 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]:

$$\sigma = 1.3\sqrt{\frac{2nk_B T l d}{eU_{bias}}}, \quad (3.1)$$

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 вывести заряд на несколько соседних пикселей в следствии чего образуются кластеры регистрации. Визуальное представление диффузии изображено на схеме 3.5.

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-

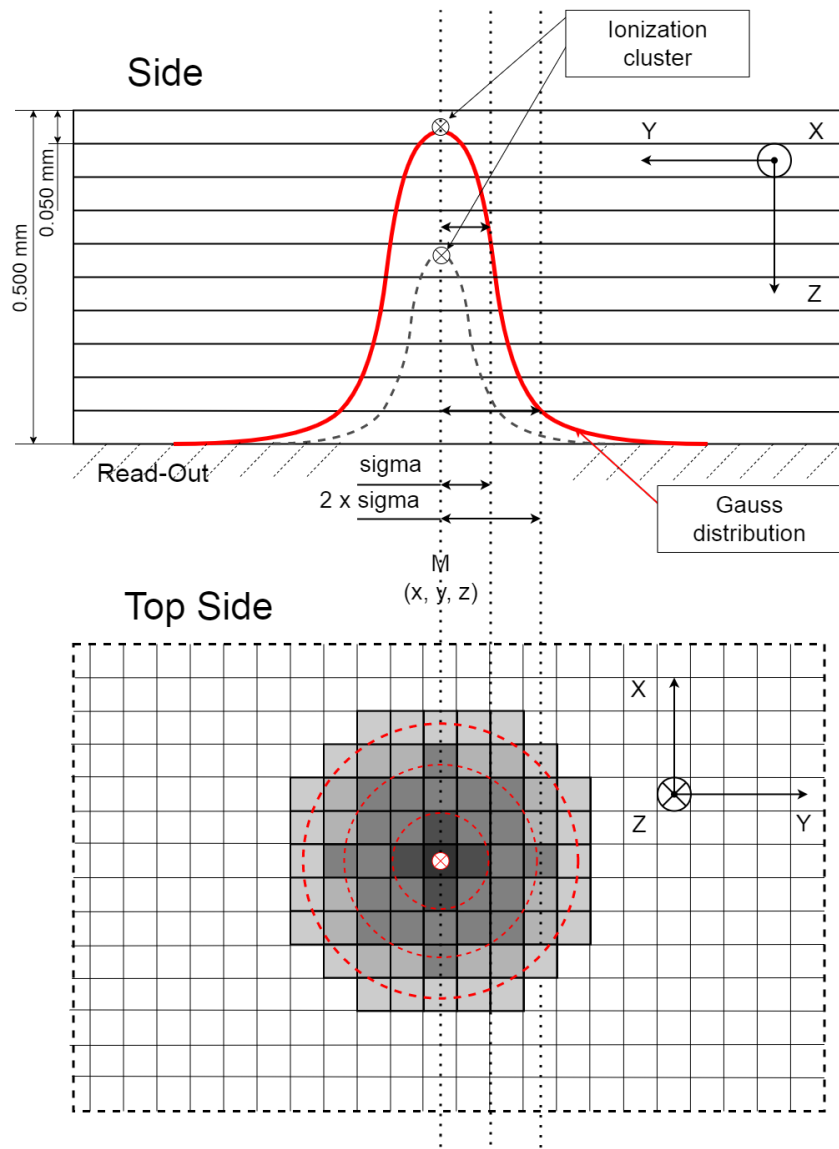


Рисунок 3.5 — Визуальная интерпретация эффекта диффузии в двух плоскостях – распространение облака заряда в двух проекциях

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

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

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 $l = 0 : \sigma(0) = 2\mu t$.

В Geant4 моделировании, на данный момент, реализована функция описываемая выражением 3.2, как соответствующую реальному детектору.

3.4 МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ И КОЭФФИЦИЕНТ ДИФФУЗИИ

С помощью МО можно построить нейронную сеть, которая будет решать задачу регрессии - по входным параметрам восстановить какое-либо числовое значение. Для оценки коэффициента диффузии в первом приближении был использован примитивные перцептрон, гипер-параметры для которого выбраны в соответствии с базовыми принципами решения регрессионных задач.

В представленном случае было проведено моделирование эксперимента с функцией сигма для диффузии описанной выражением 3.1. В каждом событии записывалось: энергия зарегистрированного кванта ПИ и соответствующее ему количество пикселей в кластере регистрации. Так определяются входные данные для нейронной сети. В качестве целевых данных, которые необходимо восстановить, использовалась координата Z в объеме детектора, на которой поглотился соответствующий γ -квант. При обучении модели была выбрана метрика средней абсолютно ошибки, для которой, на тестовых данных, была получена величина 12.1%. Данная ошибка, на средней глубине поглощения γ -кванта порядка $100 \mu m$ составляет около $60.5 \mu m$, что в пересчете для сигма $\approx 1 \mu m$.

Затем обученной модели на вход были поданы экспериментальные данные, для которых была также восстановлена координата Z для каждого γ -кванта. Построив распределение восстановленных координат для тестовых и экспериментальных данных, оценив среднее значение этих распределений был рассчитан дополнительный множитель для выражения сигма диффузии по следующей формуле:

$$k = \sqrt{\frac{l_{exp}}{l_{test}}} = 1.0964, \quad (3.3)$$

Таким образом, с учетом 3.3, выражение 3.1 приняло вид:

$$\sigma = 1.425 * \sqrt{\frac{2nk_B T l d}{eU_{bias}}}, \quad (3.4)$$

С новым выражением для диффузии было произведено моделирование для которого получено распределение по числу пикселей в кластере регистрации.

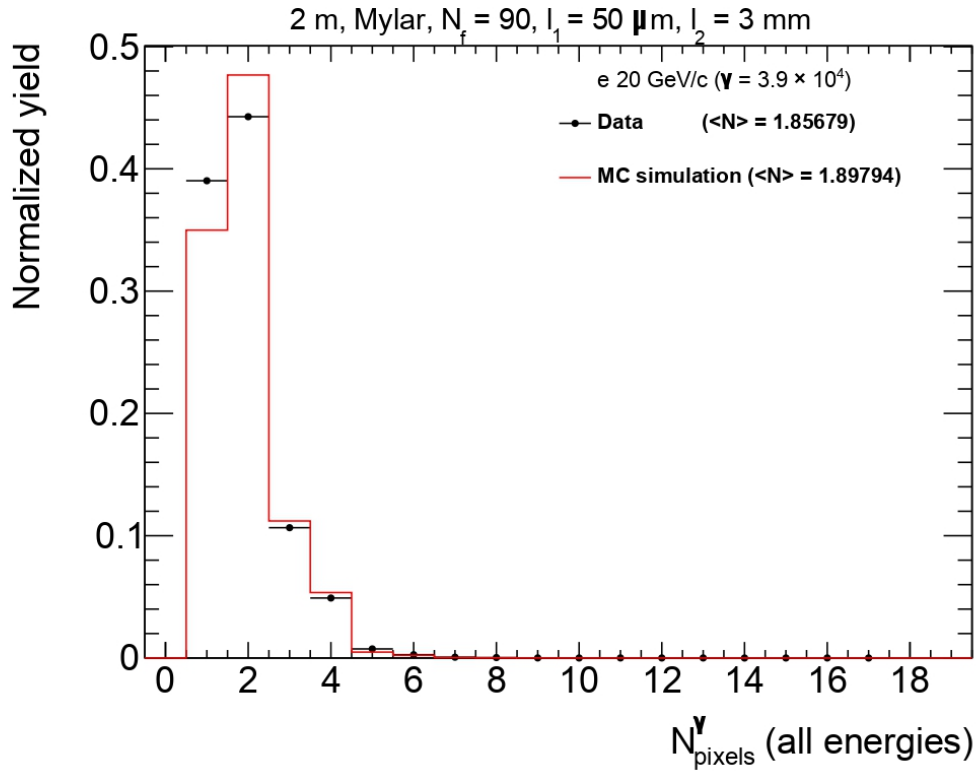


Рисунок 3.6 — Множественность пикселей в кластере регистрации кванта ПИ с функцией сигма МО

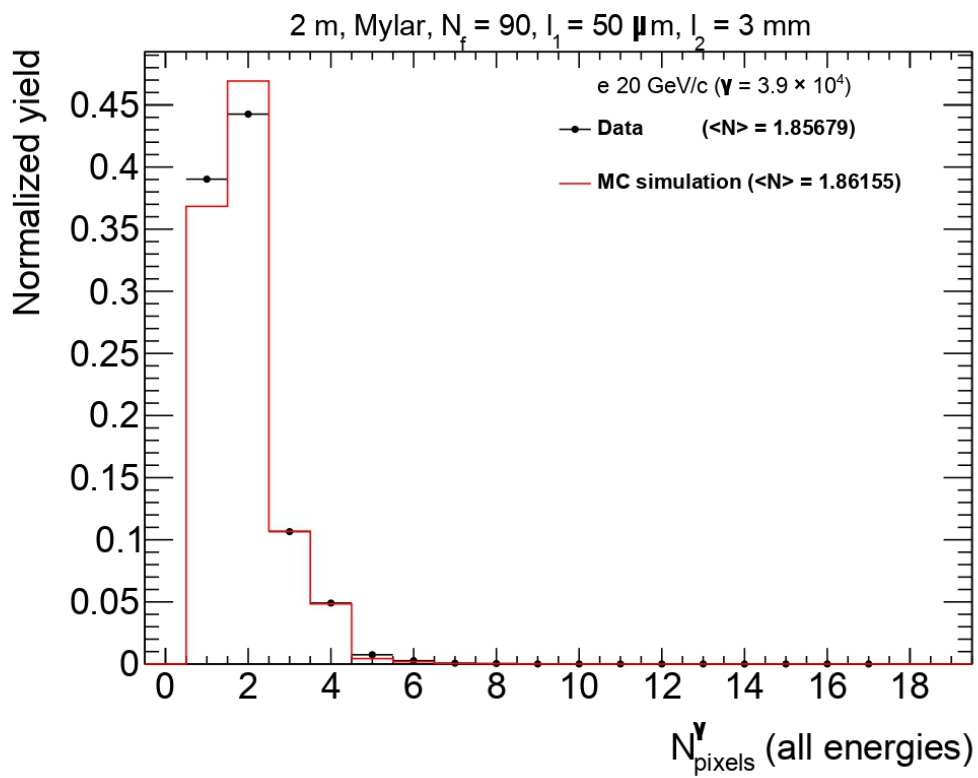


Рисунок 3.7 — Множественность пикселей в кластере регистрации кванта ПИ с выражением для сигма 3.2

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течении этого семестра реализовано:

- решена проблема связанная с процессом генерации квантов ПИ в Geant4
- выбрана наиболее подходящая модель радиатор ПИ в Geant4
- переопределен процесс отбора зарегистрированных матрицей детектора частиц в моделировании
- в первом приближение произведена оценка коэффициента диффузии с помощью МО

Предстоит реализовать:

- учет вторичного излучения (*dummy* излучения)
- описание кросс-тока
- оценка полученного коэффициента диффузии полученного с помощью машинного обучения, после введения *dummy* излучения

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 / А. 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

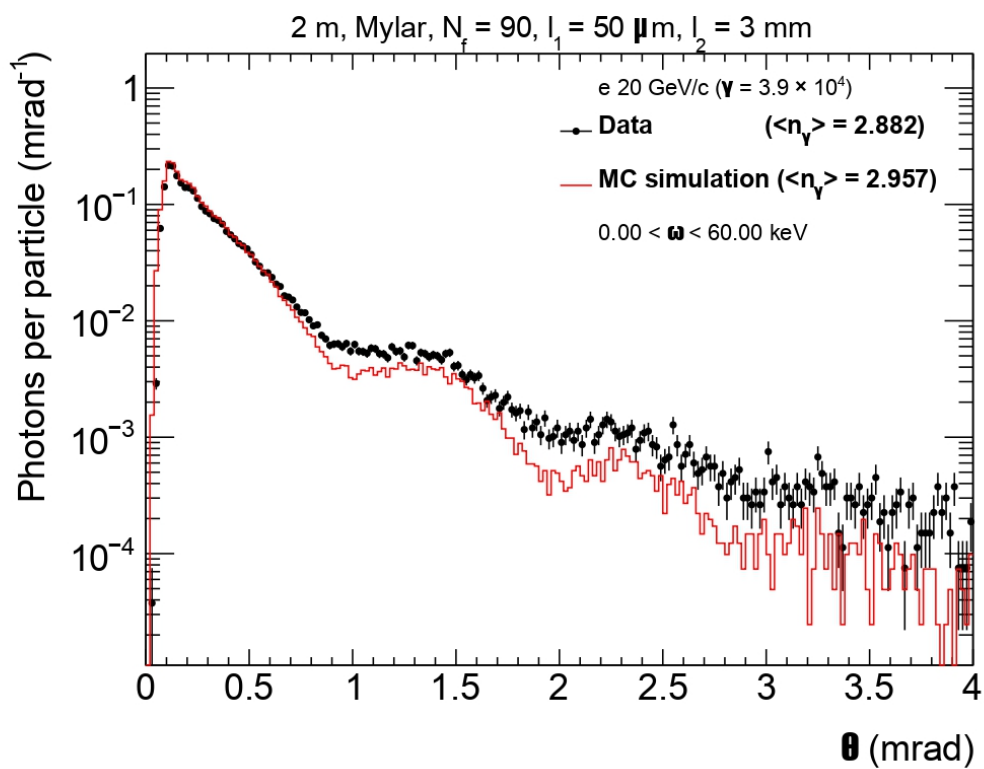


Рисунок 4.1 — Угловое распределение зарегистрированных квантов ПИ для различных диапазонов энергий

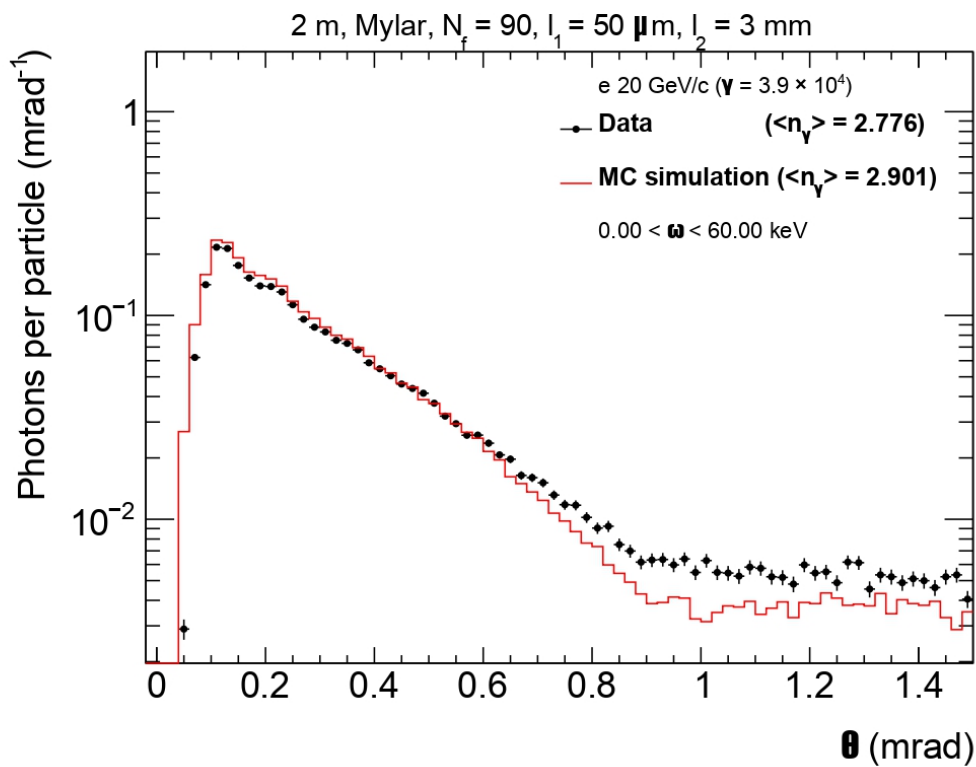


Рисунок 4.2 — Угловое распределение зарегистрированных квантов ПИ для различных диапазонов энергий

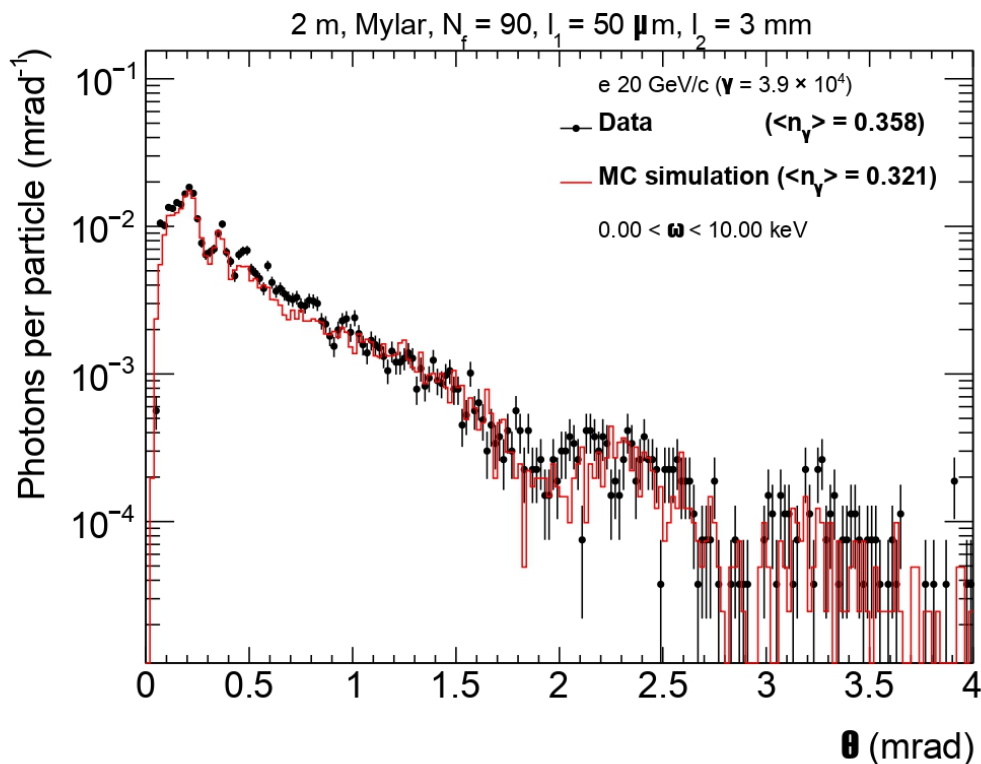


Рисунок 4.3 — Угловое распределение зарегистрированных квантов ПИ для различных диапазонов энергий

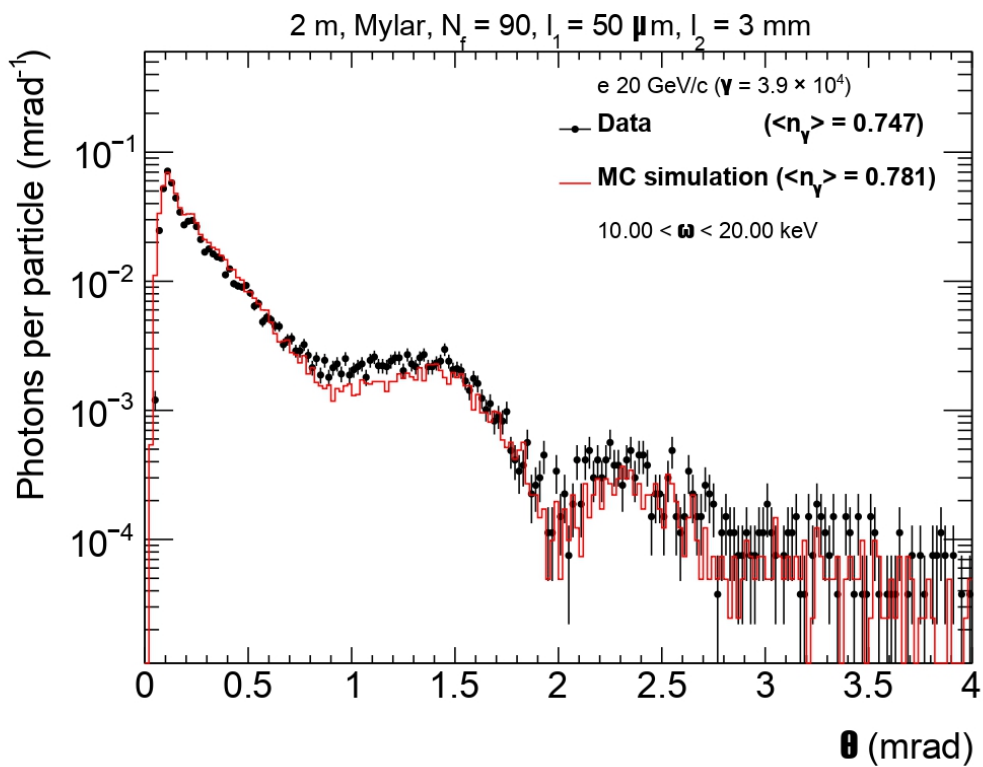


Рисунок 4.4 — Угловое распределение зарегистрированных квантов ПИ для различных диапазонов энергий

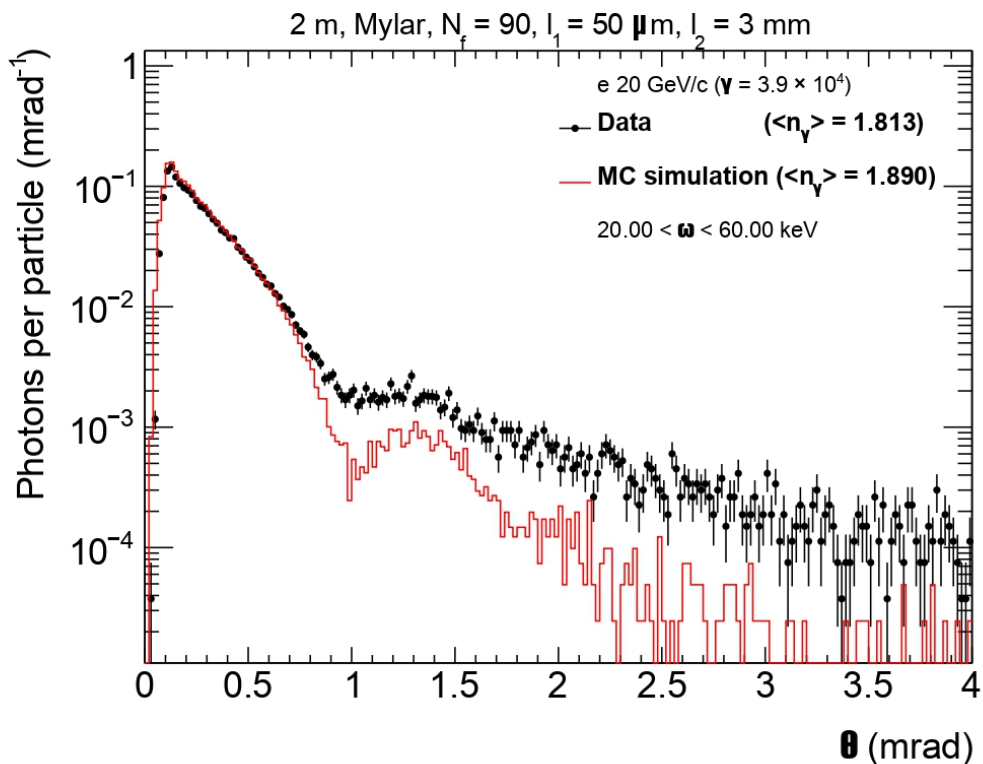


Рисунок 4.5 — Угловое распределение зарегистрированных квантов ПИ для различных диапазонов энергий

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

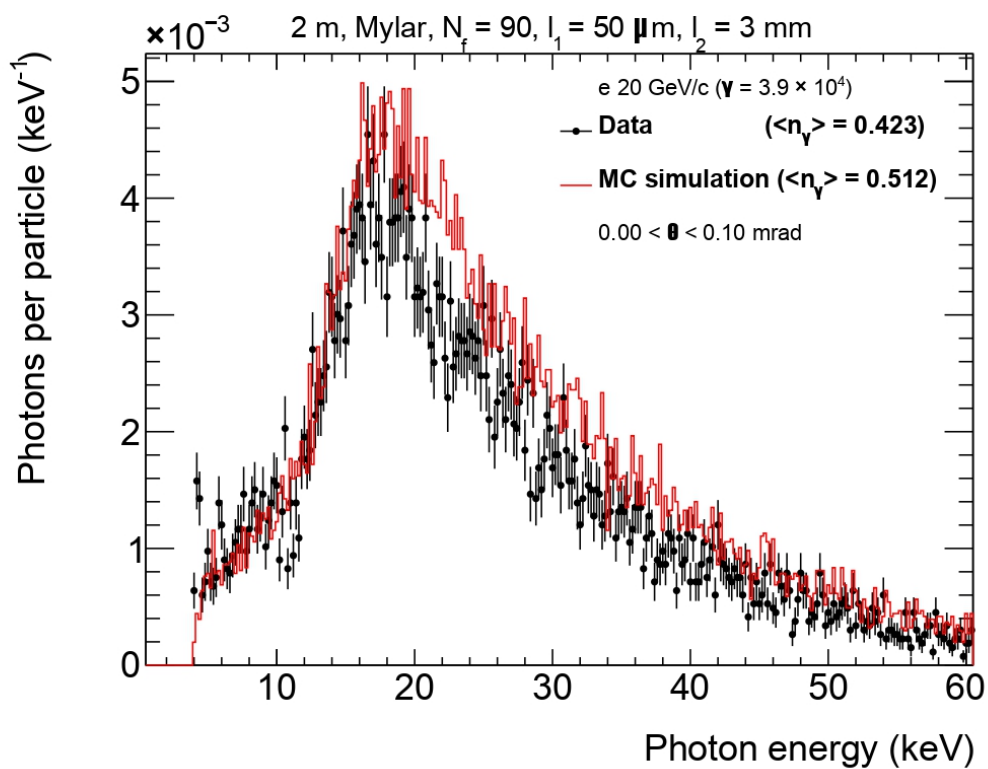


Рисунок 4.6 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

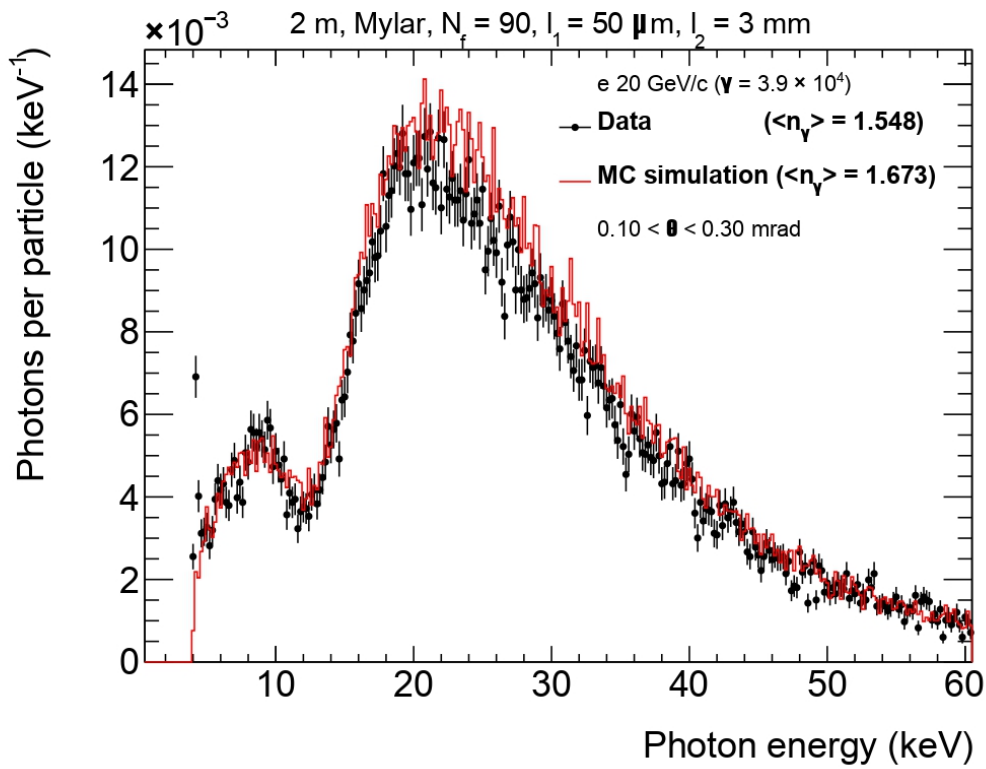


Рисунок 4.7 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

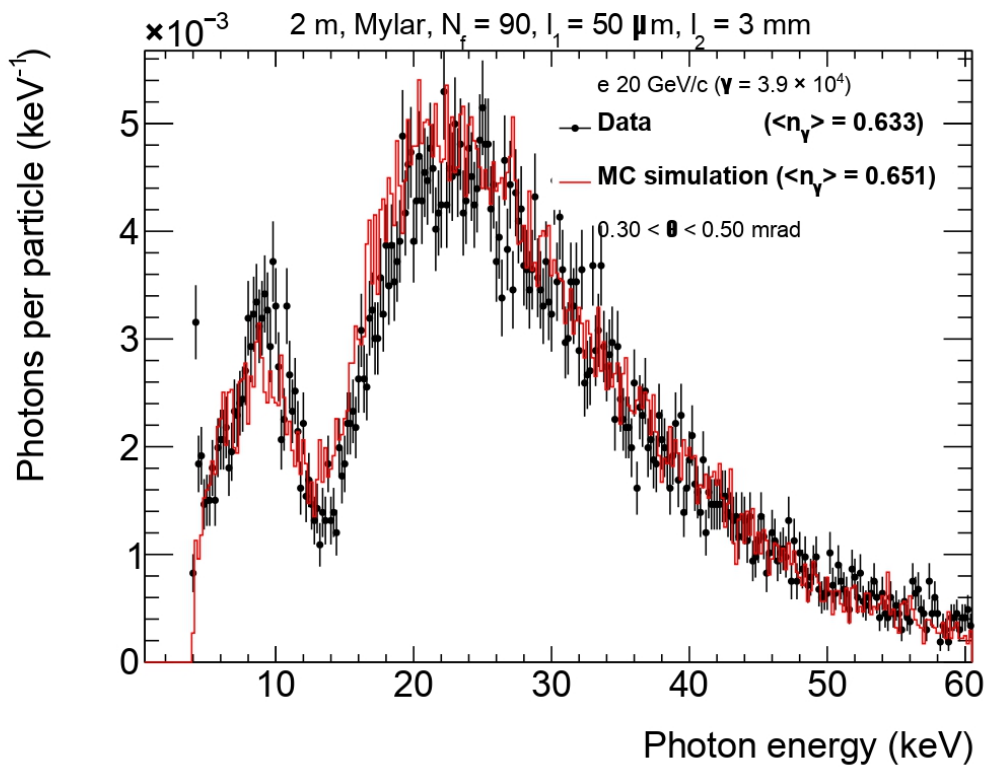


Рисунок 4.8 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

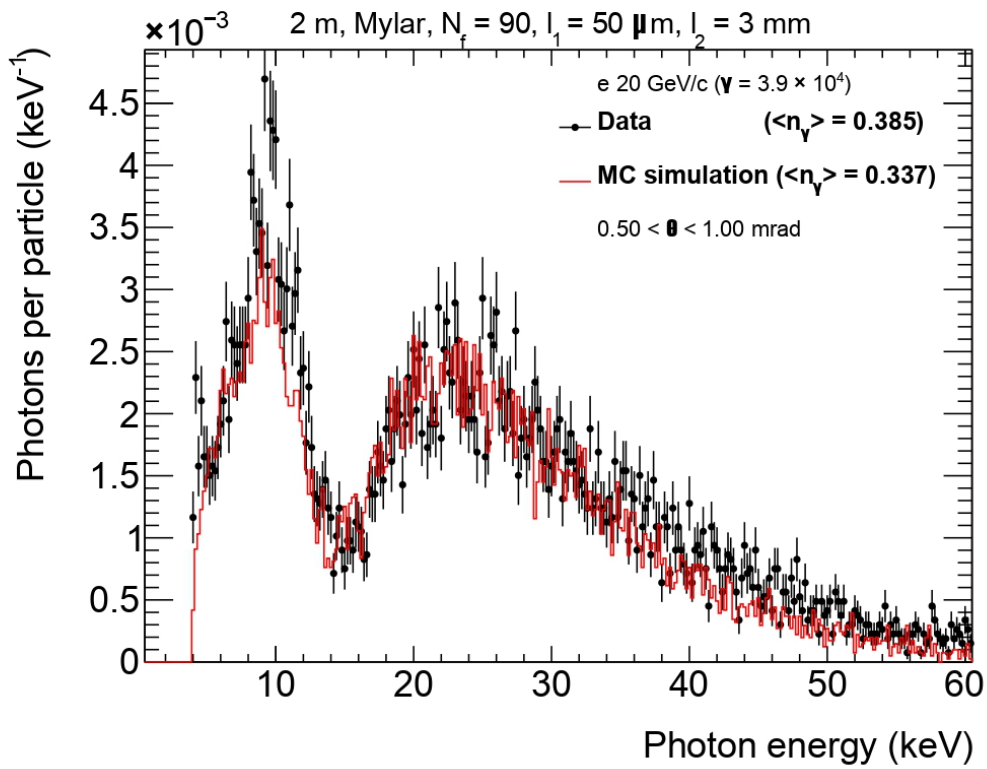


Рисунок 4.9 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

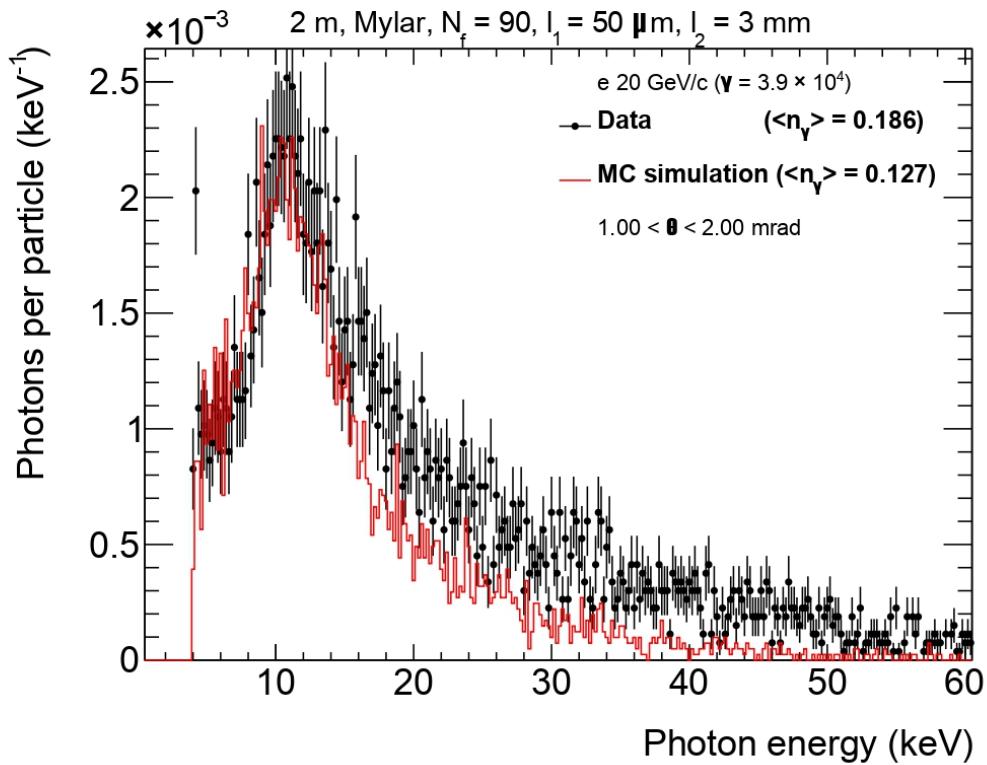


Рисунок 4.10 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

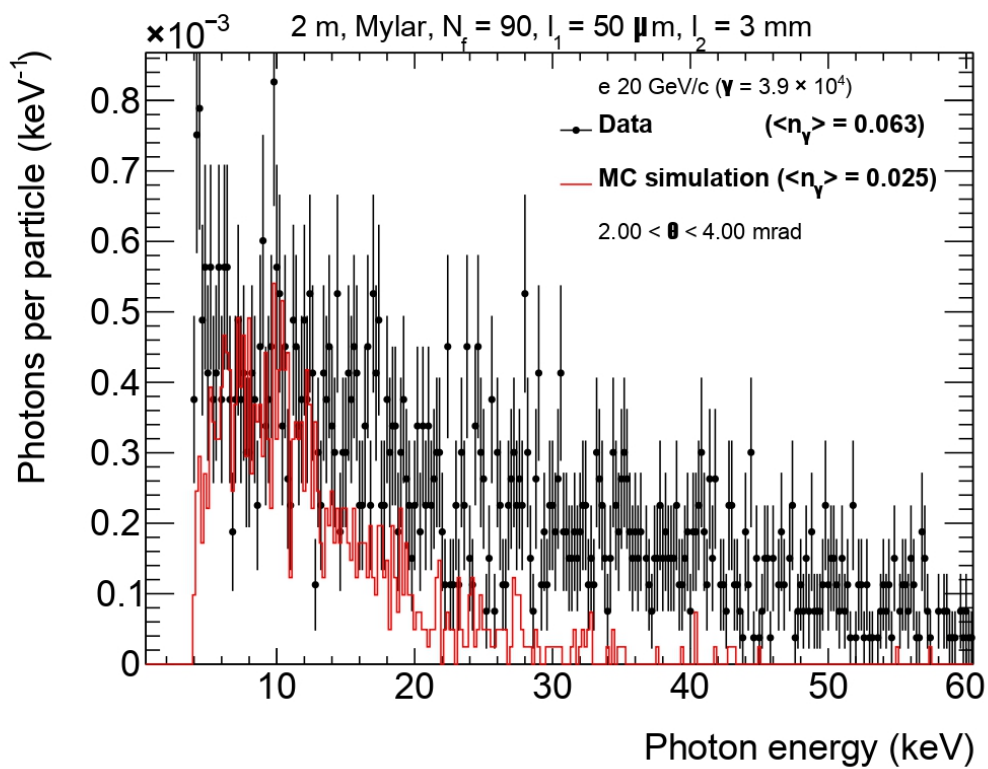


Рисунок 4.11 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

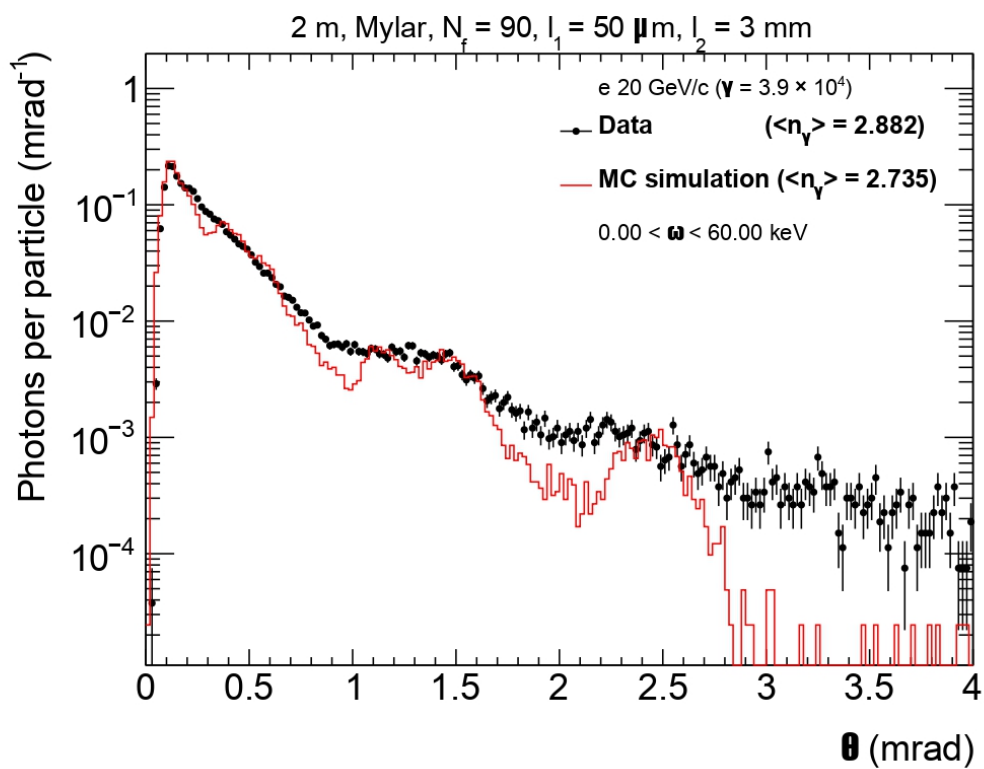


Рисунок 4.12 — Угловое распределение зарегистрированных квантов ПИ для различных диапазонов энергий

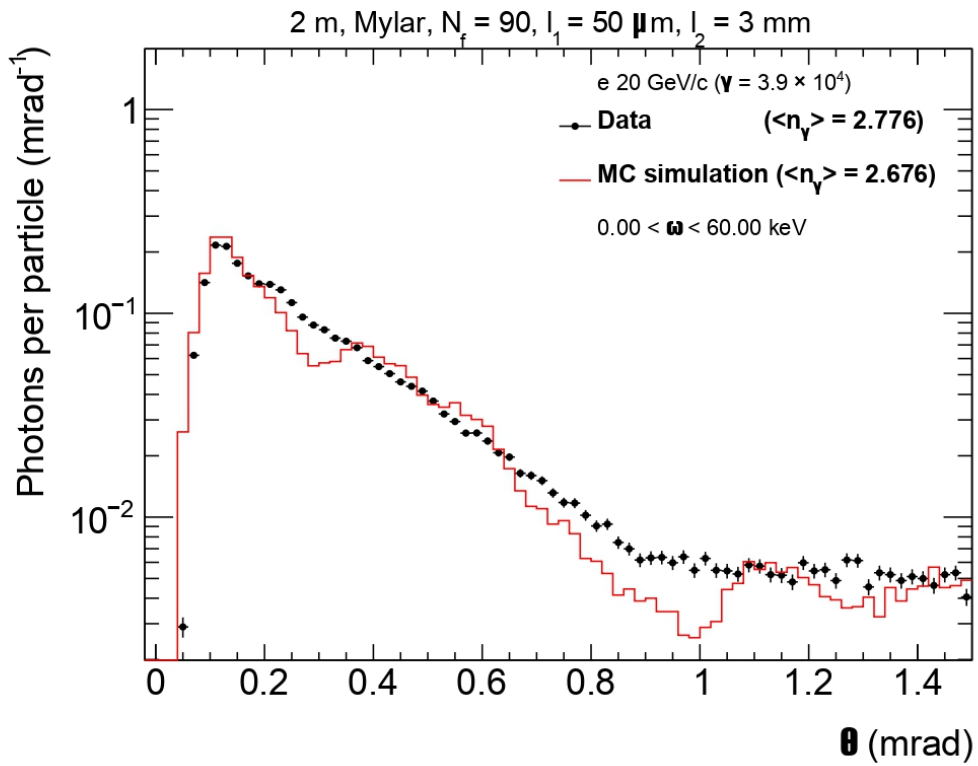


Рисунок 4.13 — Угловое распределение зарегистрированных квантов ПИ для различных диапазонов энергий

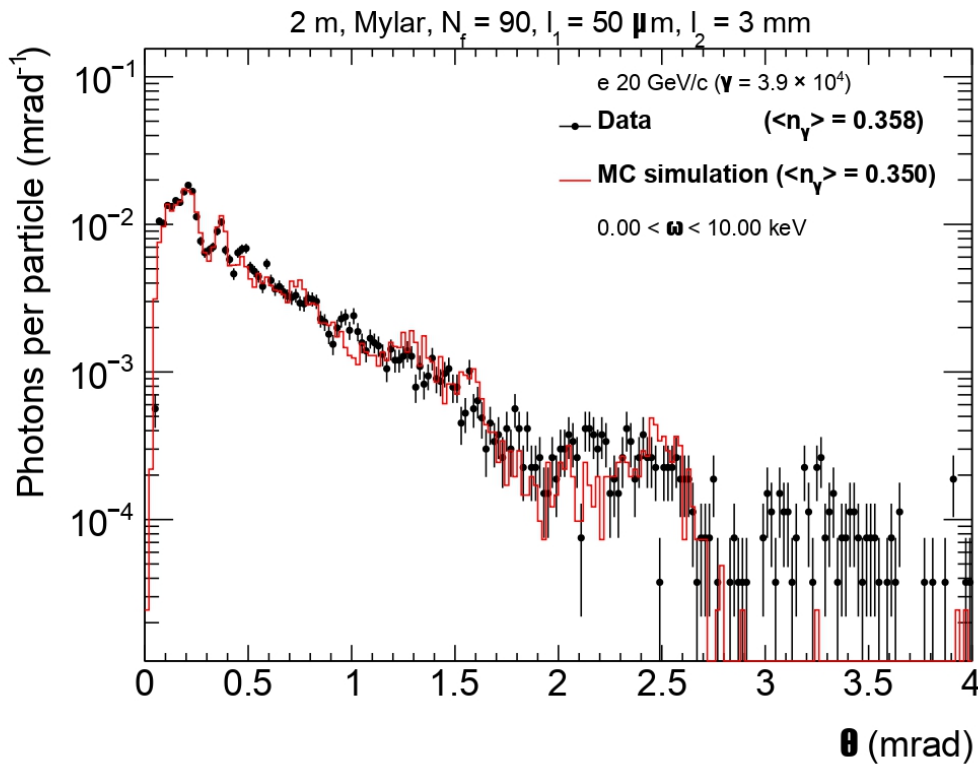


Рисунок 4.14 — Угловое распределение зарегистрированных квантов ПИ для различных диапазонов энергий

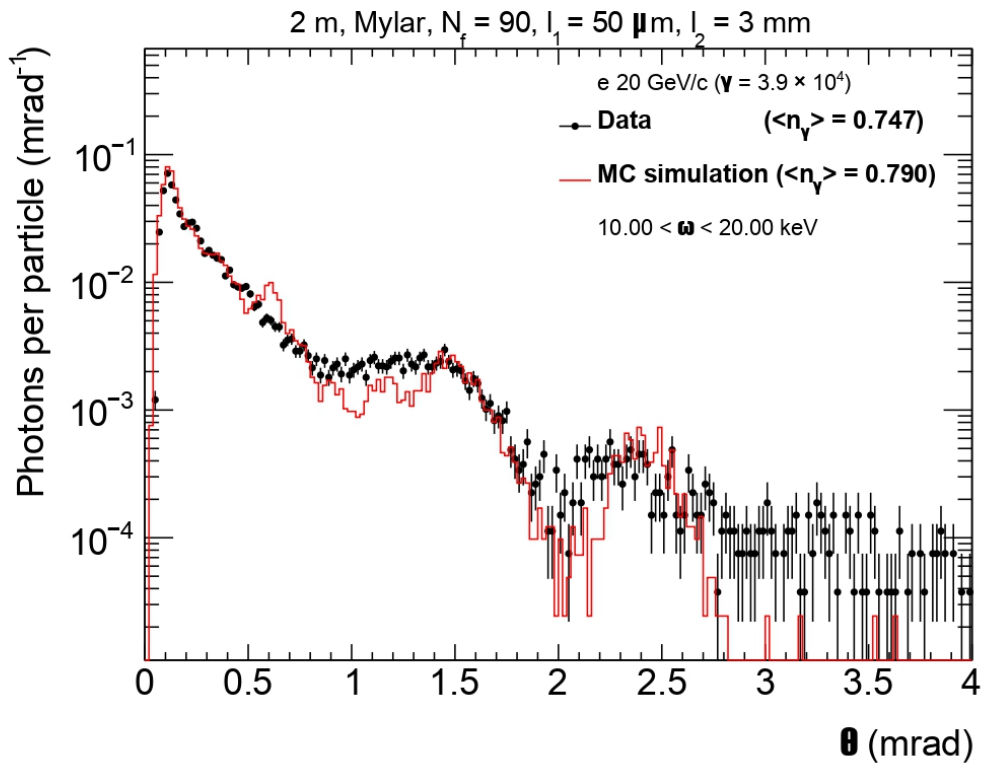


Рисунок 4.15 — Угловое распределение зарегистрированных квантов ПИ для различных диапазонов энергий

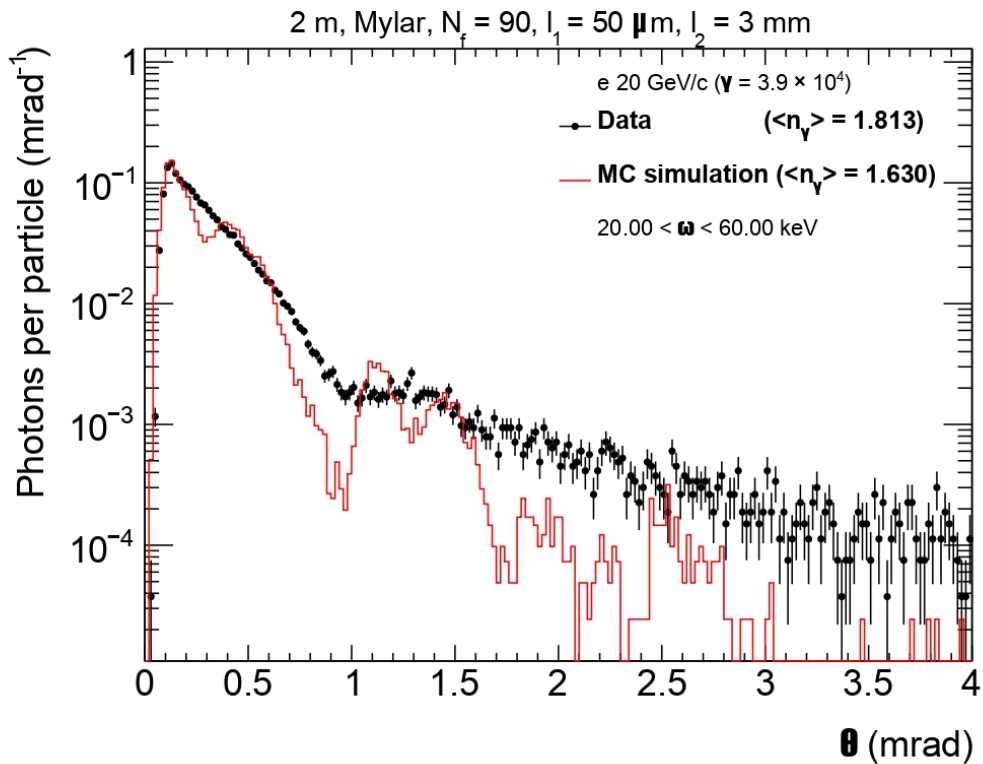


Рисунок 4.16 — Угловое распределение зарегистрированных квантов ПИ для различных диапазонов энергий

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

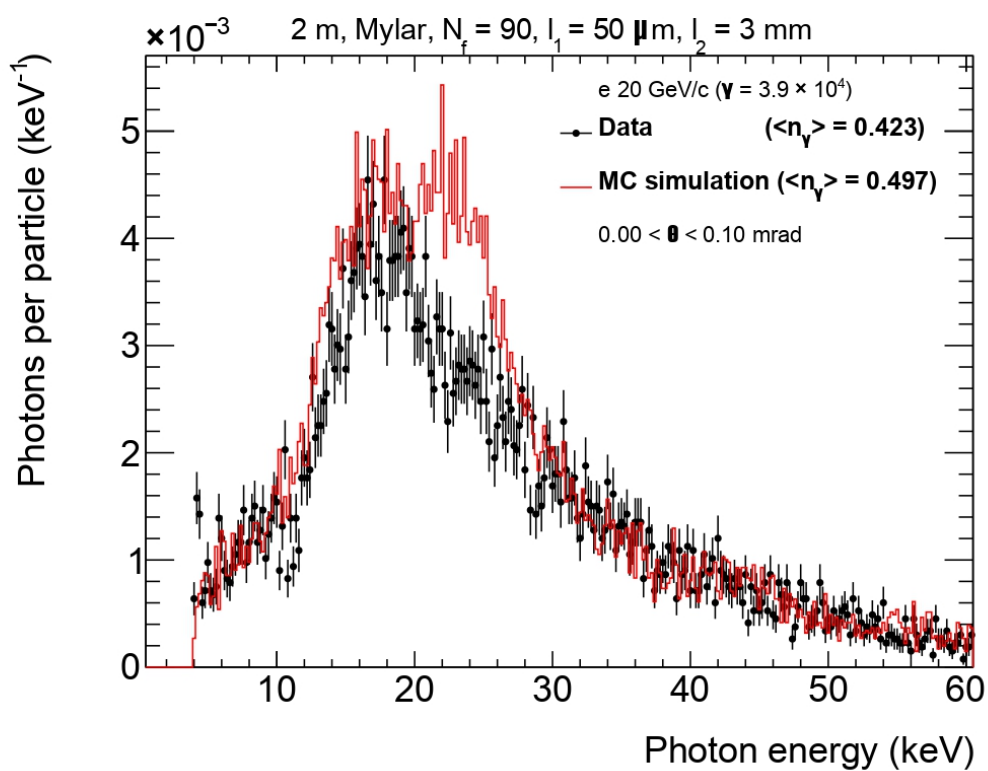


Рисунок 4.17 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

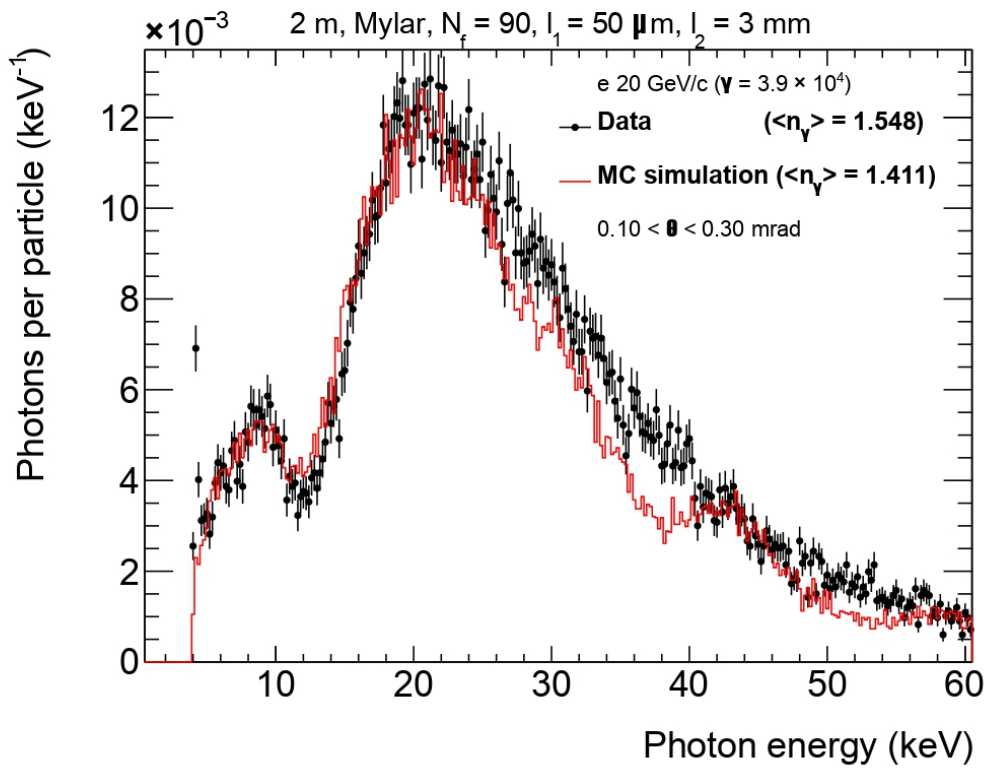


Рисунок 4.18 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

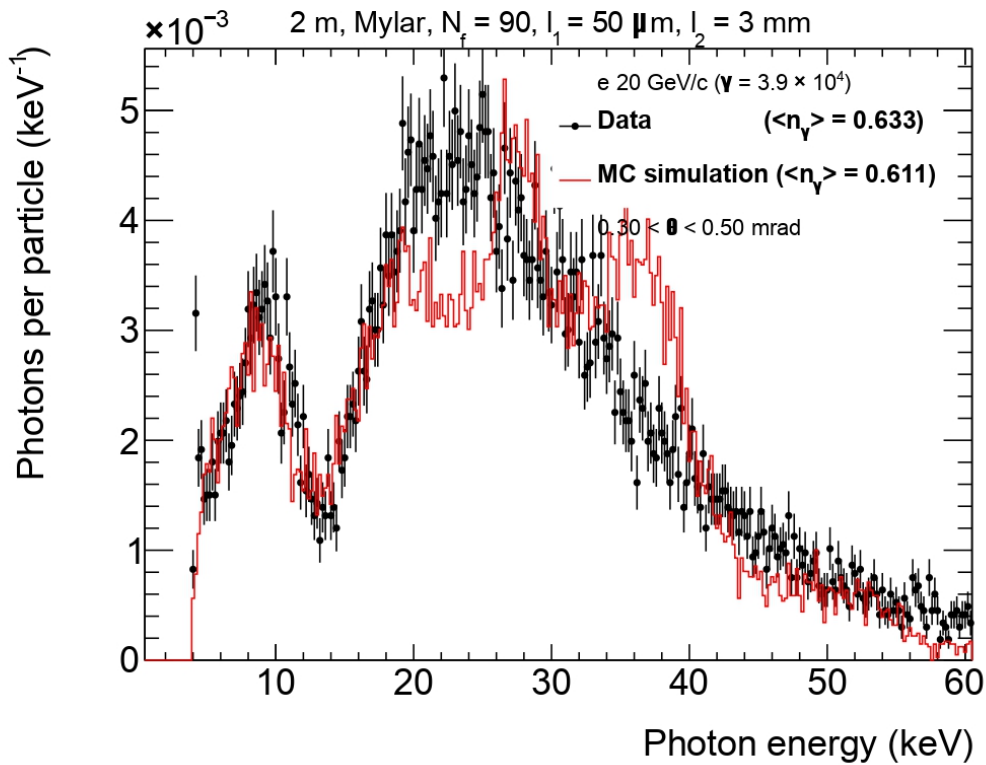


Рисунок 4.19 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

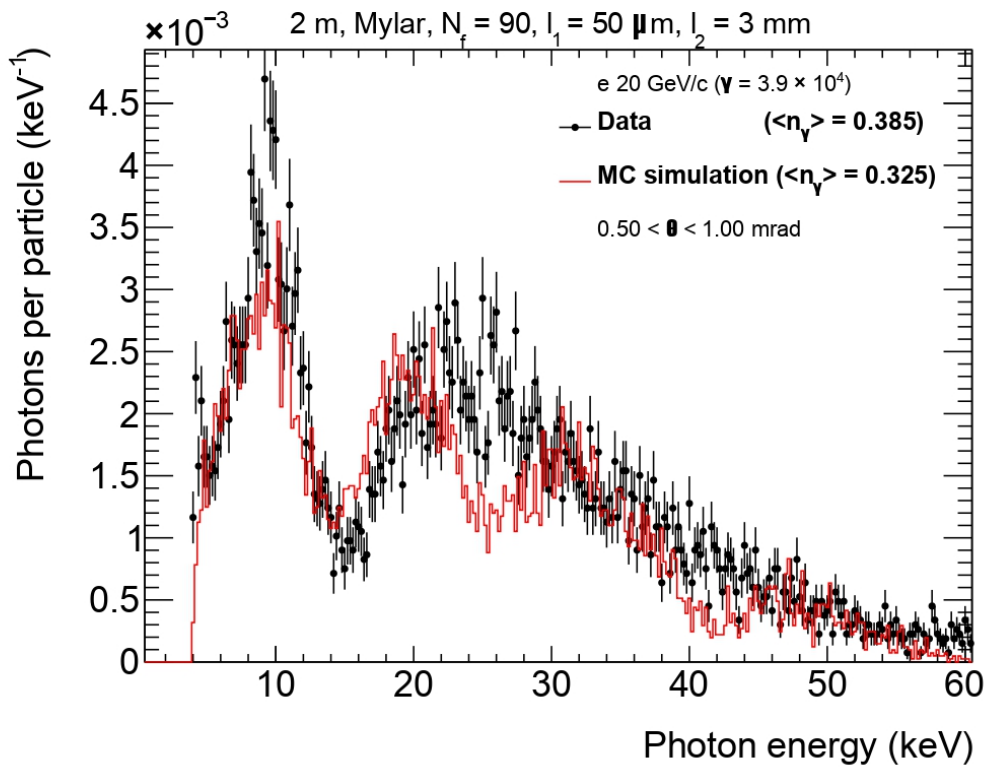


Рисунок 4.20 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

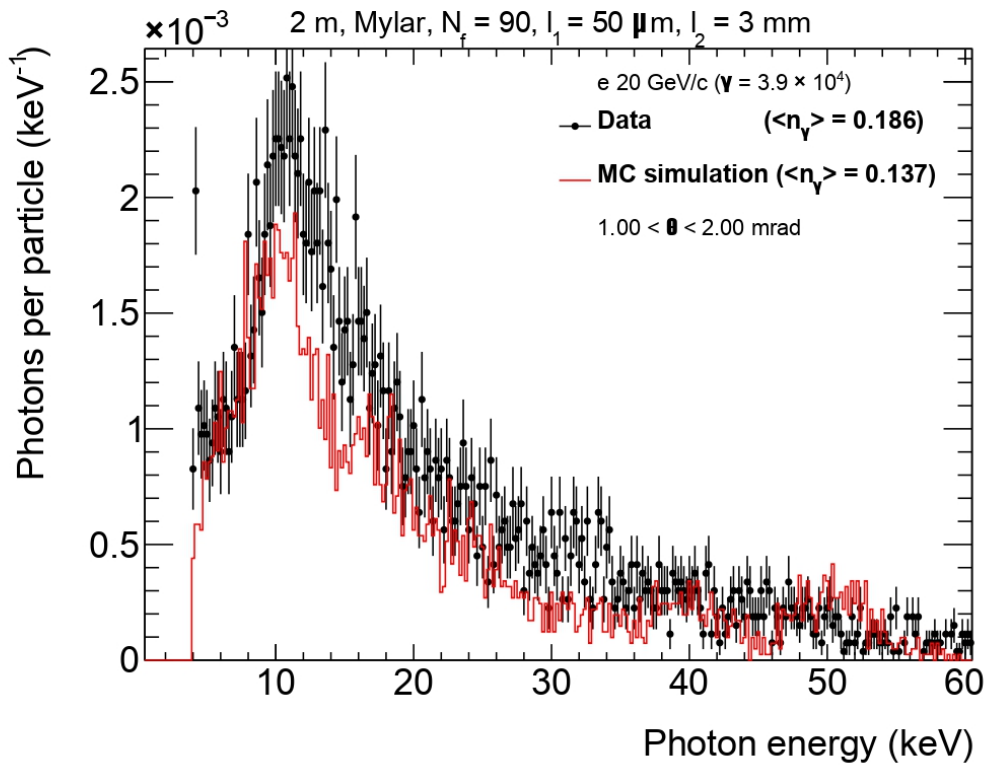


Рисунок 4.21 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов

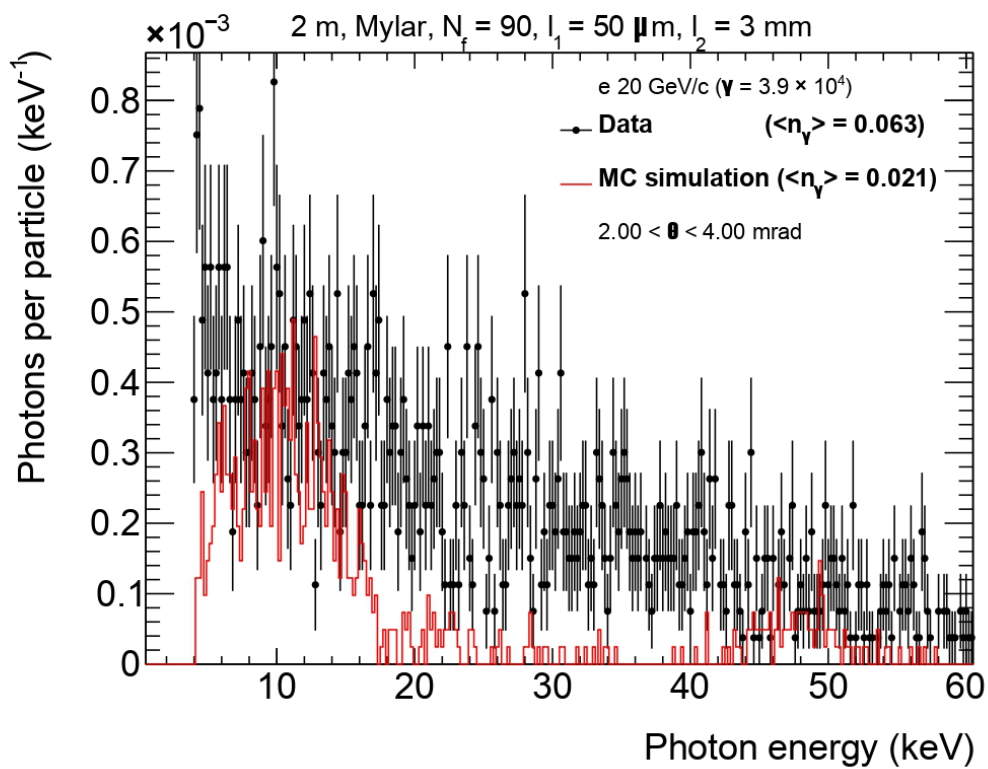


Рисунок 4.22 — Энергетический спектр зарегистрированных квантов переходного излучения при Geant4 моделировании для разных диапазонов углов