



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 ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

ДОРОНИН СЕМЁН АЛЕКСАНДРОВИЧ

РАЗРАБОТКА ДЕТЕКТОРОВ ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ
АДРОНОВ В ТЭВ-НОЙ ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ

Научно-квалификационная работа аспиранта

Направление подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия»
Научная специальность 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики»

Научный руководитель: Романюк Анатолий Самсонович,
к.ф.-м.н., профессор

Москва - 2022

Введение

Физика высоких энергий – одна из самых быстроразвивающихся областей науки на сегодняшний день. Поиск новых элементарных частиц, изучение протекающих физических процессов требуют всё более новых методов их идентификации. Развитие детекторных технологий позволяет ставить новые эксперименты и проводить детальные исследования на ускорителях элементарных частиц и в физике космических лучей.

Идентификация частиц в физике высоких энергий осуществляется с использованием различных детекторных систем: трекинговых, мюонных, калориметрических. Данная задача становится особенно трудной, если возникает необходимость разделения заряженных частиц с близкими массами – такими как протоны, К- и π -мезоны. Хорошим способом идентификации частиц в таком случае становится применение детекторов переходного излучения (ДПИ). Эти детекторы фиксируют заряженные частицы большой энергии, используя информацию о регистрируемом переходном излучении, испускаемом при пролёте через границу раздела сред с различными диэлектрическими проницаемостями.

В настоящее время не существует детекторов переходного излучения, которые могли бы идентифицировать адроны в ТэВ-ной области энергий (в диапазоне γ -факторов от 10^3 до $4 \cdot 10^4$). Создание таких детекторов открыло бы возможности для решения многих задач в области ускорительной физики высоких энергий и в области космомикрoфизики.

Цель работы

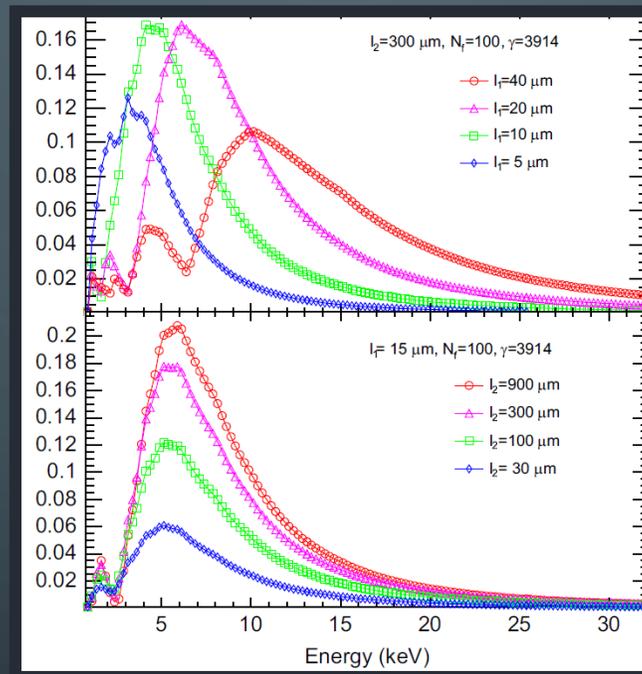
- Проведении систематических исследований свойств переходного излучения, позволяющих использовать угол фотонов ПИ из радиатора для идентификации частиц.
- Систематическое исследование, направленное на моделирования свойств радиаторов переходного излучения, с целью обеспечения увеличения угла вылета ПИ, для его разделения от ионизационных потерь частицы.
- Экспериментальное исследование угловых и спектральных характеристик ПИ с помощью полупроводниковых пиксельных детекторов.
- Исследование возможности построения ДПИ на основе GaAs-пиксельного детектора.
- Разработке предложений и рекомендаций по созданию ДПИ для разделения адронов в области энергий 1-6 ТэВ.

Положения, выносимые на защиту

- Проведено систематическое изучение свойств и характеристик радиаторов, подходящих для применения при разработке концепции детекторов переходного излучения с использованием интерференционных эффектов в радиаторах.
- Впервые было показано, что вопреки общепринятому закону, угол вылета ПИ $\sim 1/\gamma$, угол вылета ПИ, соответствующий последнему интерференционному максимуму энергетического распределения, растет с увеличением γ -фактора частицы.
- Впервые с помощью пиксельных полупроводниковых детекторов были экспериментально изучены спектрально-угловые характеристики ПИ от различных радиаторов.
- Разработан комплекс программ по моделированию детекторов переходного излучения на основе пиксельных детекторов, описывающий экспериментальные данные с высокой точностью, включающий в себя модель GaAs-полупроводникового детектора на основе микросхемы считывания TimePix3.
- Впервые была изучена возможность создания ДПИ на основе пиксельного детектора, где в качестве чувствительного элемента используется GaAs.
- Впервые разработана и предложена концепция детекторов переходного излучения для разделения адронов в ТэВ-ном диапазоне энергий и показаны его возможности.

Переходное излучение

Переходное излучение (ПИ) – вид электромагнитного излучения, возникающего при пересечении заряженной частицей границы раздела двух сред с различными диэлектрическими проницаемостями. Эффект был предсказан в 1945 году советскими физиками, академиками наук В. Л. Гинзбургом и И. М. Франком.



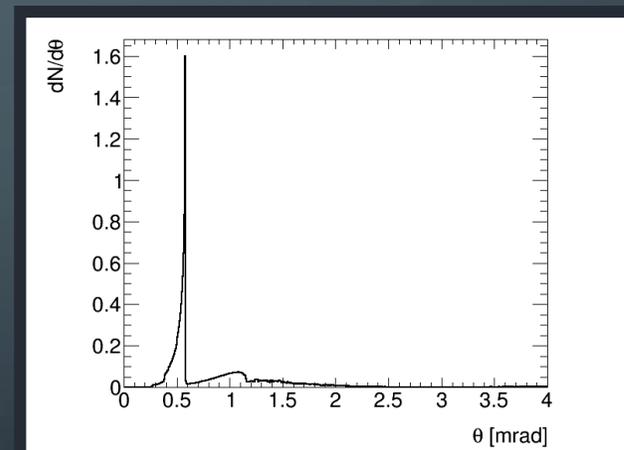
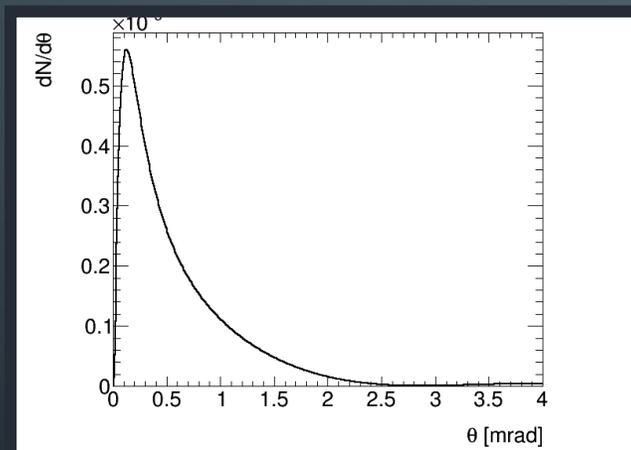
Спектры фотонов переходного излучения для различных параметров радиатора.

Угловая информация фотонов ПИ

При использовании большего числа фольг структура распределения усложняется, использовать простую зависимость $\theta \sim 1/\gamma$ для описания уже нельзя. Оценку углового положения интерференционных максимумов можно получить, используя следующую формулу:

$$\theta = \sqrt{\frac{4\pi^2 c^2 r^2}{(l_1 \omega_1^2 + l_2 \omega_2^2)(l_1 + l_2)}} - 1/\gamma^2,$$

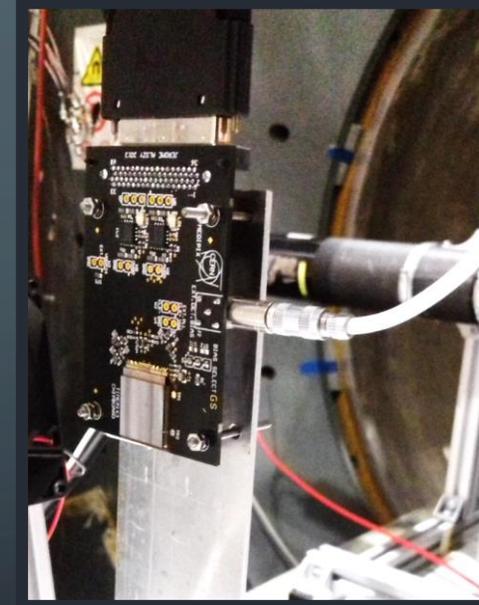
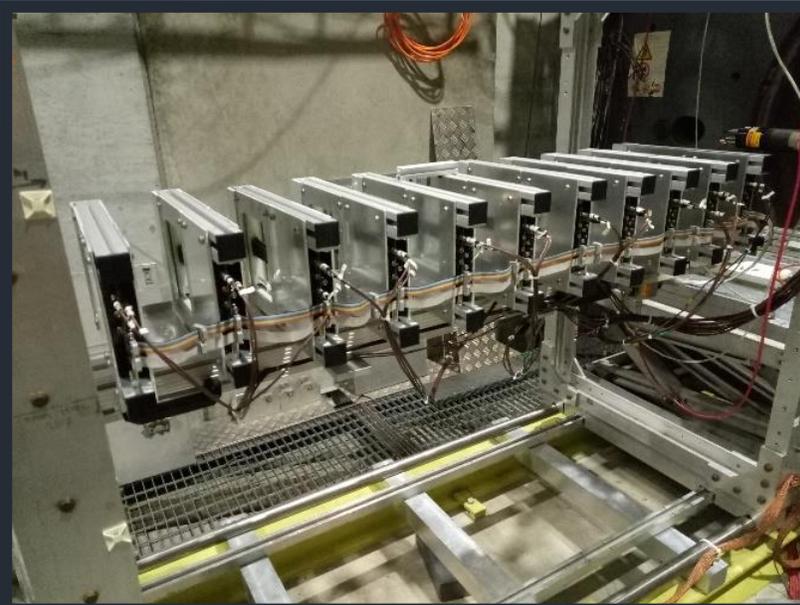
$$\theta \sim \frac{1.2}{\omega_1 \sqrt{l_1 l_2}}, \quad \gamma_s \sim 3 \cdot 10^3 \omega_1 \sqrt{l_1 l_2}, \quad \theta \sim \frac{k}{\gamma_s}$$



Угловое распределение фотонов переходного излучения, радиатор из полиэтилена, одна фольга 30 мкм (слева) и 500 фольг той же толщины (справа), воздушный зазор 0.5 мм.

Детекторы переходного излучения

Типичная структура детектора переходного излучения представляет собой радиатор с большим числом фольг и регистрирующий прибор. Один радиатор может состоять из сотен тонких фольг из материала, обладающего низким зарядовым числом Z – литий, CH_2 (для уменьшения поглощения фотонов внутри радиатора). Детектор же наполняется газами с высоким зарядовым числом (криптон, ксенон), чтобы улучшить поглощение фотонов переходного излучения и минимизировать ионизационные потери частицы.



Детекторы на основе газовых дрейфовых трубок «straw» (слева) и полупроводниковый детектор с 500 мкм GaAs сенсором (справа).

TimePix3 GaAs:Cr гибридный пиксельный детектор

Схема считывания TimePix3 разделяет активный сенсор на матрицу, состоящую из 256×256 квадратных пикселей размером 55 мкм каждый, давая итоговую активную область размером $14.1 \times 14.1 \text{ мм}^2$. Позволяет получать временное разрешение в 1.56 нс и пространственное разрешение $\sim 16 \text{ мкм}$.

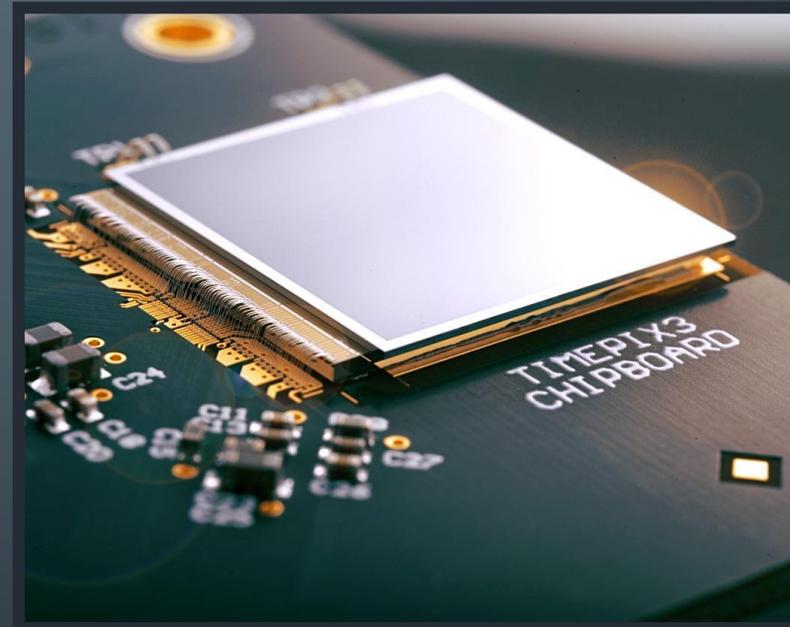
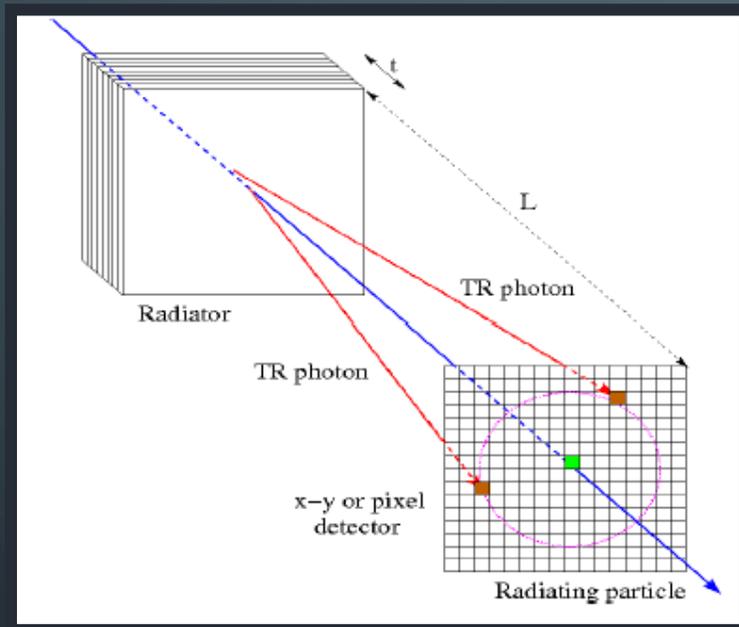


Схема регистрации переходного излучения и заряженной частицы детектором (слева) и полупроводниковый детектор с 500 мкм GaAs сенсором (справа).

Тестирование прототипов ДПИ

Тестирование проводилось группой ATLAS НИЯУ МИФИ, осуществлялась проверка прототипов детекторов переходного излучения на основе двух технологий. Работа выполнялась в Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН). Было проведено испытание прототипов на основе газовых дрейфовых трубок straw и на основе GaAs-полупроводниковой технологии. Тестирование проводилось на пучках частиц, получаемых от Протонного Суперсинхротрона (SPS) ЦЕРН, со смешанным 20 ГэВ электрон-пионным пучком, мюонами с энергиями от 120 до 290 ГэВ (что отвечает диапазону γ -фактора от 10^3 до $4 \cdot 10^4$).



Схематическое представление экспериментальной установки

Рассматриваемые конфигурации

На начальном этапе моделирования, рассматривался радиатор из полиэтилена при разных конфигурациях:

l_1 – толщина фольги радиатора – 91 мкм;

l_2 – зазор между фольгами – 0.3 мм, 0.5 мм, 0.7 мм, 1 мм, 2 мм, 3 мм;

N – число фольг в радиаторе – 90;

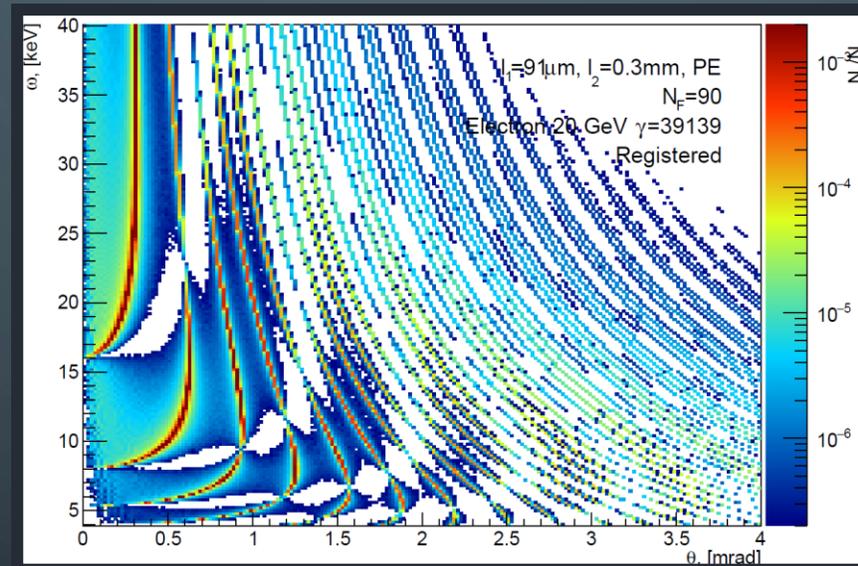
γ – гамма-фактор пролетающей частицы: 39139, 30000, 20000, 10000, 5000, 2838, 1703, 1135 и 500.

Далее, в качестве примера, будут приводиться распределения для $l_2 = 0.3$ мм.

Двумерные энергетически-угловые распределения

Двумерные энергетически-угловые распределения $\frac{d^2 N_\gamma}{d\theta d\omega}$ генерировались для всех комбинаций l_2 и γ -факторов. Построение зарегистрированных распределений осуществляется в три этапа:

1. Определяется энергия фотонов переходного излучения ω .
2. Используя полученную энергию ω , вводится угловая зависимость по θ .
3. Учитывается эффективность регистрации в детекторе.

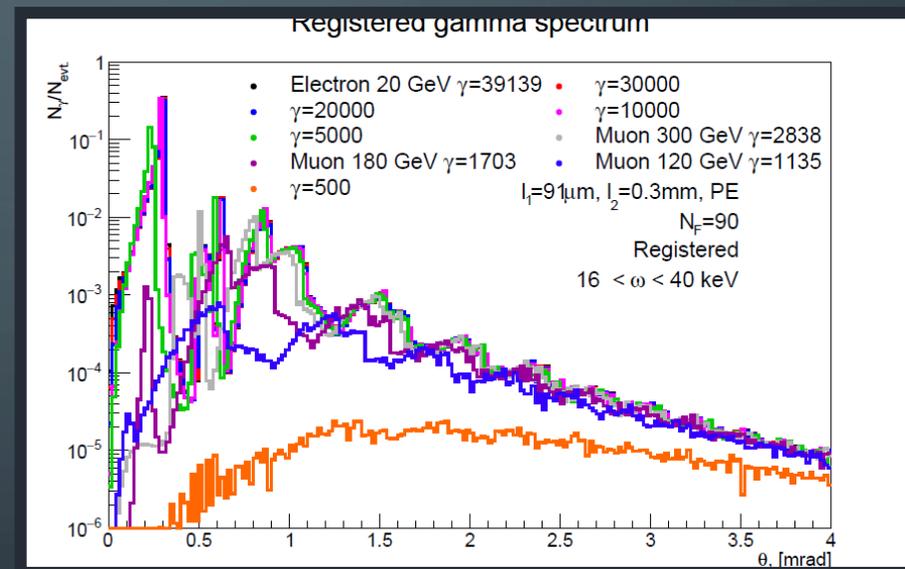
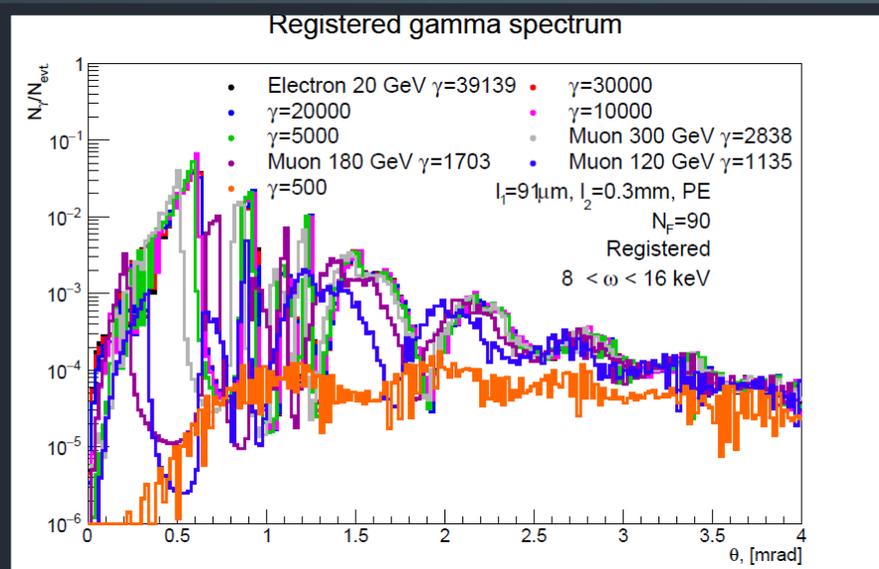


Зарегистрированное энергетически-угловое распределение переходного излучения (Полиэтилен, 90 пластин) для электронов с энергией 20 ГэВ.

Угловые распределения

Угловые распределения получаются в результате интегрирования двумерных спектров по энергии ω , в области 8-16 и 16-40 кэВ (два энергетических диапазона рассматриваются из-за различной чувствительности детекторных элементов к фотонам переходного излучения):

$$\frac{dN_\gamma}{d\theta} = \int_8^{16} \frac{d^2N_\gamma}{d\theta d\omega} d\omega + \int_{16}^{40} \frac{d^2N_\gamma}{d\theta d\omega} d\omega.$$



Угловые распределения фотонов ПИ в области энергий 8-16 кэВ (слева) и 16-40 кэВ (справа) для перехода воздух – полиэтилен с числом фольг радиаторов равным $N = 90$.

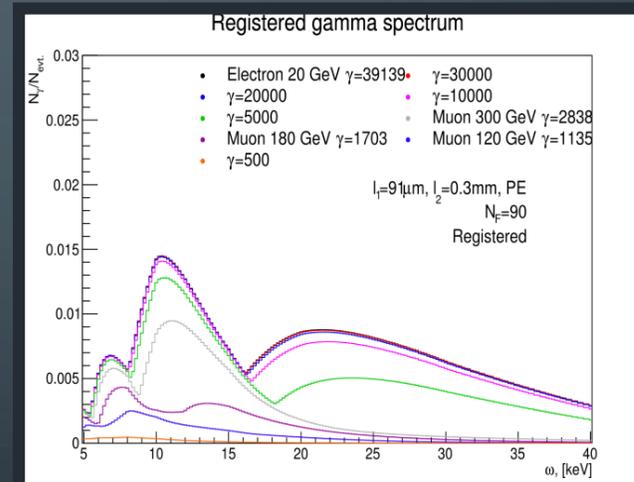
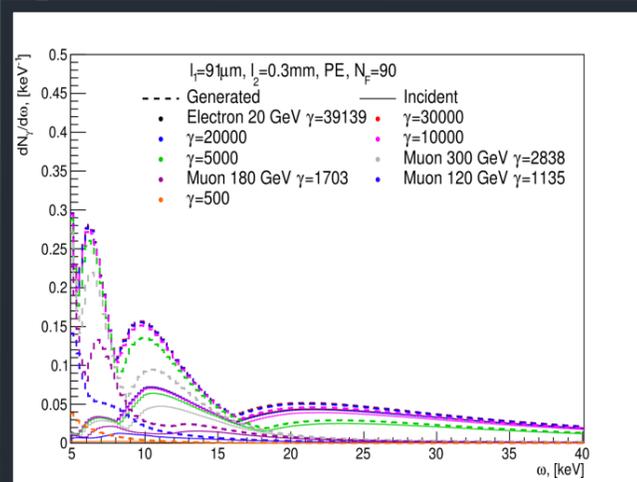
Энергетические распределения

Энергетические спектры получаются в результате интегрирования двумерных спектров по углу вылета фотонов переходного излучения θ , в области 0-4 мрад:

$$\frac{dN_\gamma}{d\omega} = \int_0^{0.004} \frac{d^2N_\gamma}{d\theta d\omega} d\theta.$$

Программа Radiator позволяет строить три типа энергетических спектра:

1. Сгенерированный
2. Спектр излучения после учёта поглощения
3. Зарегистрированный

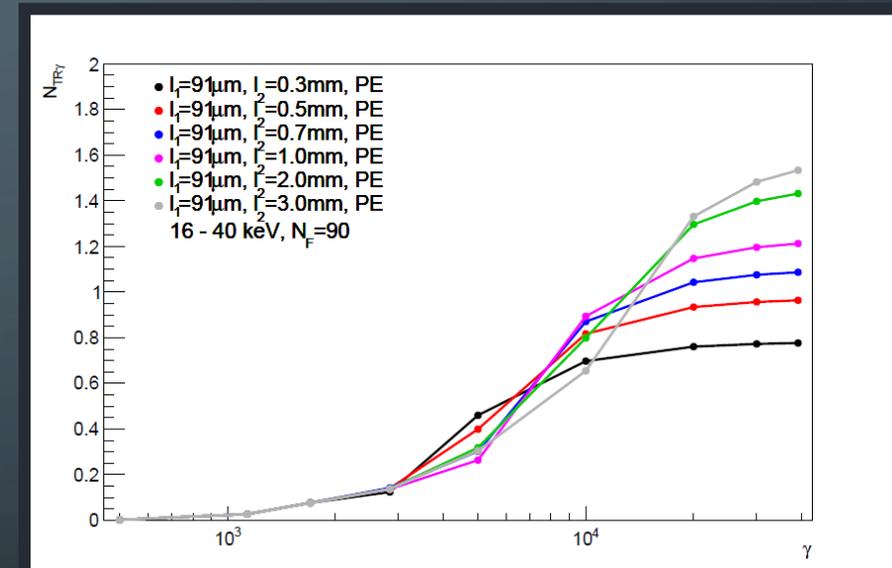
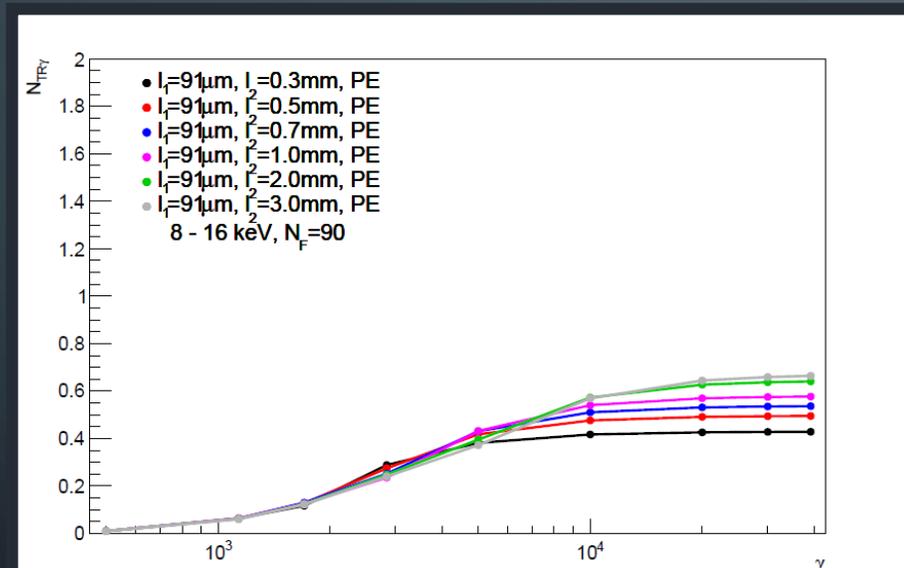


Энергетические спектры сгенерированный + поглощённый (слева) и зарегистрированный (справа) фотонов переходного излучения в диапазоне углов 0-4 мрад для перехода воздух – полиэтилен с числом пластин радиаторов равным $N = 90$.

Абсолютное число зарегистрированных фотонов

Абсолютное число зарегистрированных фотонов определяется в результате интегрирования двумерного энергетически-углового распределения по величине энергии ω в диапазоне 8-16 и 16-40 кэВ и в области значения углов от 0 до 4 мрад:

$$N_{\gamma} = \int_0^4 \int_8^{16} \frac{d^2 N_{\gamma}}{d\theta d\omega} d\theta d\omega + \int_0^4 \int_{16}^{40} \frac{d^2 N_{\gamma}}{d\theta d\omega} d\theta d\omega.$$



Графики зависимости абсолютного числа зарегистрированных фотонов переходного излучения в зависимости от гамма-фактора пролетающей частицы, 8-16 кэВ (слева) и 16-40 кэВ (справа).

Использование эффектов интерференции

После проведения начального моделирования, началась непосредственная работа, направленная на изучение возможности применения влияния эффектов интерференции на угловые распределения при разработке концепции детекторов переходного излучения. В процессе исследования также изучалось влияние толщины фольги радиатора и длины зазора между ними на изменение распределений переходного излучения. Рассматривался радиатор из полиэтилена, с различными параметрами, приведенными в таблице 1.

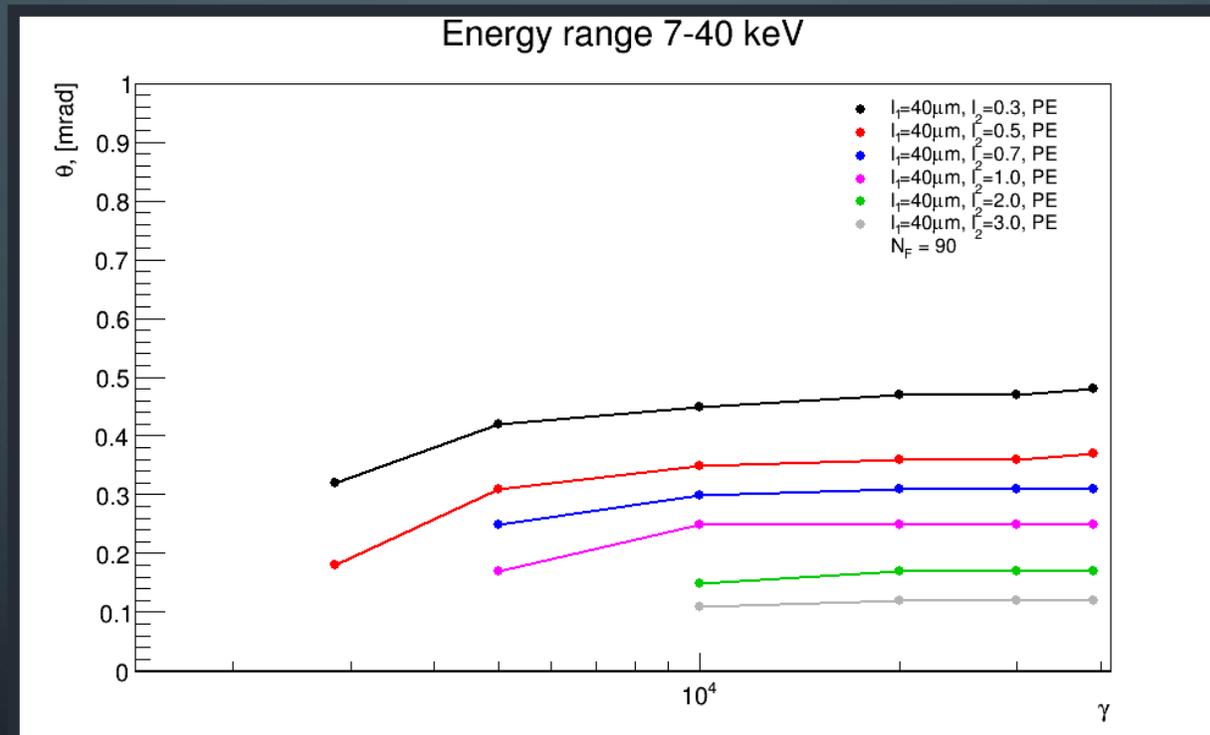
l_1 , мкм	15	20	25	30	40	50	60	70	75	80	85	91	
l_2 , мм							0.3						
							0.5						
							0.7						
							1.0						
							2.0						
							3.0						

Таблица 1 – Конфигурации толщин радиаторов и зазоров между фольгами

Использование эффектов интерференции

В результате анализа приведённых ранее распределений, были получены следующие зависимости:

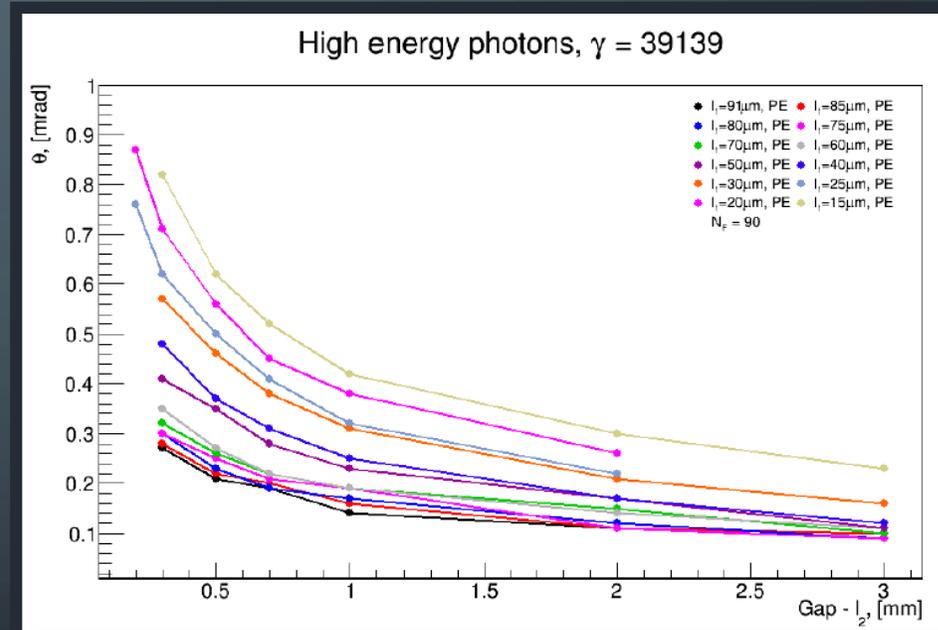
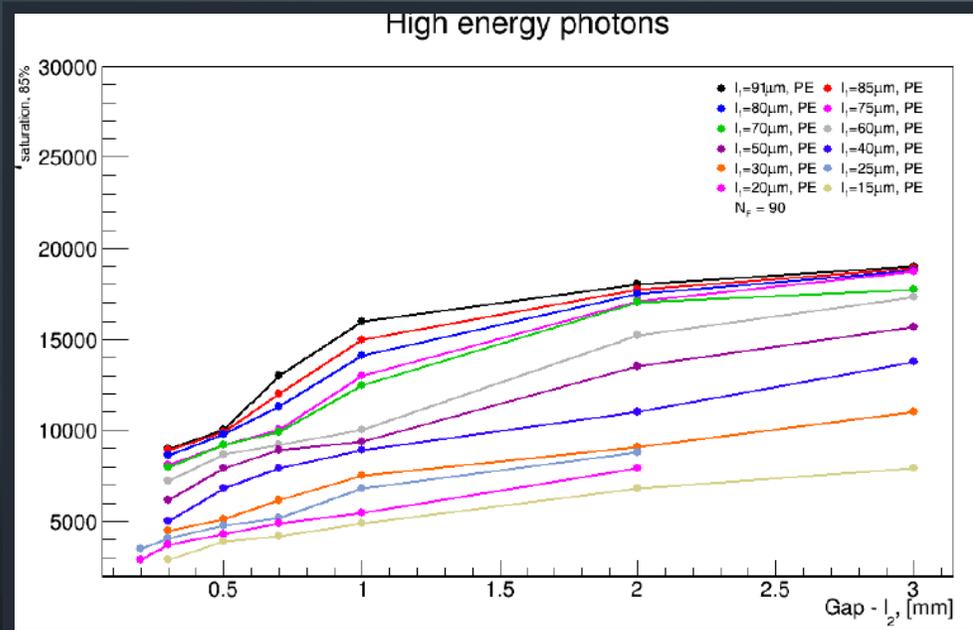
- Зависимость угла образования фотонов переходного излучения от величины γ -фактора частицы при разных значения l_2 (диапазон энергий 7-40 кэВ).



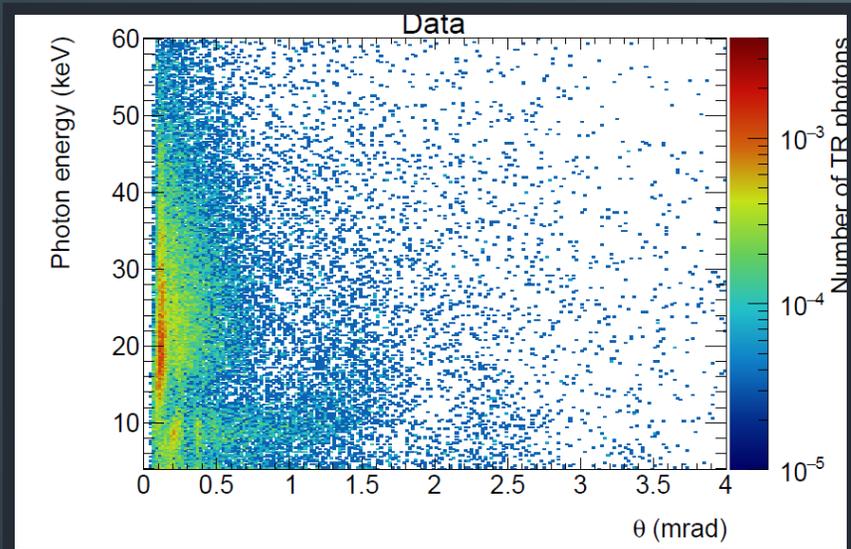
Использование эффектов интерференции

В результате анализа приведённых ранее распределений, были получены следующие зависимости:

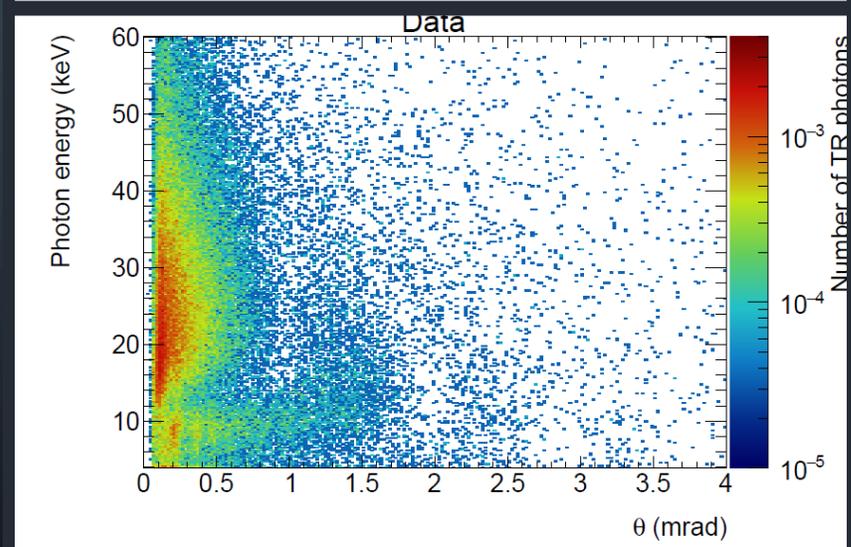
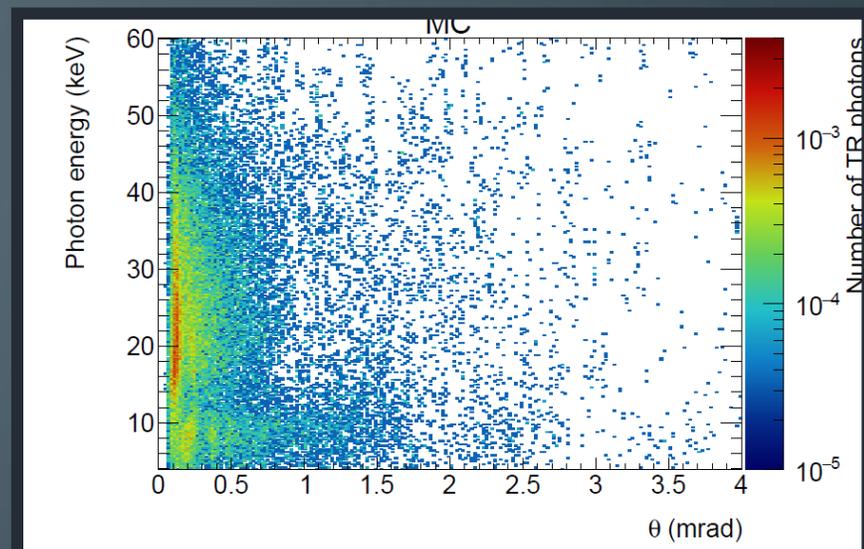
- Зависимость гамма-фактора насыщения γ_s (85%) (слева, диапазон энергий 13-40 кэВ) и угла образования фотонов переходного излучения (справа, $\gamma = 39139$) от зазора между фольгами l_2 при разных значениях l_1 .



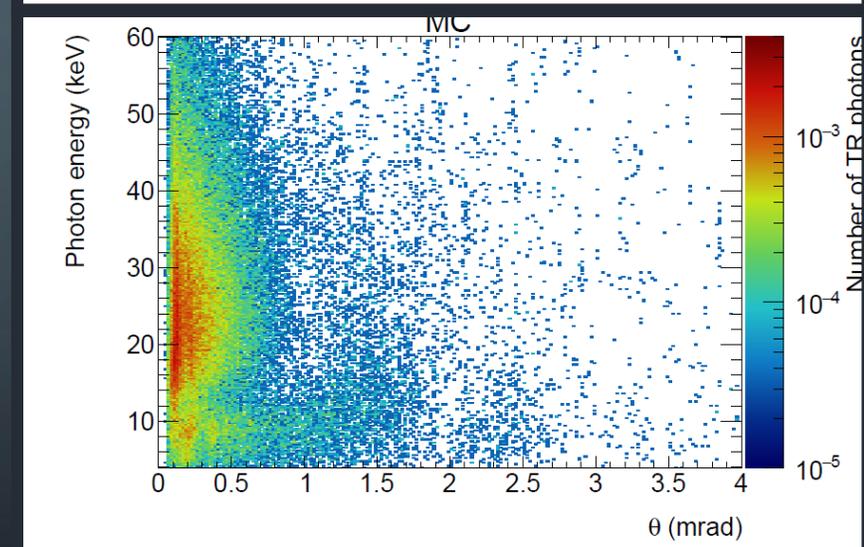
Сравнение экспериментальных данных с моделированием



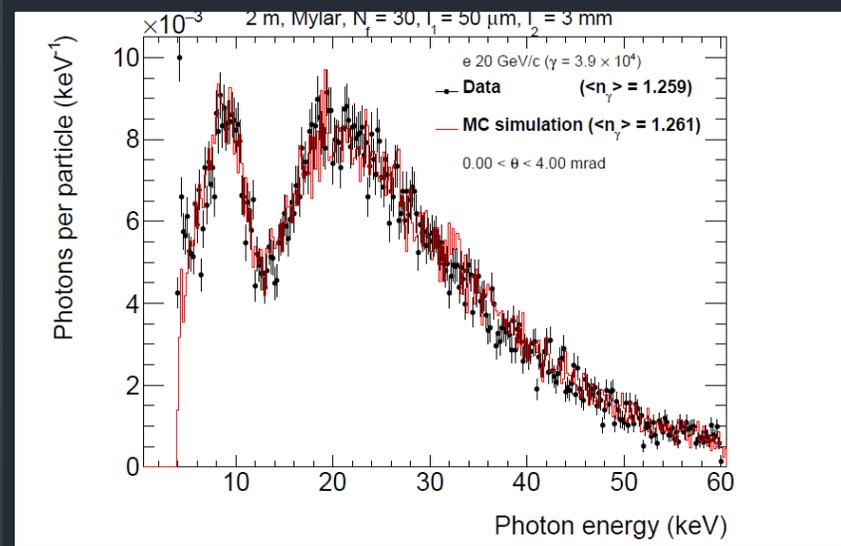
Майлар,
 $l_1 = 50$ мкм,
 $l_2 = 3$ мм,
30 фольг



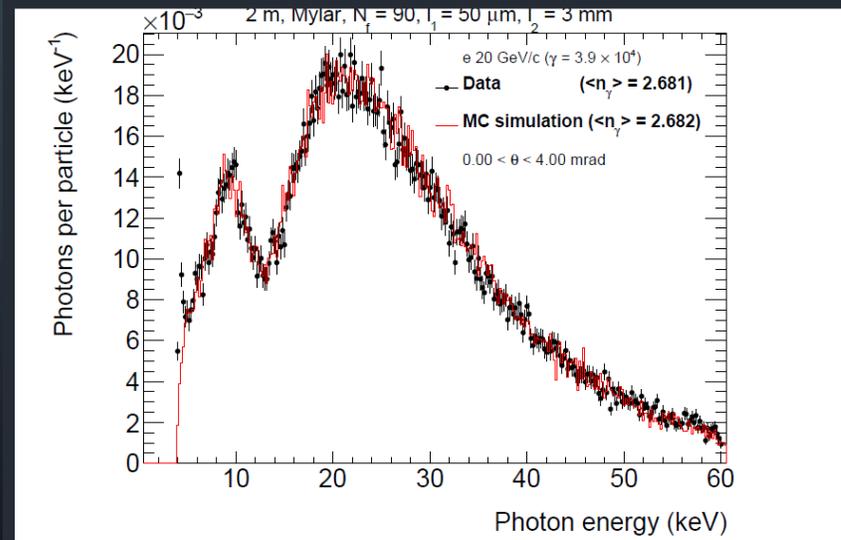
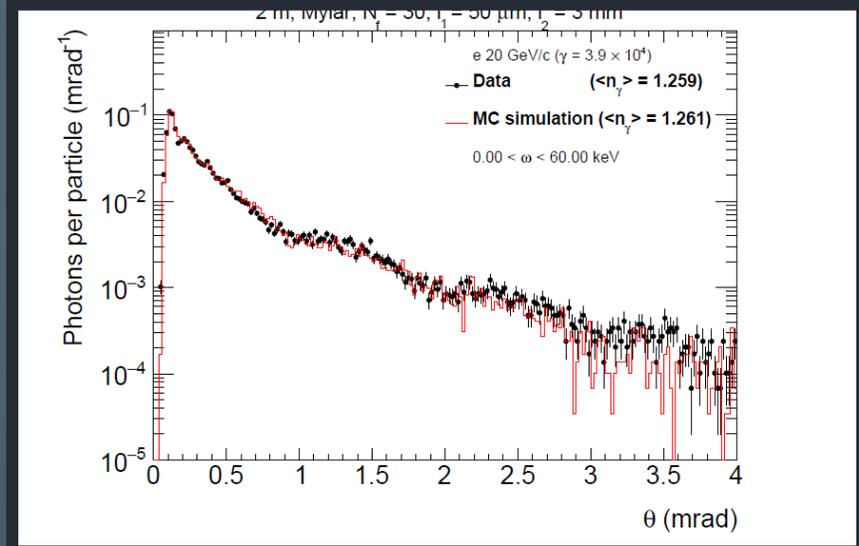
Майлар,
 $l_1 = 50$ мкм,
 $l_2 = 3$ мм,
90 фольг



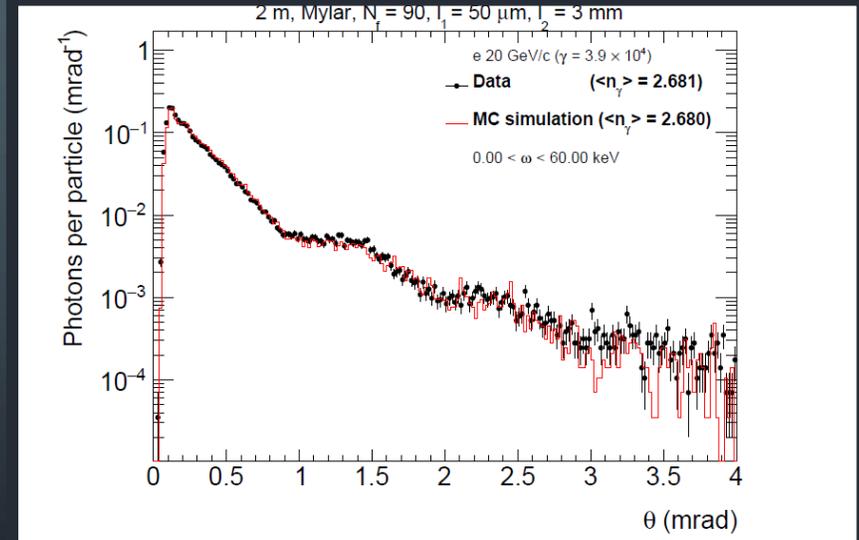
Сравнение экспериментальных данных с моделированием



Майлар,
 $l_1 = 50 \text{ мкм}$,
 $l_2 = 3 \text{ мм}$,
30 фольг



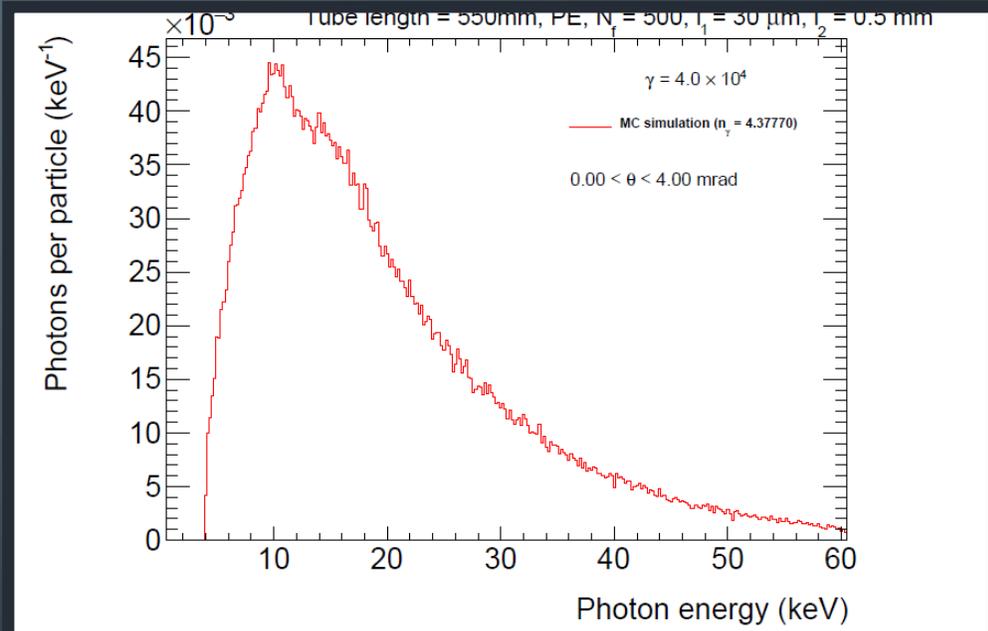
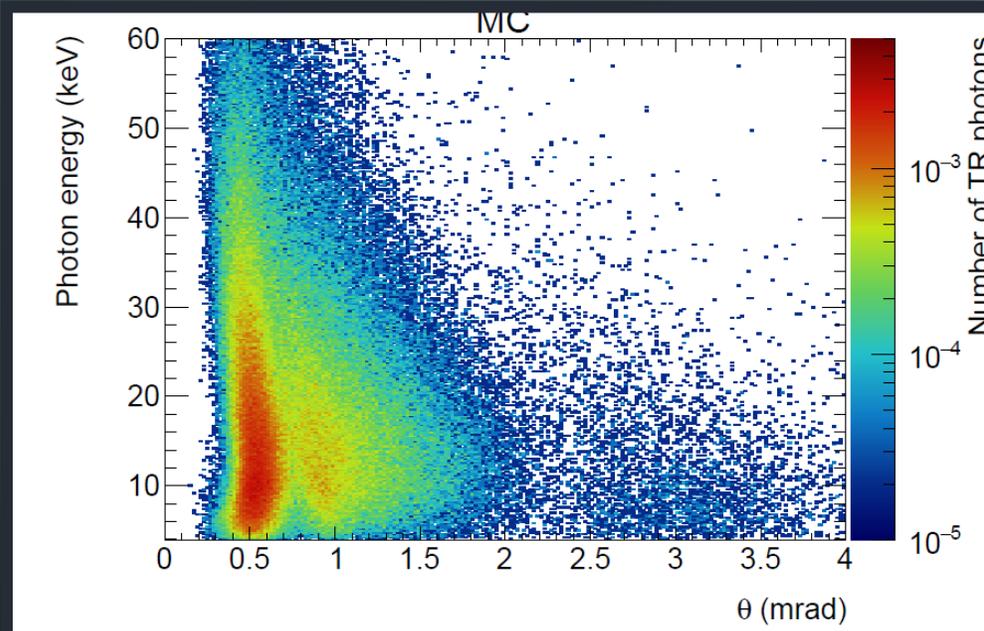
Майлар,
 $l_1 = 50 \text{ мкм}$,
 $l_2 = 3 \text{ мм}$,
90 фольг



Расчёты и оптимизация системы радиатор-детектор

После оптимизации, были выбраны детекторы со следующими параметрами полиэтиленовых радиаторов:

- Материал радиатора – полиэтилен, $l_1 = 30$ мкм, $l_2 = 0.5$ мм, $N = 500$.
- Расстояние между радиатором и детектором составляет 500 мм.

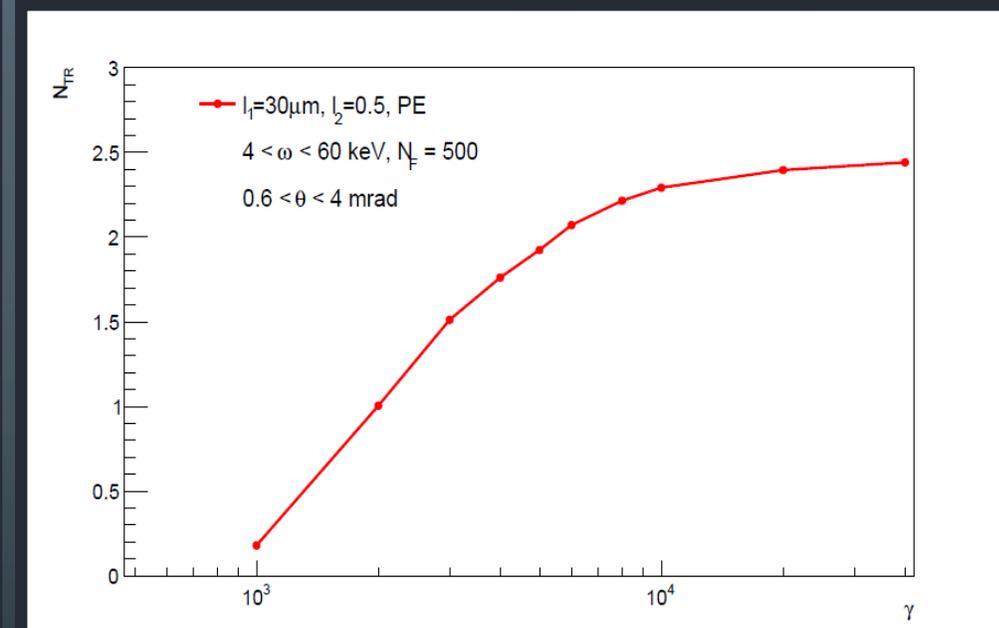
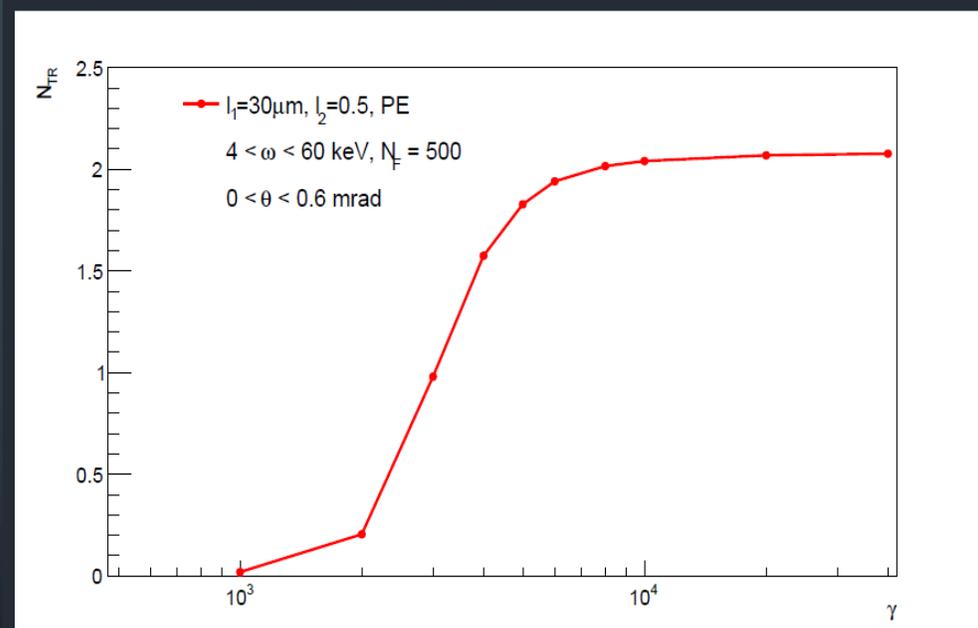


Двумерное энергетически-угловое распределение фотонов (слева) и спектр переходного излучения (справа) для радиатора из полиэтилена, $\gamma = 4 \cdot 10^4$, $l_1 = 30$ мкм, $l_2 = 0.5$ мм, $N = 500$.

Расчёты и оптимизация системы радиатор-детектор

После оптимизации, были выбраны детекторы со следующими параметрами полиэтиленовых радиаторов:

- Материал радиатора – полиэтилен, $l_1 = 30$ мкм, $l_2 = 0.5$ мм, $N = 500$.
- Расстояние между радиатором и детектором составляет 500 мм.

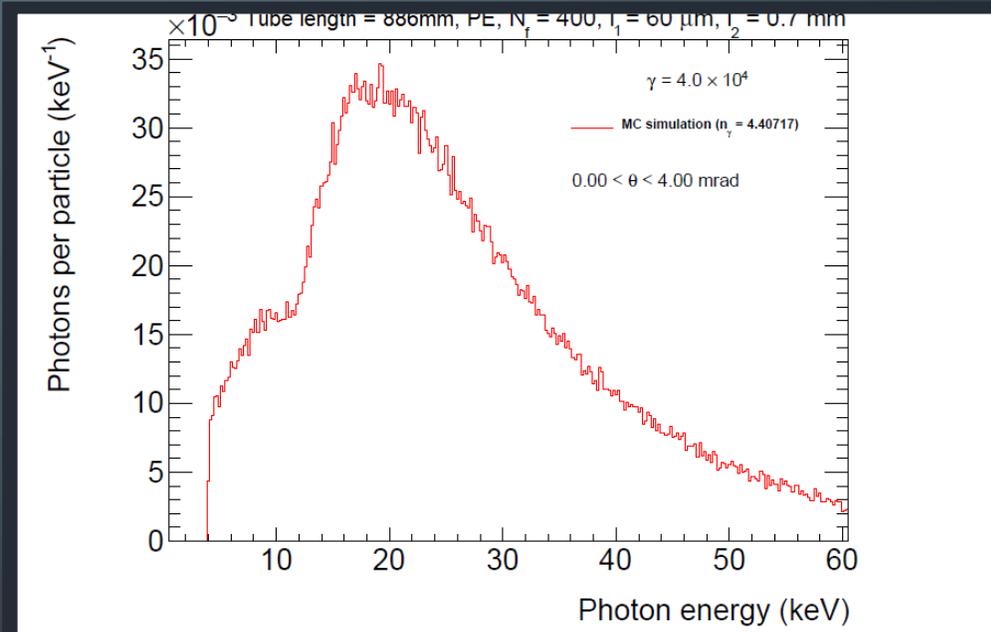
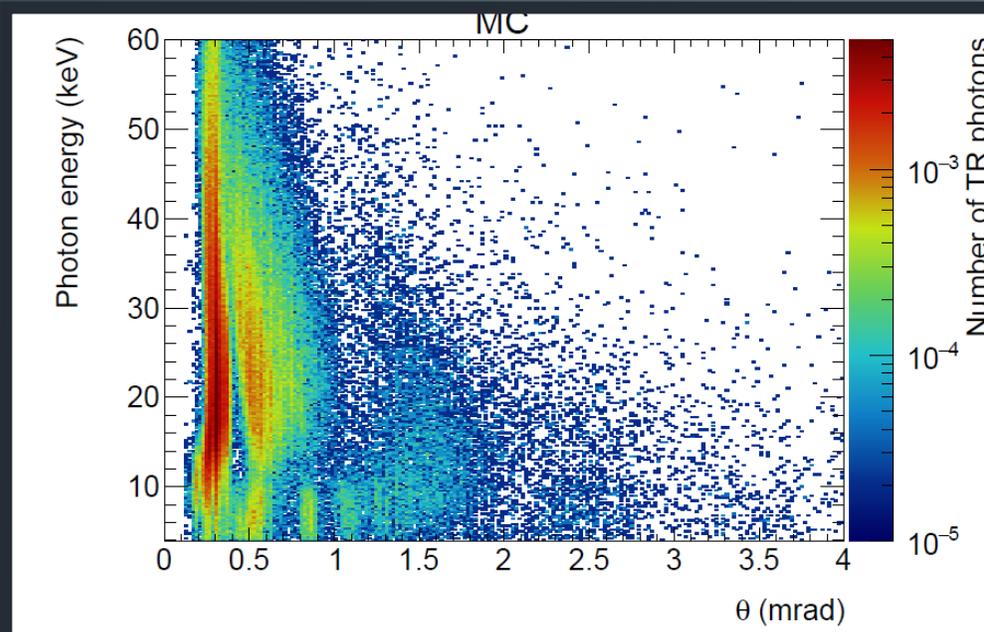


Зависимости зарегистрированного числа фотонов переходного излучения как функция γ -фактора частицы, диапазоны углов: слева – $0-0.6$ мрад, справа – >0.6 мрад.

Расчёты и оптимизация системы радиатор-детектор

После оптимизации, были выбраны детекторы со следующими параметрами полиэтиленовых радиаторов:

- Материал радиатора – полиэтилен, $l_1 = 60$ мкм, $l_2 = 0.7$ мм, $N = 400$.
- Расстояние между радиатором и детектором составляет 886 мм.

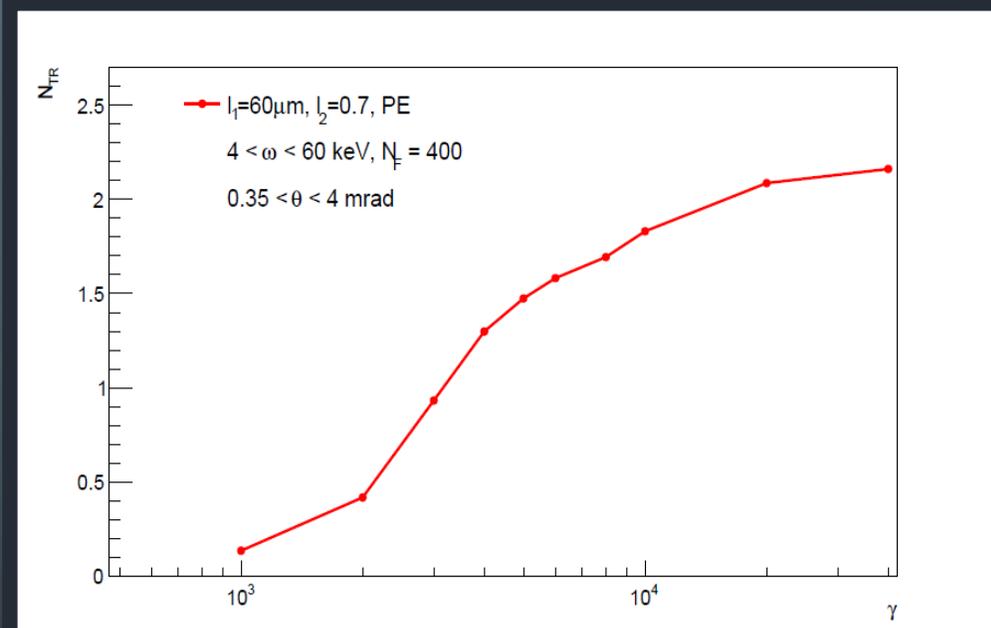
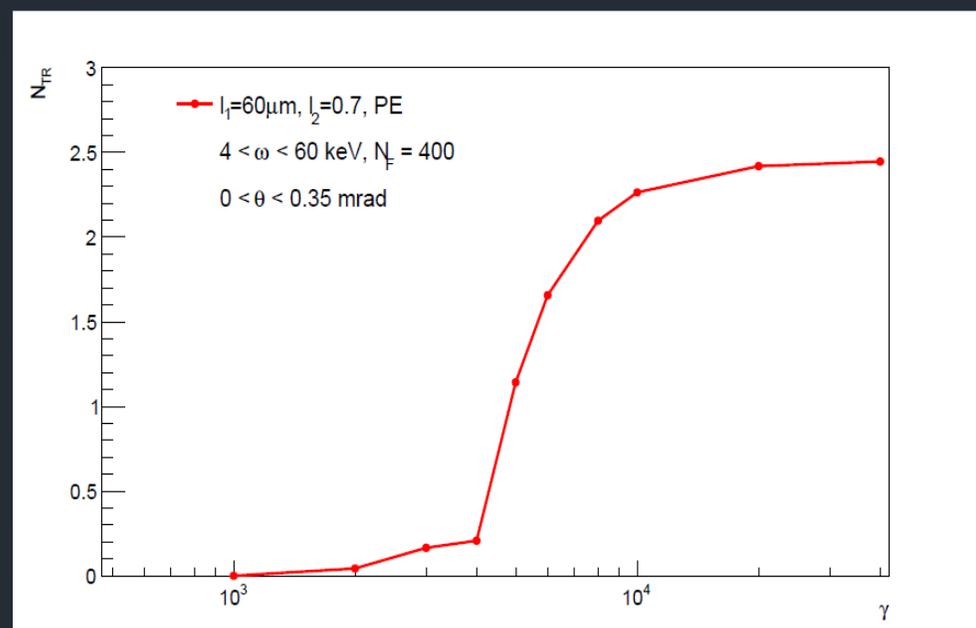


Двумерное энергетически-угловое распределение фотонов (слева) и спектр переходного излучения (справа) для радиатора из полиэтилена, $\gamma = 4 \cdot 10^4$, $l_1 = 60$ мкм, $l_2 = 0.7$ мм, $N = 400$.

Расчёты и оптимизация системы радиатор-детектор

После оптимизации, были выбраны детекторы со следующими параметрами полиэтиленовых радиаторов:

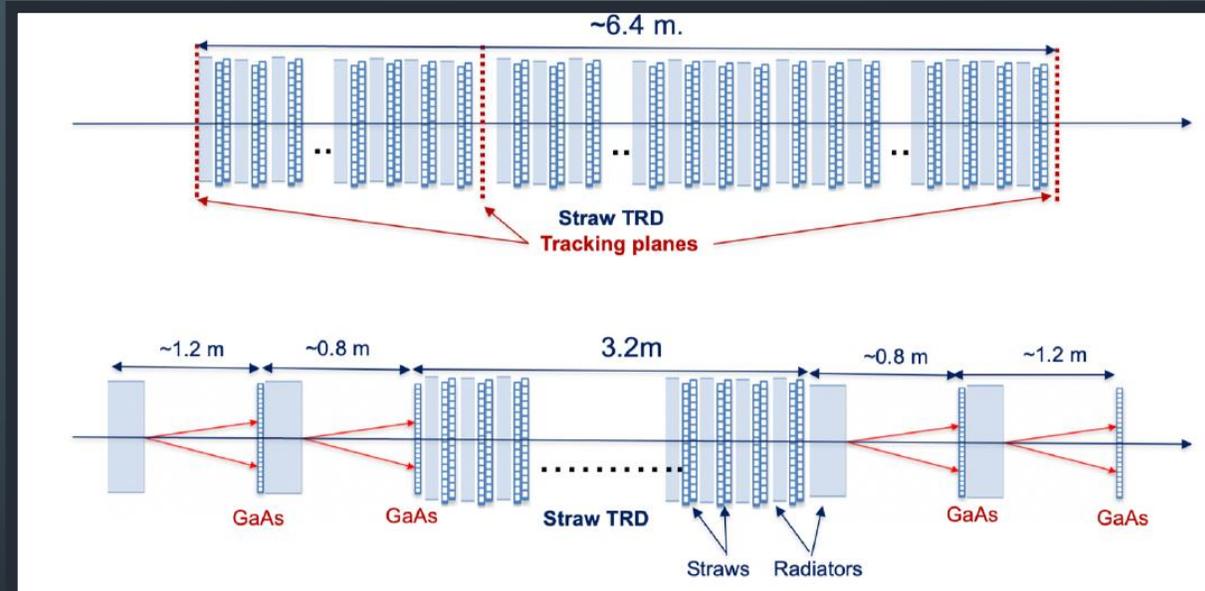
- Материал радиатора – полиэтилен, $l_1 = 60$ мкм, $l_2 = 0.7$ мм, $N = 400$.
- Расстояние между радиатором и детектором составляет 886 мм.



Зависимости зарегистрированного числа фотонов переходного излучения как функция γ -фактора частицы, диапазоны углов: слева – $0-0.35$ мрад, справа – >0.35 мрад.

Концепция детекторов переходного излучения

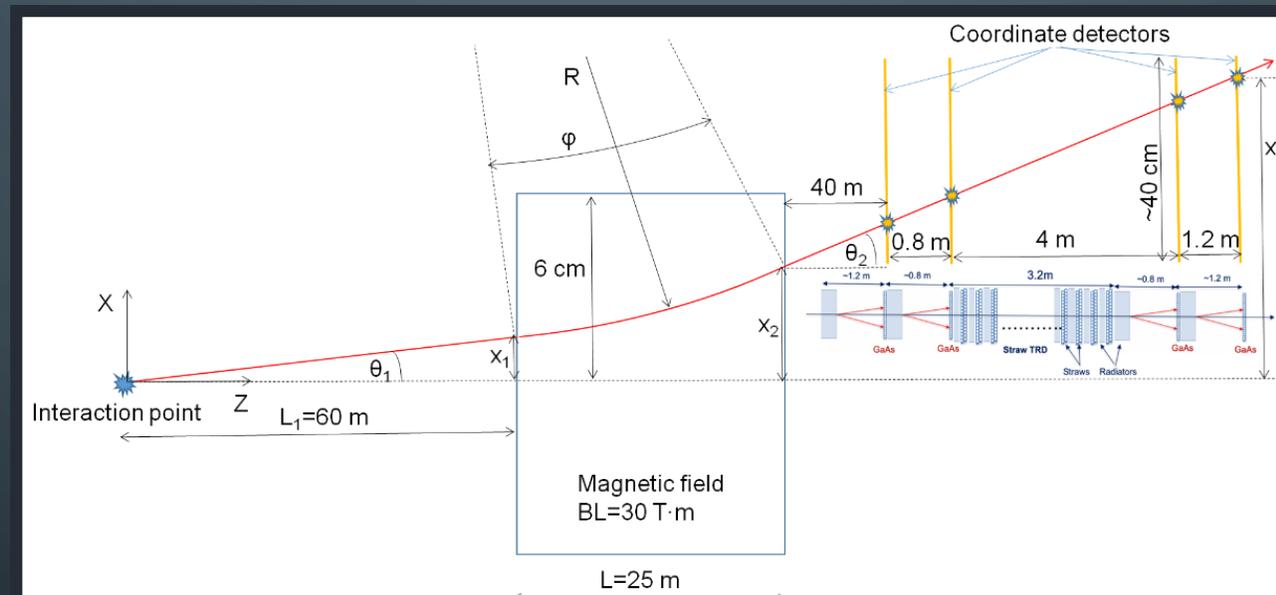
- ДПИ на основе straw – позволяют работать как с низко, так и с высокоэнергетичным спектром фотонов переходного излучения. Регистрируют ПИ вместе с ионизационными потерями частиц.
- ДПИ на основе высокогранулярной полупроводниковой технологии (Si или GaAs). Обеспечивают дополнительную информацию по гамма-фактору частицы за счёт одновременных прецизионных измерений спектральных и угловых распределений ПИ.



Схематическое изображение концепции детекторов переходного излучения для экспериментов в прямом направлении на LHC.

Экспериментальная установка

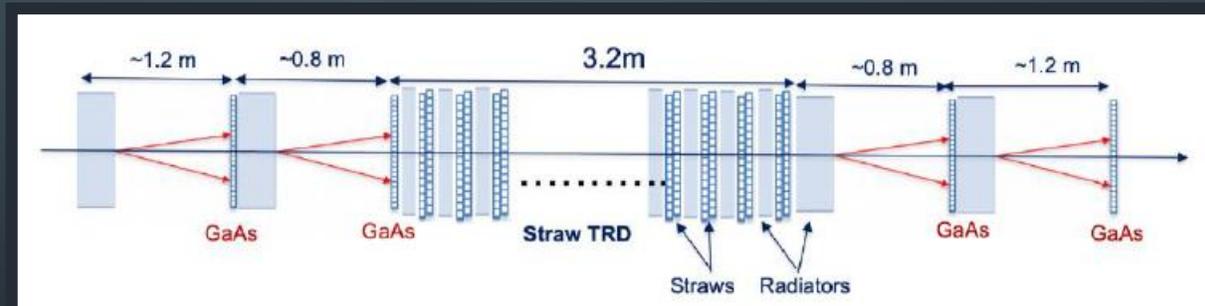
Предполагается, что детектор будет расположен в 125 м от точки взаимодействия протонов. Большой дипольный магнит длиной 25 м будет отделять вторичные частицы от пучка протонов LHC. Данная геометрия описывает только части, связанные с трекингом и детекторами переходного излучения. Калориметры и мюонная система будут располагаться после них. Характеристики двух предлагаемых концепций детекторов, упомянутых выше, были предложены именно для этой геометрии.



Схематическое изображение возможной геометрии эксперимента в прямом направлении на LHC.

Концепция ДПИ на основе Straw/GaAs технологий

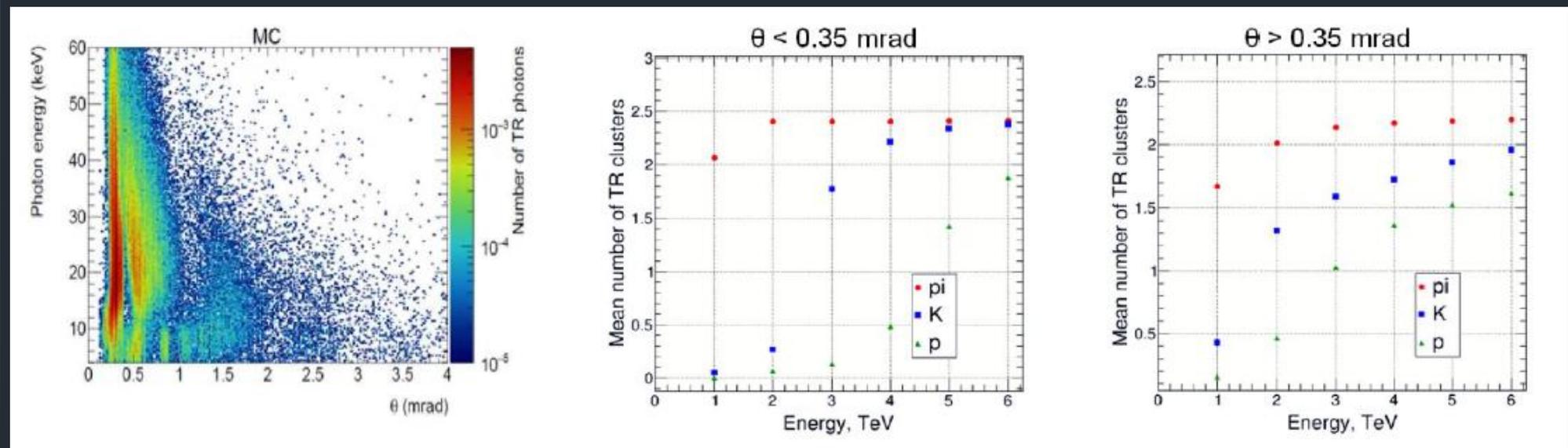
- Две детекторные подсистемы на основе straw. Первая подсистема состоит из 36 наборов радиаторов, чередующихся с двойными слоями straw детекторов. Каждый радиатор состоит из 40 полиэтиленовых (PE) фольг толщиной 30 мкм с зазором 0.3 мм. Вторая – из 54 наборов радиаторов, также чередующихся с двойными слоями straw. Радиатор здесь состоит из 15 PE фольг толщиной 75 мкм с зазором 2 мм. Рабочее газовое давление в straw составляет 1.5 бар.
- Четыре GaAs-полупроводниковых детектора переходного излучения. С целью достижения наилучшего покрытия по γ -фактору, в двух детекторах применяются радиаторы, состоящие из 400 PE фольг толщиной 60 мкм с зазором 0.7 мм. В остальных двух – радиаторы по 500 PE фольг толщиной 30 мкм с зазором 0.5 мм. Расстояние между радиаторами и детекторами составляют 0.88 и 0.55 м соответственно.



Схематическое изображение концепции детекторов переходного излучения на основе Straw/GaAs технологий.

Концепция ДПИ на основе Straw/GaAs технологий

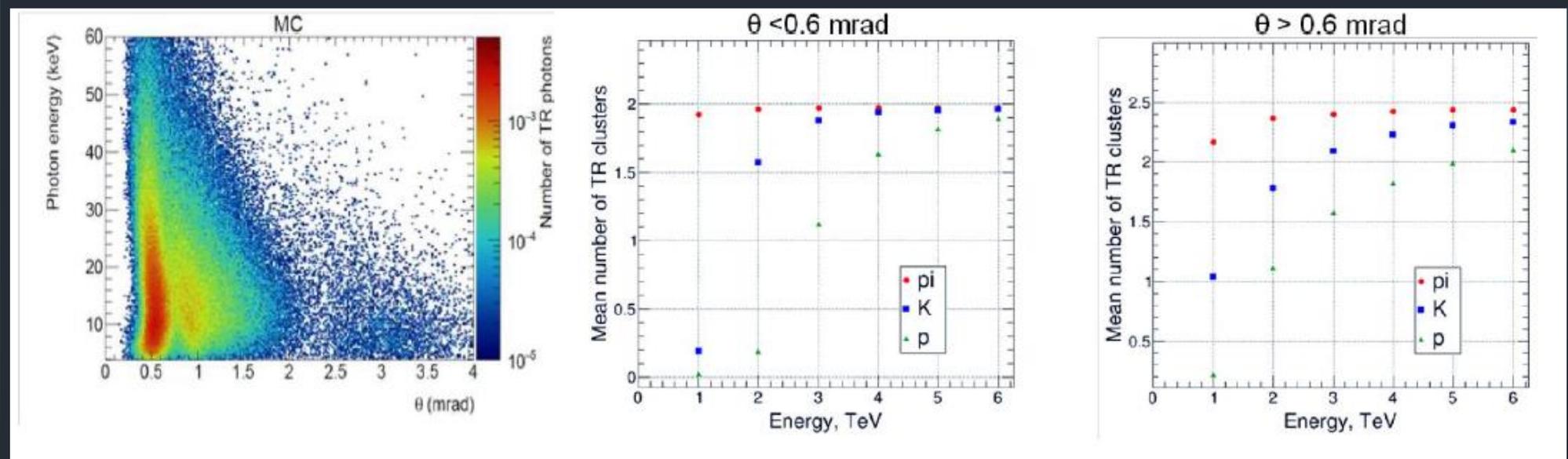
Так как радиаторы состоят из большого количества фольг, мягкая часть спектра фотонов переходного излучения поглощается в них самих, что приводит к невозможности использования нескольких диапазонов энергий для получения различных γ -зависимостей. Однако, для этой цели можно использовать угловую информацию.



Двумерное энергетически-угловое распределение переходного излучения для 60 мкм РЕ радиатора (слева) и среднее число зарегистрированных фотонов от протонов, каонов и пионов при значении углов меньше 0.35 мрад (по центру) и больше (справа).

Концепция ДПИ на основе Straw/GaAs технологий

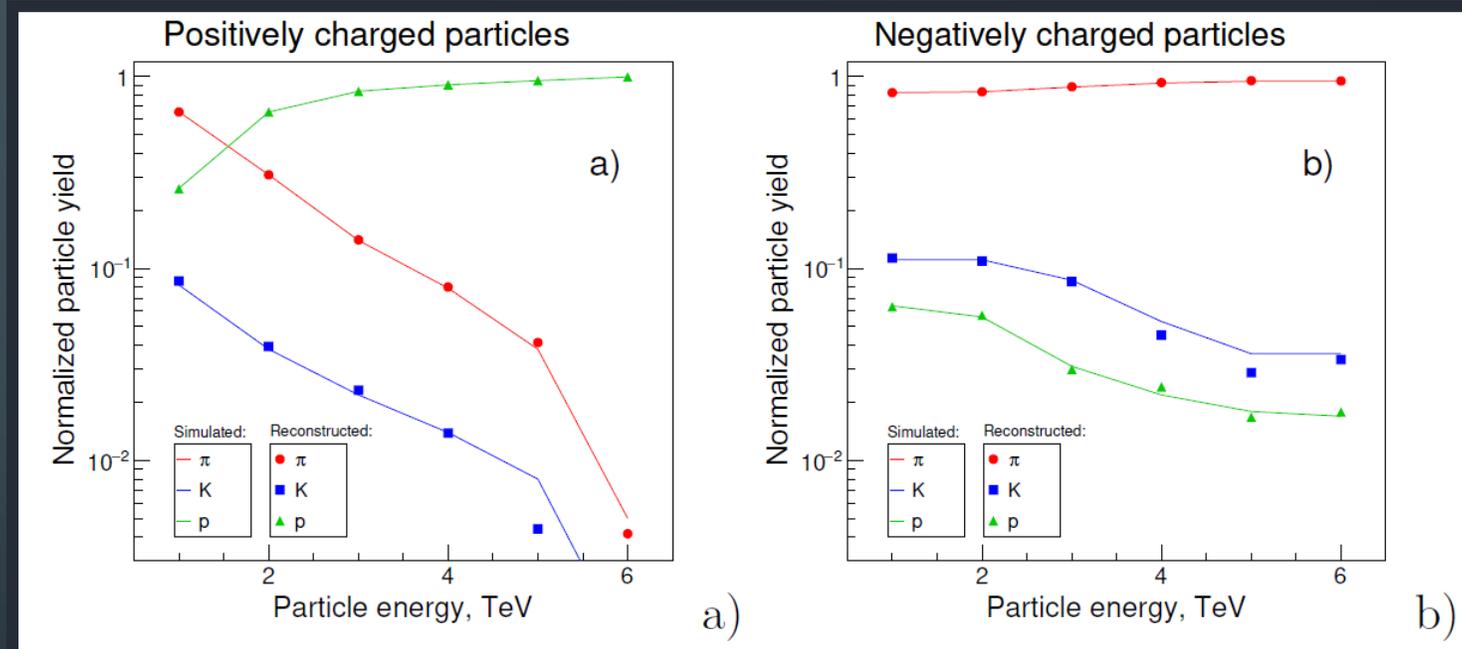
Так как радиаторы состоят из большого количества фольг, мягкая часть спектра фотонов переходного излучения поглощается в них самих, что приводит к невозможности использования нескольких диапазонов энергий для получения различных γ -зависимостей. Однако, для этой цели можно использовать угловую информацию.



Двумерное энергетически-угловое распределение переходного излучения для 30 мкм РЕ радиатора (слева) и среднее число зарегистрированных фотонов от протонов, каонов и пионов при значении углов меньше 0.6 мрад (по центру) и больше (справа).

Идентификация частиц

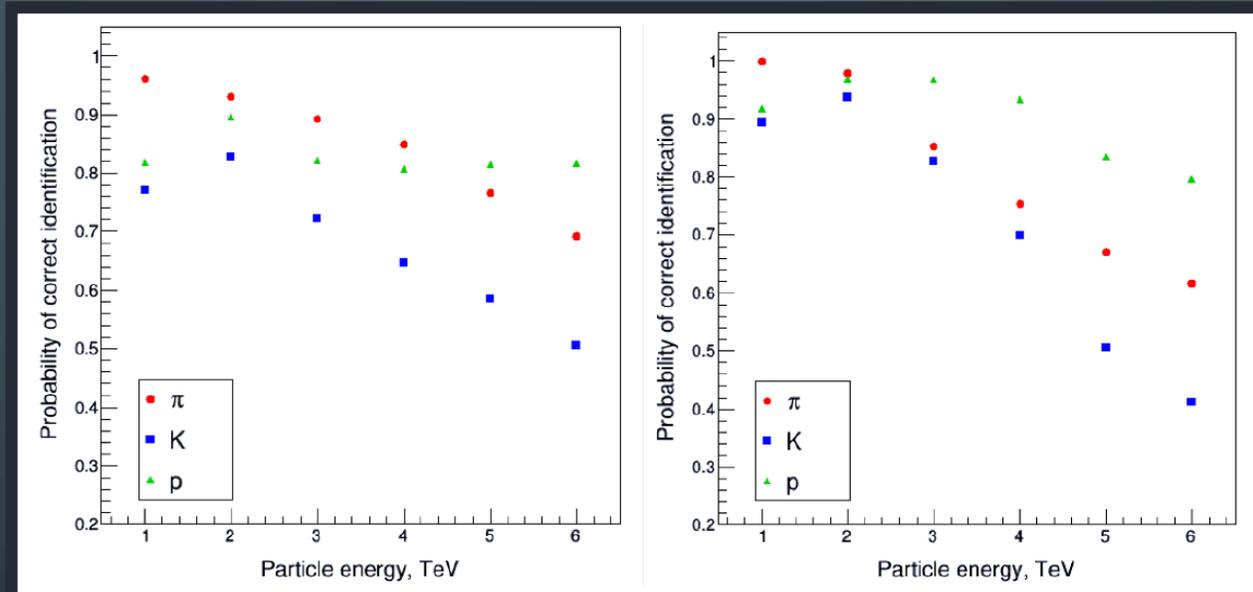
Для восстановления спектра адронов использовался метод, основанный на Байесовском подходе. В нём величина априорных вероятностей, которые считаются лучшим выбором об истинном типе частицы в событии, определяется посредством итерационной процедуры.



Состав адронов, восстановленный по методу Байеса. Сплошные линии отвечают доле частиц, сгенерированной в p - p столкновениях на ЛHC в прямом направлении, точки – восстановленная доля частиц различного типа, положительно (a) и отрицательно (b) заряженные частицы.

Идентификация частиц

Для идентификации частиц в отдельных событиях, применялся метод максимального правдоподобия. Значение для гипотезы о сорте частицы в детекторе переходного излучения на основе straw определялось как комбинация трёх вероятностей: $L_i = P_{1i}P_{2i}P_{3i}$, где индекс i отвечает типу частицы: пион, каон или протон. P_1, P_2, P_3 – вероятность получить отклик со straw детекторов в диапазоне энергий 1-6 ТэВ.



Доля различного типа адронов, идентифицированных верно, в зависимости от энергии частицы для детектора переходного излучения на основе straw (слева) и комбинации GaAs/Straw (справа).

Заключение

Данная научно-квалификационная работа посвящена разработке концепции детекторов переходного излучения для разделения адронов в ТэВ-ной области энергий.

В результате проделанной работы было проведено систематическое изучение свойств и характеристик радиаторов, подходящих для применения при разработке концепции детекторов переходного излучения с использованием интерференционных эффектов в радиаторах.

Впервые было показано, что вопреки общепринятому закону, угол вылета ПИ $\sim 1/\gamma$, угол вылета ПИ, соответствующий последнему интерференционному максимуму энергетического распределения, растет с увеличением γ -фактора частицы.

Впервые с помощью пиксельных полупроводниковых детекторов были экспериментально изучены спектрально-угловые характеристики ПИ от различных радиаторов.

Разработан комплекс программ по моделированию детекторов переходного излучения на основе пиксельных детекторов, описывающий экспериментальные данные с высокой точностью, включающий в себя модель GaAs-полупроводникового детектора на основе микросхемы считывания TimePix3.

Впервые была изучена возможность создания ДПИ на основе пиксельного детектора, где в качестве чувствительного элемента используется GaAs.

Впервые разработана и предложена концепция детекторов переходного излучения для разделения адронов в ТэВ-ном диапазоне энергий и показаны его возможности.

Заключение

Апробация работы. Основные результаты научно-квалификационной работы докладывались и обсуждались на международных рабочих совещаниях «TRD WS: Semiconductor Detectors» (Женева, ЦЕРН, 2019 и 2020), на рабочих совещаниях и семинарах группы ATLAS НИЯУ МИФИ, а также были доложены на международных конференциях (ICPPA и другие).

Личный вклад. Научно-квалификационная работа является результатом исследований автора, проводившихся на базе экспериментальных комплексов Европейской Организации по Ядерным Исследованиям (ЦЕРН) и НИЯУ МИФИ. Личный вклад автора включает в себя выбор методов решения поставленных задач, подготовку и проведение экспериментов, выполнение расчётов, обработку и анализ полученных экспериментальных данных.

Публикации. Основные результаты выпускной квалификационной работы изложены в 11 статьях в журналах, входящих в международную базу данных Scopus.

The background is a dark blue gradient. In the four corners, there are white, stylized circuit board traces. These traces consist of straight lines that bend at 90-degree angles, ending in small white circles that represent components or connection points. The traces are more densely packed in the corners and become sparser towards the center.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СЛАЙДЫ

Моделирование процессов переходного излучения в радиаторах

Моделирование процессов осуществлялось в специально разработанной программе Radiator. Она позволяет строить двумерные спектры, энергетические и угловые распределения для фотонов переходного излучения при различных конфигурациях радиаторов.

Radiator рассчитывает энергию фотонов по следующей зависимости:

$$\frac{dN_\gamma}{d\omega} = \frac{4\alpha N}{\omega(1+\tau)} \sum_n \theta_n \left(\frac{1}{\rho_1 + \theta_n} - \frac{1}{\rho_2 + \theta_n} \right)^2 (1 - \cos(\rho_1 + \theta_n)), \quad (1)$$

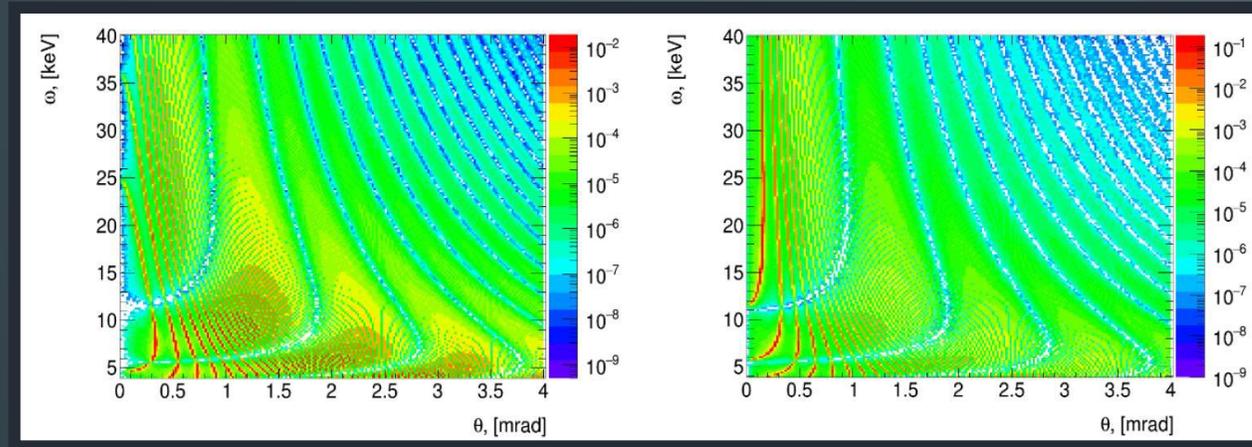
где

$$\rho_i = \frac{\omega l_i}{2c} \left(\gamma^{-2} + \frac{\omega_i^2}{\omega^2} \right), \quad \theta_n = \frac{2\pi n - (\rho_1 + \tau \rho_2)}{1 + \tau}, \quad \tau = \frac{l_2}{l_1}$$

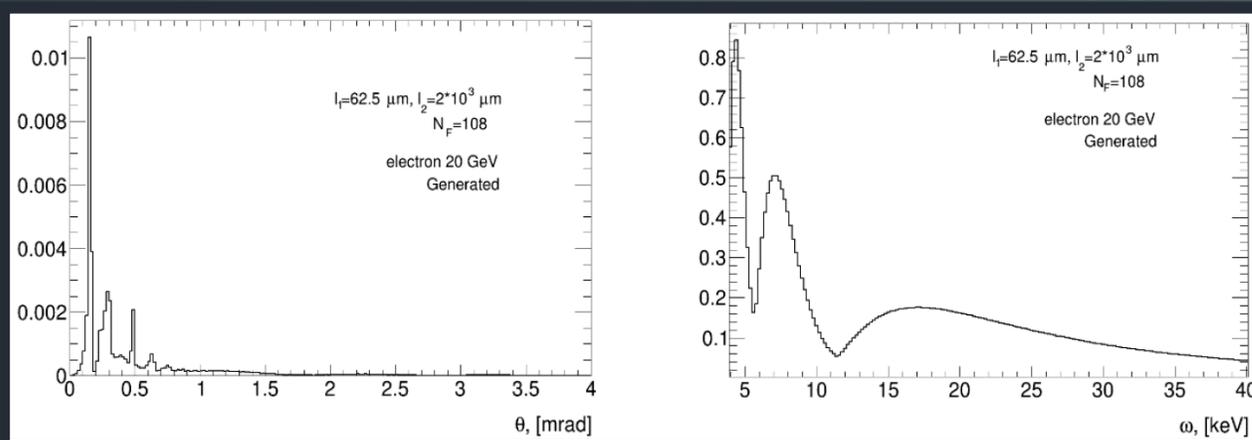
Затем, основываясь на полученном значении энергии ω , вводится угловая зависимость по заданной формуле:

$$\frac{d^2 N_\gamma}{d\theta d\omega} = \frac{2\alpha h \theta^3}{\omega \pi} \left(\frac{1}{\gamma^{-2} + \theta^2 + \frac{\omega_1^2}{\omega^2}} - \frac{1}{\gamma^{-2} + \theta^2 + \frac{\omega_2^2}{\omega^2}} \right) 4 \sin^2 \left[\frac{l_1}{z_1} \right] \frac{\sin^2 \left[N \left(\frac{l_1 + l_2}{z_1 z_2} \right) \right]}{\sin^2 \left[\left(\frac{l_1 + l_2}{z_1 z_2} \right) \right]}. \quad (2)$$

Моделирование процессов переходного излучения в радиаторах



Частотно-угловые распределения фотонов ПИ для системы воздух-полипропилен с числом пластин радиаторов равным $N=108$ для мюонов с энергией 180 ГэВ (слева) и электронов с энергией 20 ГэВ (справа).



Распределения сгенерированных фотонов ПИ, интегральные по частотам и углам в диапазонах 6–40 кэВ и 0–4 мрад, для системы воздух-полипропилен в зависимости от угла вылета фотона (слева) и его частоты (справа). Распределения получены для электронов с энергией 20 ГэВ с числом пластин радиаторов равным $N=108$.

Моделирование ДПИ на основе TimePix3 и GaAs:Cr

При моделировании считалось, что радиаторы обладают регулярной структурой в толщине фольги и зазорах между ними. В таком случае, дифференциальные двумерные энергетически-угловые распределения фотонов переходного излучения описываются следующей зависимостью:

$$\frac{d^2 N_{gen}}{d\theta d\omega} = \frac{d^2 N_0}{d\theta d\omega} 4 \sin^2 \left[\frac{l_1}{z_1} \right] \frac{\sin^2 \left[N \left(\frac{l_1 + l_2}{z_1 + z_2} \right) \right]}{\sin^2 \left[\frac{l_1 + l_2}{z_1 + z_2} \right]},$$

где

$$\frac{d^2 N_0}{d\theta d\omega} = \frac{1}{c} \theta^3 \left(\frac{qe\omega}{4\pi c} \right)^2 (z_1 - z_2)^2$$

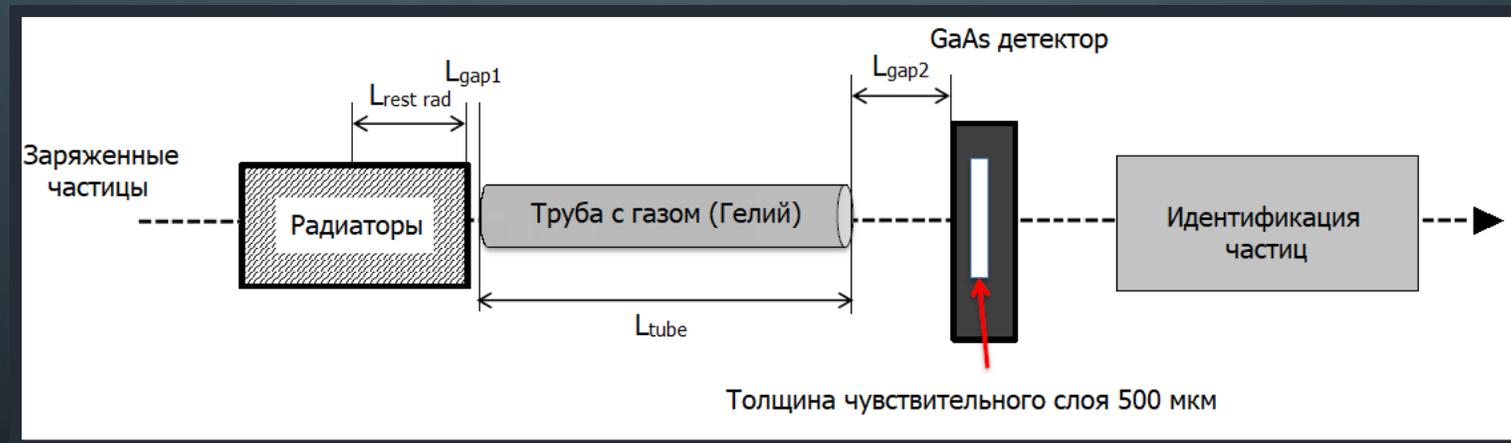
и

$$z_{1,2} = \frac{4c}{\omega} \frac{1}{\gamma^{-2} + \frac{l_{1,2}^2}{\omega^2} + \theta^2}$$

В данных формулах N_{gen} – число сгенерированных фотонов переходного излучения, ω – их энергия, θ – угол испускания фотонов переходного излучения, l_1 , l_2 – толщина пластин радиатора и зазор между ними, соответственно, ω_1 – плазменная частота материала пластин, ω_2 – плазменная частота воздуха, N – число пластин радиатора, z_1 и z_2 – зоны формирования переходного излучения в пластине радиатора и воздухе, γ – гамма-фактор пролетающей частицы.

Моделирование ДПИ на основе TimePix3 и GaAs:Cr

- Число фотонов переходного излучения, образующихся в каждом событии, разыгрывается по распределению Пуассона со средним N_{gen} .
- Считается, что они могут испускаться в любой фольге радиатора с одинаковой вероятностью.
- Итоговое расстояние, которое проходит фотон от места генерации до детектора, определяется суммой $L_\gamma = L_{rest\ rad} + L_{gap1} + L_{tube} + L_{gap2}$.



Моделирование ДПИ на основе TimePix3 и GaAs:Cr

- Многократное рассеяние моделируется на основе аппроксимации, предложенной PDG [1]. Пространственный угол рассеянной частицы извлекается из распределения Гаусса с сигмой, заданной выражением:

$$\sigma_{\theta} = \sqrt{2} \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} Z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.0038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right],$$

где p , βc и Z – импульс, скорость и зарядовое число заряженной частицы, x – толщина радиатора, который она пересекает после испускания переходного излучения, а X_0 – радиационная длина материала.

- Координаты частицы на плоскости детектора определяются с помощью пространственного угла и расстояния между радиатором и детектором, при этом считается, что имеется азимутальная симметрия многократного рассеяния относительно пучка частиц.

[1] <http://pdg.lbl.gov/2005/reviews/passagerpp.pdf>

Моделирование ДПИ на основе TimePix3 и GaAs:Cr

Поглощение фотонов учитывается во всех материалах: фольгах радиаторов, воздухе, тонких полиэтиленовых окнах трубы, наполненной гелием, в самом гелии, покрытии (никель) и материале датчика (GaAs). Вероятность поглощения в i -том элементе (воздух, гелий, арсенид галлия и т.д.) задаётся выражением:

$$p_i(\omega) = 1 - e^{-L_i/\lambda_i(\omega)},$$

где ω – энергия фотона переходного излучения, L_i – длина поглотителя, а $\lambda_i(\omega)$ – его длина поглощения. При этом принимаются в расчёт все процессы поглощения (когерентный, некогерентный, фотоэффект). Значения длин поглощения вычислялись на основе массовых коэффициентов поглощения, взятых из справочной базы данных NIST [2].

[2] <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>

Моделирование ДПИ на основе TimePix3 и GaAs:Cr

В параметрах модели детектора учитываются различные факторы:

- Испускание флюоресцентных фотонов с энергиями 9.2 кэВ (Ga) и 10.5 кэВ (As).
- Процесс диффузии дрейфующих носителей заряда в GaAs. Итоговый заряд, собранный датчиком, описывается двумерным распределением Гаусса с сигмой, которая линейно зависит от расстояния дрейфа:

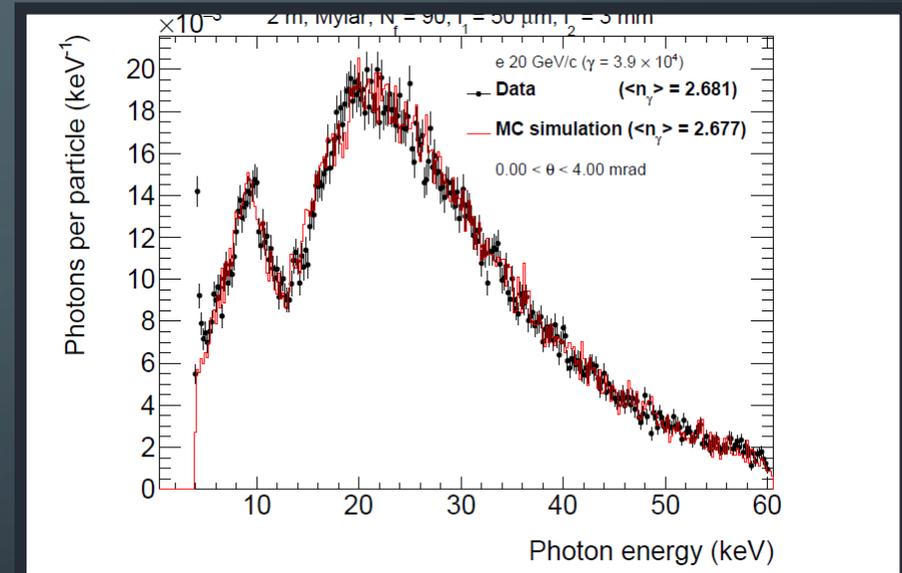
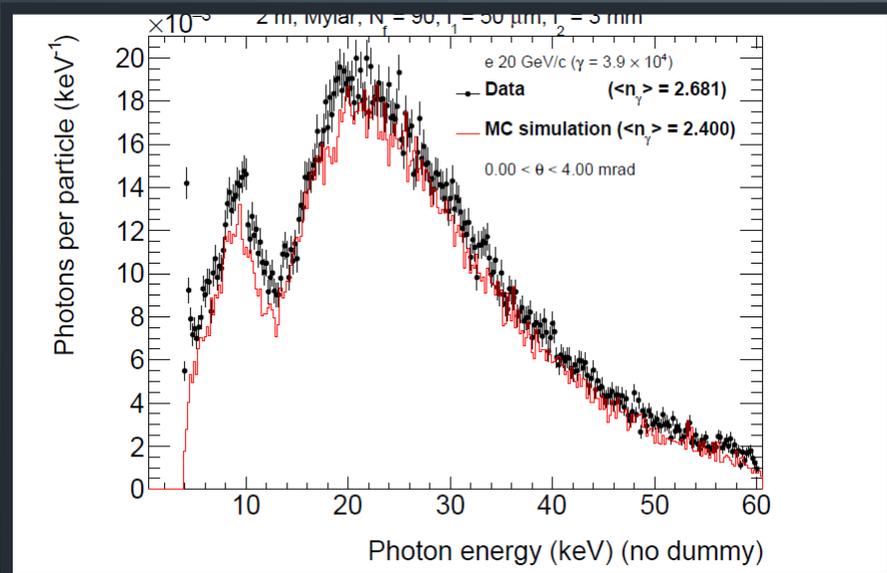
$$\sigma_{diff} = a_{diff}(h_{chip} - h_{ab}) + b,$$

где h_{chip} – толщина чипа GaAs, а h_{ab} – глубина, на которой образуются носители заряда.

- Шумы электроники добавляются путем размытия энергии, связанной с каждым пикселем, посредством распределения Гаусса с σ равной 426 эВ.
- Средний порог по энергии – 4.2 кэВ.
- Для учёта увеличения времени привязки измерений ToT из-за относительно высокого тока утечки в детекторе, сигналы, которые превышают величину порога, дополнительно размываются распределением Гаусса с сигмой равной 1.2 кэВ.

Моделирование ДПИ на основе TimePix3 и GaAs:Cr

Для учета вторичных процессов, приводящих к образованию фотонов и дельта-электронов вдоль линии пучка, было проведено несколько тестовых наборов данных с «макетом» радиатора. В них радиаторы были заменены полиэтиленовой плитой толщиной 3 мм. Фотонные кластеры из этих наборов, были добавлены к тем, которые были получены в ходе моделирования, с коэффициентом масштабирования, учитывающим различное число событий.



Энергетические спектры фотонов переходного излучения для радиаторов из майлара, 90 фольг, 20 ГэВ электроны, без учёта (слева) и с учётом (справа) вторичных процессов.

Метод Байеса

Данный метод основывается на теореме Байеса:

$$P(H_i|\vec{S}) = \frac{P(\vec{S}|H_i)C(H_i)}{\sum_{k=\pi,K,p} P(\vec{S}|H_k)C(H_k)}$$

Вероятность $P(\vec{S}|H_i)$ можно интерпретировать как условную вероятность того, что набор детекторных сигналов \vec{S} будет зафиксирован для заданного типа частицы H_i . Однако, основной интересующей здесь переменной является условная вероятность того, что частица типа H_i даст зарегистрированный сигнал в детекторе (т.е. $P(H_i|\vec{S})$). Величина априорных вероятностей, которые считаются лучшим выбором об истинном типе частицы в событии, определяется посредством итерационной процедуры:

$$C_{n+1}(H_i, E) = \sum_S P_n(H_i|S).$$

Начальная априорная вероятность на первом шаге определяется как $C_0(H_i, E) = 1$.