

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

КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 539.144.3

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
РЕЖЕКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТЕКТОРА  
ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ  
АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ПО ВЫДЕЛЕНИЮ  
ЭЛЕКТРОНОВ И АДРОНОВ.**

Научный руководитель  
доцент

\_\_\_\_\_ С. Ю. Смирнов

Студент

\_\_\_\_\_ В. С. Попов

Москва 2023

# Содержание

<b>Введение</b>	<b>3</b>
Актуальность . . . . .	3
Цель работы . . . . .	4
<b>1 Описание экспериментальной установки</b>	<b>4</b>
<b>2 Предварительный анализ программного обеспечения</b>	<b>4</b>
<b>3 Описание входного формата данных</b>	<b>5</b>
<b>4 Очистка данных от фоновых событий</b>	<b>5</b>
<b>5 Понятие режекции, поиск возможных путей ее улучшения</b>	<b>7</b>
<b>6 Изучение режекции для различных радиаторов</b>	<b>9</b>
<b>7 Проверка корректности данных</b>	<b>10</b>
<b>8 Вывод</b>	<b>11</b>

# Введение

Переходное излучение – это вид электромагнитного излучения, возникающего при пересечении заряженной частицей границы раздела сред с разными диэлектрическими проницаемостями.

Наибольший интерес представляет переходное излучение, созданное ультрарелятивистской частицей ( $\gamma \gg 1$ ), основная энергия которого лежит в области Рентгеновского спектра. Рентгеновские лучи излучаются в диапазоне от нескольких кэВ до десятков кэВ в прямом направлении под малыми углами.

В рентгеновском спектре переходное излучение имеет сильную зависимость от Лоренц-фактора ( $\gamma$ ). Метод, основанный на переходном излучении в рентгеновском спектре, является одним из четырех неразрушающих методов определения частиц и охватывает диапазон  $\gamma \gtrsim 500$

Для определения частиц с  $\gamma \sim 10^5$  дополнительно используется зависимость угла распространения переходного излучения  $\theta$  от  $\gamma$ .

## Актуальность

Столкновение адронов с адронами при  $\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$  и малым поперечным импульсом  $p_T$  мало изучены, однако анализ этих процессов мог бы помочь в исследовании спектров космических лучей. Например, аномальное количество мюонов в них может быть следствием распада адронов, содержащих кварки очарования и красоты, которые никогда не изучались при больших  $\sqrt{s}$ . Для этих целей предлагается провести эксперимент [1] по изучению рассеяния адронов под малыми углами и образованию заряженных адронов в адрон-адронных взаимодействиях. Последний раз аналогичные исследования проводились почти 50 лет назад на первом поколении адронного коллайдера ISR при энергиях столкновения  $\sqrt{s} = 63 \text{ ГэВ}$ .

Этот эксперимент подразумевает создание адронного спектрометра **VFHS** (Very Forward Hadron Spectrometer) на основе детектора переходного излучения. В отличие от черенковского детектора, который не эффективен при ТэВ-ном диапазоне энергий, детектор переходного излучения, который измеряет  $\gamma$ , способен эффективно работать при таких энергиях. Для данного эксперимента необходимо, чтобы детектор работал в диапазоне от  $\gamma = 10^3$  для 1 ТэВ  $p$  (протонов) до  $\gamma = 3.6 \cdot 10^4$  для 5 ТэВ  $\pi$  (пионов). Измерение гамма-фактора с точностью в 10% должно дать возможность корректно разделять  $\pi$ ,  $K$  (каонов) и  $p$ . Так как интенсивность переходного излучения имеет пороговую зависимость от гамма-фактора, его определение при помощи распределения по интенсивности практически невозможно, однако угловое распределение фотонов имеет непрерывную зависимость от гамма-фактора, поэтому в ходе данного эксперимента предполагается использовать детектор переходного излучения, определяющий гамма-фактор по углу распространения излучения. Для возможности одновременного получения и углового, и энергетического спектра используется пиксельный детектор.

Детектор переходного излучения, прототип которого описан в статье [2], является, возможно, единственным подходящим детектором для создания **VFHS**. Так как диапазон эффективной работы детектора зависит от многих параметров, таких как расстояние между пленками радиатора, материал радиатора и толщина пленки, детектор позволяет работать в большом диапазоне гамма-факторов.

## Цель работы

Целью данной работы является изучение режекционных характеристик детектора переходного излучения и поиск путей возможного улучшения этих параметров, а также оценка максимально возможных значений режекционных параметров для различных радиаторов, на основе данных, полученных в эксперименте со смешанным пучком пионы/электроны 20 ГэВ на ускорителе SPS в ЦЕРНе.

## 1 Описание экспериментальной установки

В ходе работы производился анализ данных, полученных с экспериментальной установки (Схема установки 1 из статьи [3]), которая представляет из себя: многослойный радиатор, находящийся на расстоянии порядка 2 м от детектора; трубу, заполненную гелием для предотвращения поглощения фотонов переходного излучения; сенсор из компенсированного хромом GaAs толщиной 500 мкм, соединенный с TimePix3 чипом, используемый как детектор с квадратной матрицей  $256 \times 256$  пикселей с шагом пикселя в 55 мкм. За GaAs располагается ливневый детектор и калориметра из свинцового стекла, перед радиатором находится черенковский детектор. Вместе они образуют систему определения частицы. В статье [3] описываются некоторые результаты измерений 2018 года. Данные, анализируемые в этой работе, были получены в 2018 и 2021 годах на ускорителе SPS в ЦЕРНе.

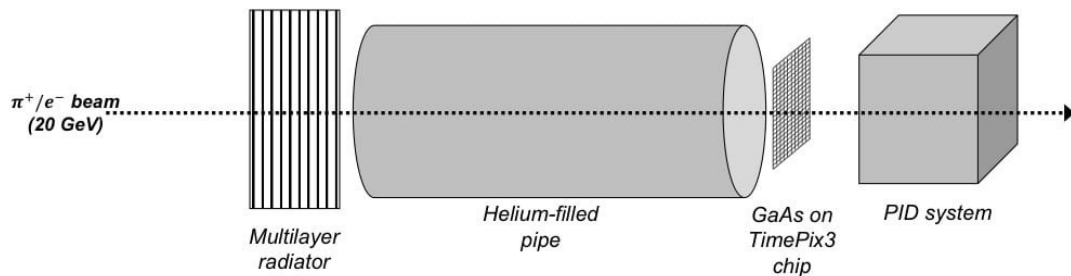


Рисунок 1 — Схема экспериментальной установки

## 2 Предварительный анализ программного обеспечения

Перед началом работы по изучению режекционных свойств детектора была решена проблема, связанная с программным обеспечением, написанным сотрудниками эксперимента. До этого момента данные 2018 года обрабатывались только программой, написанной в том же году, однако, после обработки данных программой 2020 года, было выявлено несоответствие по количеству итоговых данных. При проведении анализа программ была обнаружена ошибка в коде 2018 года, из-за которой события, которые должны были отсеиваться (так как происходили на краях детектора), входили в итоговую статистику.

### 3 Описание входного формата данных

Каждому пролету частицы через детектор соответствует широкий набор измеряемых величин. Перечислим важные для последующего анализа параметры и понятия, употребляемые в работе.

Кластер – набор сработавших пикселей, объединённых в единый объект при помощи алгоритма кластеризации. Существует 2 алгоритма кластеризации: первый объединяет в кластер сработавшие пиксели, имеющие только общую грань (Sides Only), второй объединяет в кластер пиксели, имеющие не только общую грань, но и общий угол (Sides Plus Corners).

Размер кластера пучковой частицы – это число, равное количеству пикселей, которые входят в состав кластера с наибольшим энерговыделением. Кластер с наибольшим энерговыделением и является кластером пучковой частицы.

Размер вторичных кластеров – это количество пикселей, входящих в состав каждого вторичного кластера данного события. Вторичными кластерами считаются все кластеры этого события, кроме кластера пучковой частицы. В идеальных условиях каждому вторичному кластеру тождественен фотон переходного излучения.

Также в массиве входных данных мы имеем такие параметры как энерговыделение в кластере, количество вторичных кластеров и тип частицы - определенный при помощи внешней системы определения частиц.

### 4 Очистка данных от фоновых событий

Так как эксперимент проводится не в идеальных условиях, кроме событий, соответствующих пролету одной частицы через детектор, существуют события не имеющие отношения к анализу и загрязняющие массив данных. К ним относятся: пролет сразу нескольких пучковых частиц через детектор, пролет дельта электрона через детектор, ядерное взаимодействие пиона с веществом детектора, помехи в электронике. Для отсеивания фоновых событий наложим ограничения на такие параметры, как максимальный размер кластера, максимальное энерговыделение во вторичном кластере, минимальное энерговыделение в кластере пучковой частицы. Также выберем алгоритм кластеризации, при котором разница между фоновым и интересующим нас событием будет максимальна.

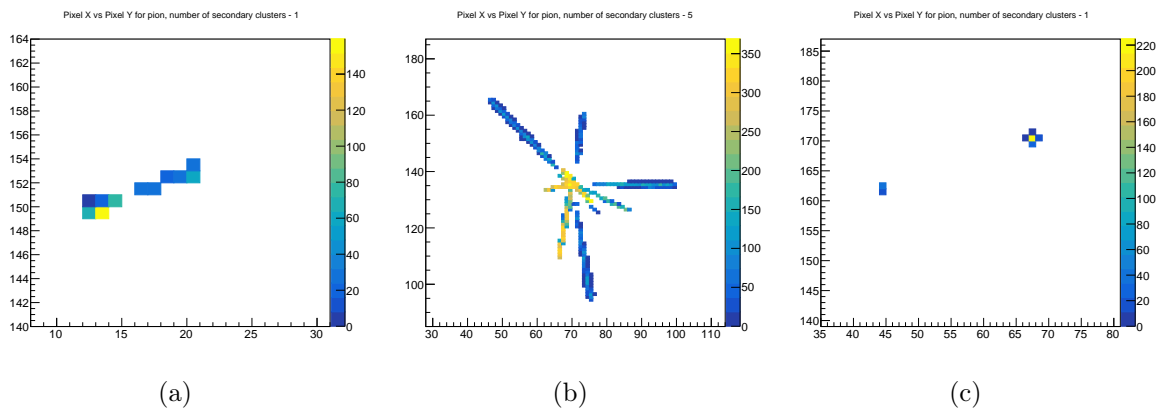


Рисунок 2 — Снимки событий (Цветом обозначено энерговыделение в каждом пикселе в кэВ.) а – фоновое событие, связанное с дельта электроном, b – фоновое событие, связанное с ядерным взаимодействием пиона, с – искомое событие, интересное для последующего анализа.

Из рисунка 2(а) следует, что для отсеивания фоновых событий лучше подходит алгоритм кластеризации «Sides Plus Corners», так как при нем предполагаемый след от дельта электрона будет объединён в аномально большой вторичный кластер, и при введении ограничения на размер кластера данное событие будет отброшено из последующего анализа.

При помощи гистограмм по перечисленным выше параметрам определим ограничения, которые необходимо наложить на соответствующие параметры.

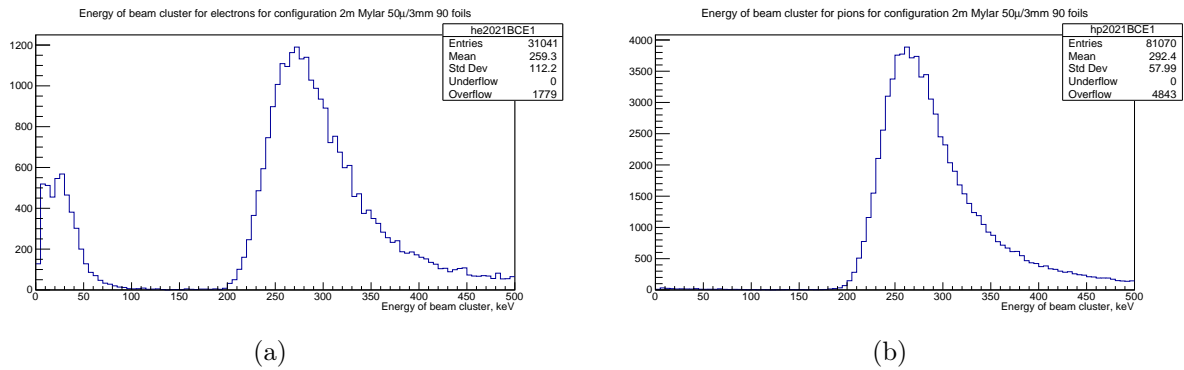


Рисунок 3 — Гистограммы энергосодержания в кластере пучковой частицы для электронных (а) и пионных (б) событий.

Из рисунка 3(а) видно наличие двух пиков. Первый из них соответствует фотонам переходного излучения, которые, если сам электрон пролетел мимо детектора, будут определены как пучковая частица, а второй начинается с 200 кэВ, и соответствует интересующим нас электронам, - это значение и будет выбрано как наименьшее допустимое энергосодержание в кластере пучковой частицы.

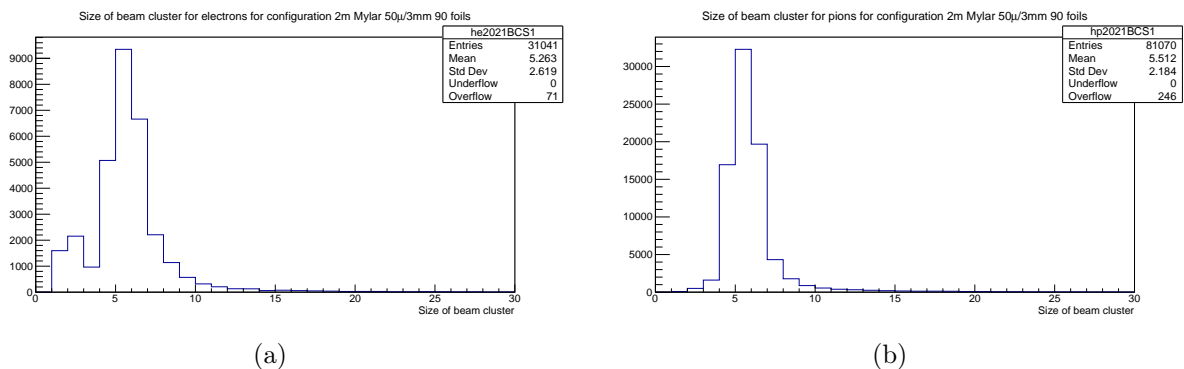


Рисунок 4 — Гистограммы размера кластера пучковой частицы в пикселях для электронных (а) и пионных (б) событий.

Из рисунка 4 видны границы пиков. Выберем 9 пикселей как максимально возможный размер кластера частицы. Данное число обусловлено не только полученными гистограммами, но и представлением о форме кластера, который не должен быть больше квадрата 3 на 3 пикселя. Сделав аналогичные выводы из рисунков 5 и 6, выберем максимальное энергосодержание во вторичном кластере 100 кэВ, а максимальный размер 4 пикселя.

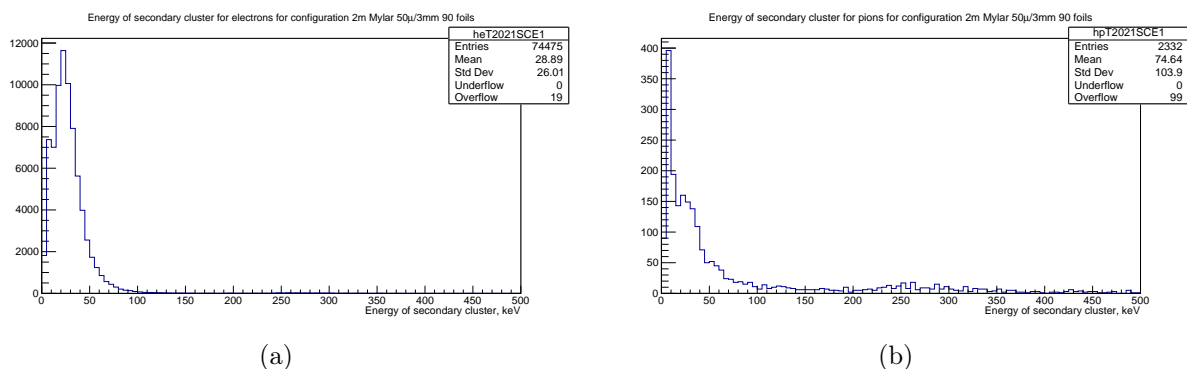


Рисунок 5 — Гистограммы энерговыделения во вторичных кластерах для электронных (a) и пионных (b) событий.

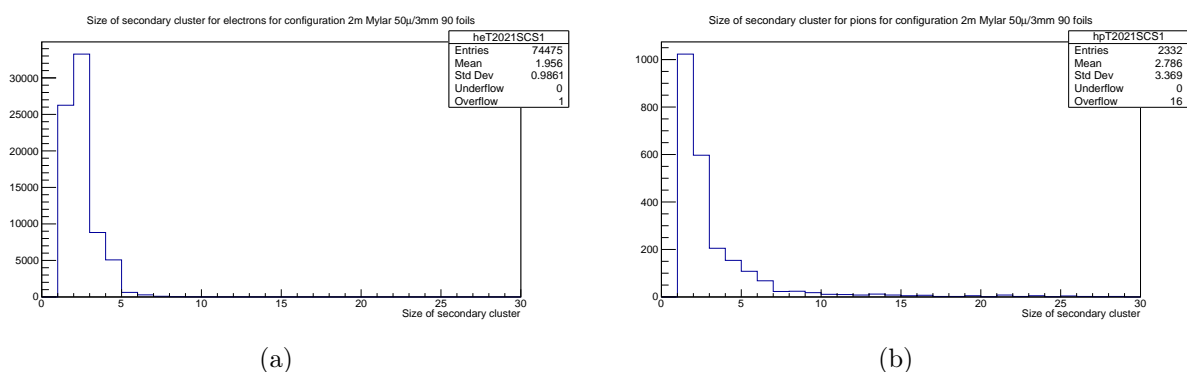


Рисунок 6 — Гистограммы размера вторичных кластеров в пикселях для электронных (a) и пионных (b) событий.

## 5 Понятие режекции, поиск возможных путей ее улучшения

Режекция – это эффективность детектора по выделению одного типа частиц на фоне других. В нашем случае, это выделение электронов на фоне пионов. Нужно провести отбор так, чтобы максимальное число электронов его прошло, и наибольшее число пионов не смогло. В качестве параметра отбора будет использовано количество переходных фотонов. Так, например, все события, в которых количество вторичных кластеров больше или равно 2, будут считаться электронными, а остальные пионными. Выбор данного параметра становится очевидным при ознакомлении с рисунком 7. Так как испускание фотона переходного излучения заряженной частицей при пересечении раздела сред является случайным процессом, то распределение количества этих фотонов должно соответствовать распределению Пуассона:  $P(x) = \frac{e^{-\lambda}\lambda^x}{x!}$ . Из рисунка 7 видно, что параметр распределения Пуассона  $\lambda$  сильно различается для электронов и пионов.

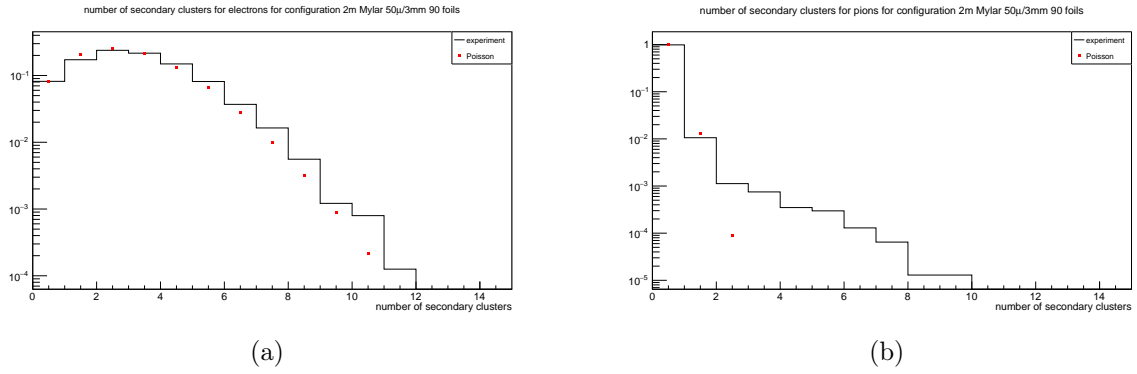


Рисунок 7 — Гистограммы количества вторичных кластеров для электронных (a) и пионных (b) событий. Параметр распределения Пуассона  $\lambda$  определялся как логарифм значения первого бина.

Для визуализации режекционных параметров для различных радиаторов будут использоваться графики, подобные рисунку 8, где по оси  $x$  отложена эффективность регистрации электронов, а по оси  $y$  эффективность регистрации пионов. Для экспериментальной кривой ошибка считалась по формуле для биномиального распределения. Очевидно, что чем ниже идет кривая, тем лучше режекция детектора. Видно, что возможно улучшение режекции, так как экспериментальная кривая идет выше теоретической.

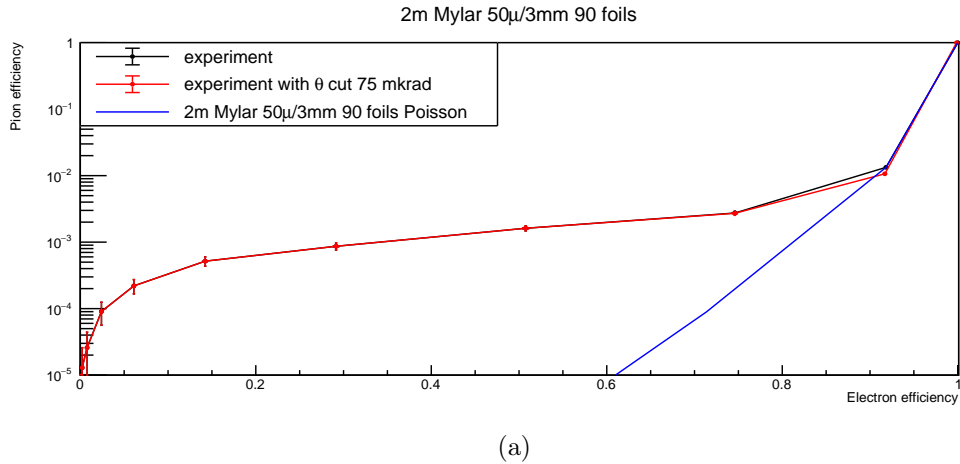
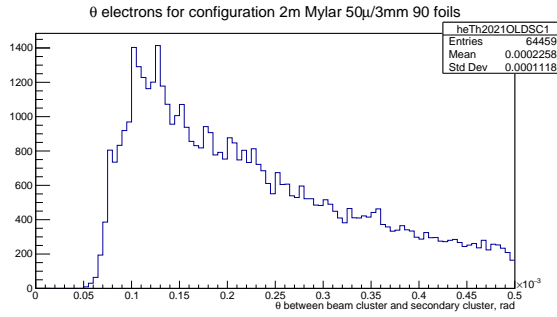


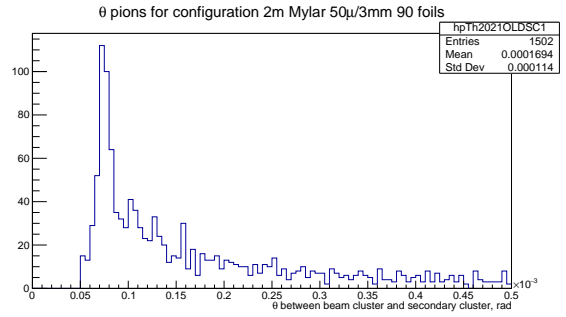
Рисунок 8 — График эффективности регистрации пионов от эффективности регистрации электронов.

Проверим предположение о том, что режекцию можно улучшить, если ввести дополнительный параметр отбора, связанный с углом вылета переходного фотона относительно импульса частицы. Из рисунка 9 видно, что пики угла вылета для электронных событий и пионных находятся в разных точках - это связано с тем, что угол вылета переходного фотона имеет зависимость от  $\gamma$ . Введем дополнительный параметр отбора. Будем считать, что частица, у которой все переходные фотоны вылетели под углом меньше 75 мкрад., является пионом. Из рисунка 8 видно, что ввод данного параметра отбора мало влияет на режекцию, из чего следует, что предположение о возможном улучшении режекции при помощи отбора по углу вылета переходного фотона неверно.





(a)



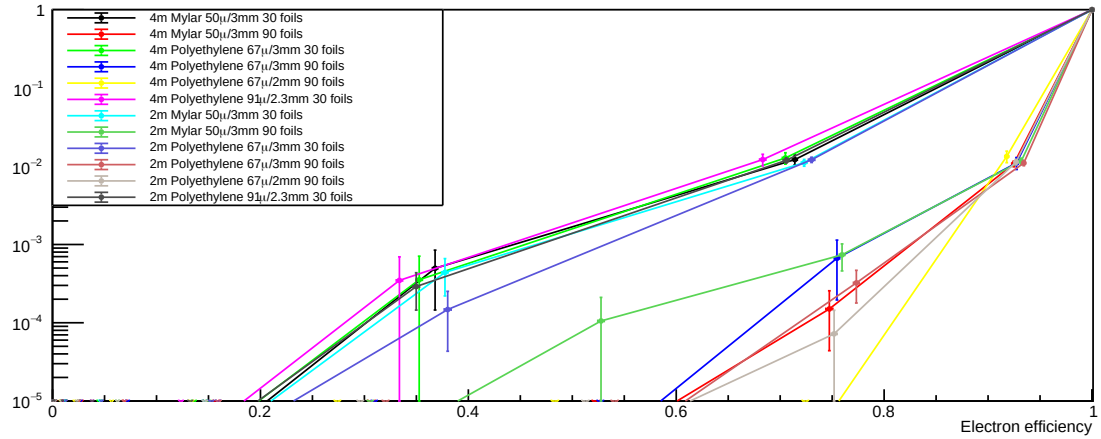
(b)

Рисунок 9 — Гистограммы угла вылета фотонов переходного излучения электронных (a) и пионных (b) событий.

## 6 Изучение режекции для различных радиаторов

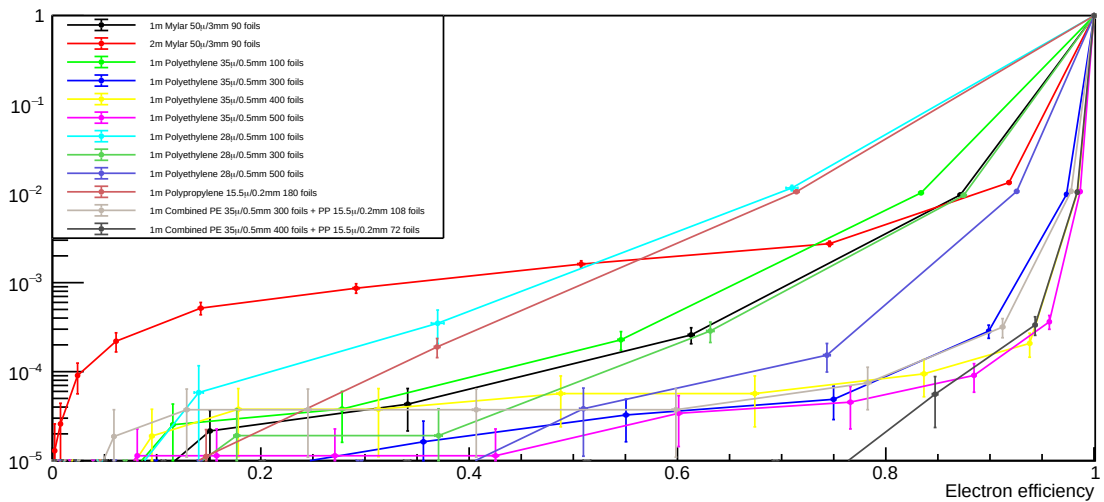
Детектор переходного излучения состоит из двух частей: детектирующей пластины с Timerix3 чипом и радиатора. Радиатор представляет из себя набор тонких пленок из различных материалов, расположенных на определенных расстояниях друг от друга. Радиатор определяется четырьмя параметрами: толщиной пленки, материалом пленки, расстоянием между пленками, количеством пленок, расстоянием от радиатора до детектирующей плоскости. Во время измерений 2018 и 2021 года проводилось изучение различных радиаторов. На рисунке 10 приведены режекционные кривые для различных конфигураций радиаторов. На рисунке 10(a) видно, что режекционная кривая не имеет сильной зависимости от расстояния между радиатором и детектирующей плоскостью. Видно, что режекционные параметры тем лучше, чем больше пленок. Из рисунка 10(b) видно, что полипропиленовый радиатор показывает себя хуже, чем полиэтиленовый.

Rejection plots for 2018 data.



(a)

Rejection plots for 2021 data.



(b)

Рисунок 10 — График эффективности регистрации пионов от эффективности регистрации электронов для различных радиаторов для данных 2018 (a) и 2021(b). Параметры радиатора записываются в формате "расстояние до детектирующей плоскости, материал, толщина пленки, расстояние между пленками, количество пленок".

## 7 Проверка корректности данных

Сравним данные, полученные в разных годах для одной и той же конфигурации радиатора. В идеальной ситуации все полученные графики и гистограммы для данных 2018 года и 2021 должны совпадать. Проанализируем конфигурацию радиатора, располагающегося на расстоянии двух метров от детектирующей плоскости, состоящего из 90 майларовых пленок толщиной в 50мкм и с межплёночным расстоянием в 3мм. Из рисунка 11 видно расхождение в распределении количества вторичных кластеров для пионных событий, оно может быть объяснено как нехваткой статистики в данных 2018 года, так и ошибочной регистрацией электронов как пионов в данных 2021 года.

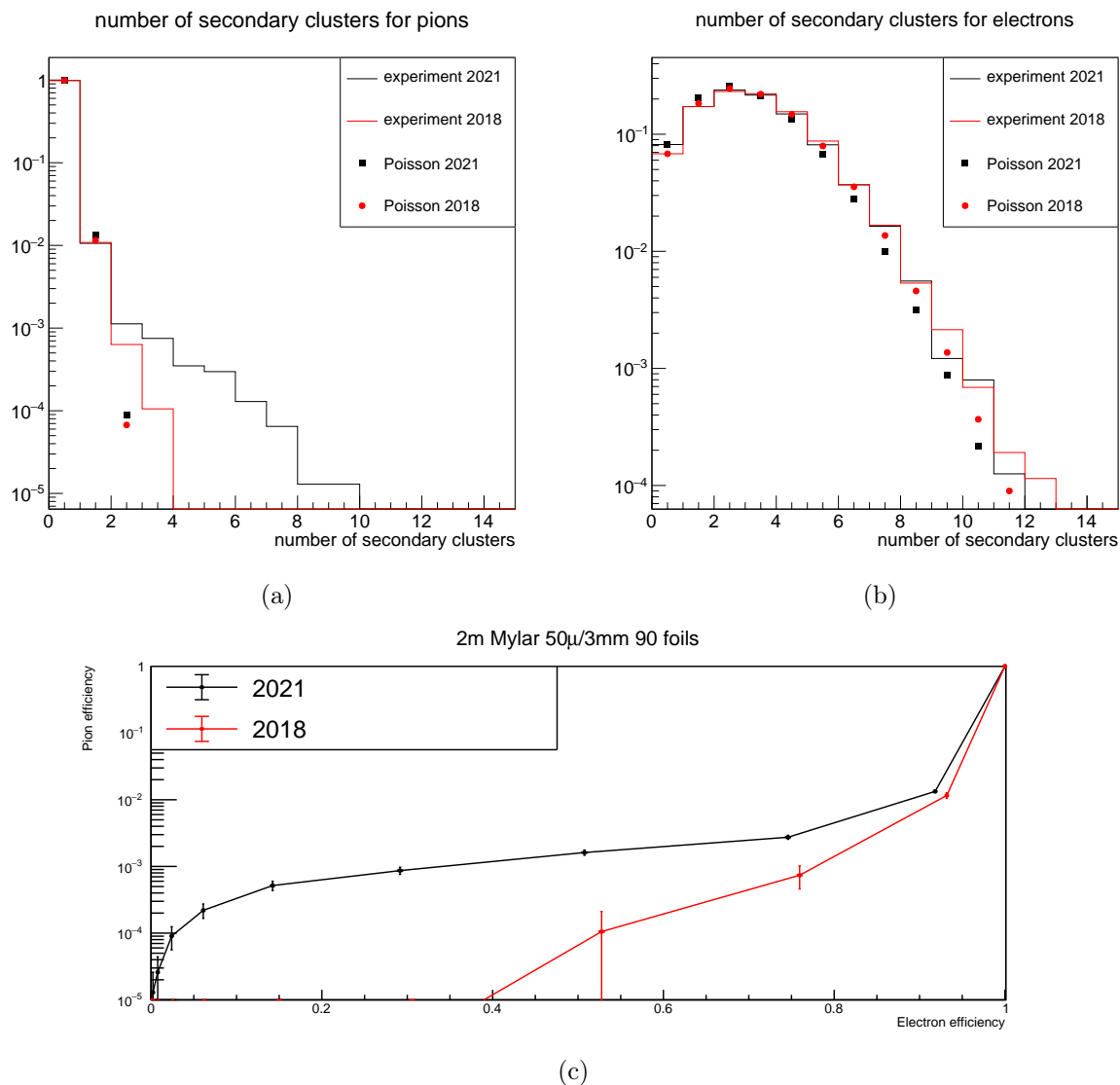


Рисунок 11 — Гистограммы количества вторичных кластеров для пионных (a) и электронных (b) событий. Режекционная кривая (c).

## 8 Вывод

Были определены параметры отделения фоновых событий от искомым. Построены режекционные кривые для различных радиаторов. Из полученных данных был сделан вывод, что сильнее всего на режекционные свойства влияет количество пленок в радиаторе. Для наилучших конфигураций (например, полиэтилен 35мкм/0.5мм 500 пленок) были достигнуты значения  $\sim 10^{-4}$  ошибочно зарегистрированных пионов при сохранении 90% электронных событий. Радиаторы, используемые в эксперименте 2018 года, в среднем, оказались хуже, чем радиаторы, используемые в 2021 году. Это связано с тем, что 2021 году использовались радиаторы с большим количеством пленок.

## Список литературы

- [1] Michael Albrow. A Very Forward Hadron Spectrometer for the LHC and Cosmic Ray Physics. *PoS*, EDSU2018:048, 2018.
- [2] N Belyaev et al. A concept of the transition radiation detector for a hadron separation in a forward direction of the LHC experiments. *Journal of Physics: Conference Series*, 1690(1):012043, dec 2020.
- [3] J. Alozy et al. Registration of the transition radiation with GaAs detector: Data/MC comparison. *J. Phys. Conf. Ser.*, 1690(1):012041, 2020.