

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

УДК 53-05

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕСТИРОВАНИЯ ДЕТЕКТОРА  
ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПУЧКЕ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Научный руководитель:

доцент

\_\_\_\_\_ С. Ю. Смирнов

Выполнил:

\_\_\_\_\_ А. И. Дуров

Москва 2022

# Содержание

Содержание . . . . .	1
1 Введение. Переходное излучение . . . . .	2
2 Введение. Детекторы переходного излучения . . . . .	3
3 Введение. Сравнение детекторов на основе Si и GaAs . . . . .	4
4 Введение. Тестирование детектора переходного излучения на пучке . . . . .	6
5 Ход работы. Общий вид анализа данных эксперимента . . . . .	8
6 Ход работы. Кластеризация . . . . .	9
6.1 Расчет расстояния от центра радиатора до детектора	10
6.2 Построение кластеров . . . . .	11
6.3 Проверка результатов кластеризации . . . . .	12
6.4 Результаты кластеризации . . . . .	13
7 Заключение . . . . .	15

## Цель работы

Целью работы является обработка результатов теста на пучке заряженных частиц детектора переходного излучения, а именно - обработка данных с окончательно выбранными параметрами обработки и кластеризация сработавших пикселей.

## 1 Введение. Переходное излучение

Переходное излучение возникает при пересечении заряженной частицей области неоднородности в веществе или в конфигурации окружающего пространства.

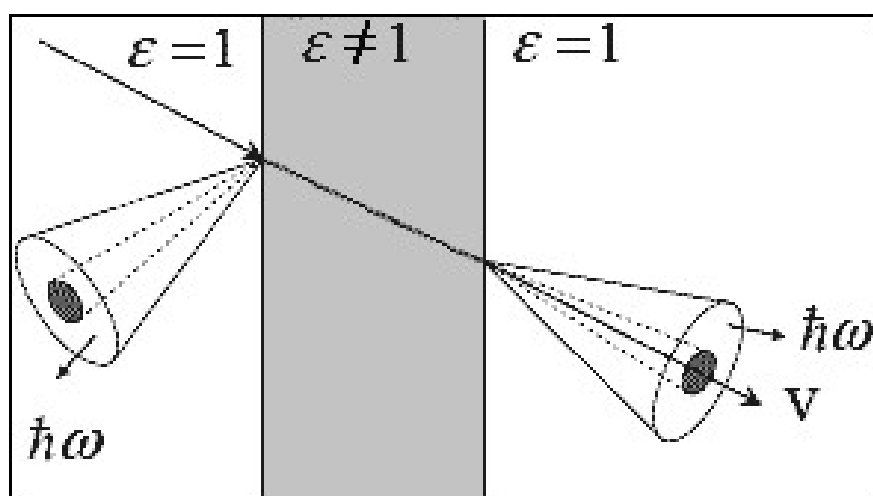


Рисунок 1 – Переходное излучение

У этого типа излучения нет порога. Таким образом, излучает любая заряженная частица произвольной массы со скоростью, не равной нулю, в системе с малым поглощением электромагнитного сигнала. Энергия, излучаемая, когда частица с зарядом  $z$  пересекает границу между вакуумом и средой с плазменной частотой  $\omega_p$ , равна:

$$I = (\alpha z^2 \gamma \hbar \omega_p) / 3 \quad (1)$$

## 2 Введение. Детекторы переходного излучения

Изменяя параметры радиатора, чувствительность детектора переходного излучения может быть настроена на определенный диапазон  $\gamma$ -фактора. Это, в свою очередь, делает переходное излучение привлекательным для идентификации частиц при очень высоких  $\gamma$  где другие эффекты, такие как, например, черенковское излучение, достигают своего насыщения. Большинство детекторов переходного излучения обычно работают в диапазоне  $500 < \gamma < 2000$ , но с увеличением энергий частиц в современных или планируемых экспериментах на ускорителях частиц, а также в экспериментах с космическими лучами требуется идентификация частиц (сокращение - PID) при гораздо более высоких  $\gamma$ -факторах. Одним из способов создания такого детектора было бы использование многослойной структуры излучатель-детектор с детекторами, в которых потери на ионизацию частиц меньше, чем энергия образующихся фотонов.

Другой подход основан на использовании полупроводниковых детекторов с высокой степенью детализации, которые позволили бы проводить одновременные измерения энергии и угла фотонов переходного излучения и максимально использовать доступную информацию для идентификации частиц [1]. В последние годы разработана пиксельных чипов с высоким разрешением, таких как Timepix3 [2], подключенных к толстым датчикам Si или GaAs (в нашем эксперименте - GaAs), открывает новые возможности для высокоэффективных детекторов переходного излучения с хорошим пространственным разрешением заряженных частиц и фотонов переходного излучения. Первые измерения переходного излучения с помощью Si-датчика был представлен в [3].

### 3 Введение. Сравнение детекторов на основе Si и GaAs

Для данного эксперимента используется детектор на основе кристалла GaAs, а не Si, как было в некоторых прошлых тестированиях. Выбор GaAs по сравнению с Si обоснован тем, что для одного и того же излучателя количество обнаруженных фотонов детекторами GaAs больше, чем детекторами на основе Si (см. рис. 2) [4].

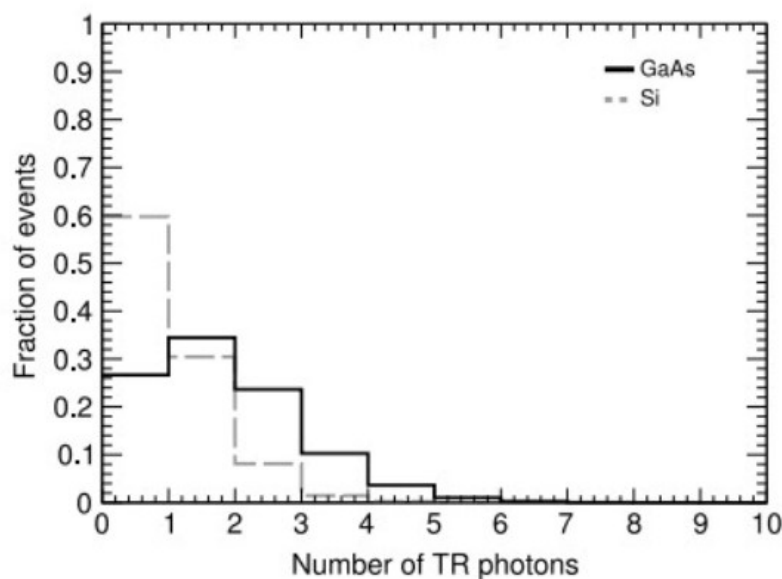


Рисунок 2 – Сравнение GaAs и Si по количеству обнаруженных фотонов

Энергетически-угловые распределения обнаруженных фотонов переходного излучения для обоих детекторов показаны на рис. 3 и 4. С помощью этого рисунка можно несложно проследить глобальную и тонкую интерференционную структуру переходного излучения. Видно, что детектор на основе GaAs намного эффективнее для высоких энергий фотонов переходного излучения.

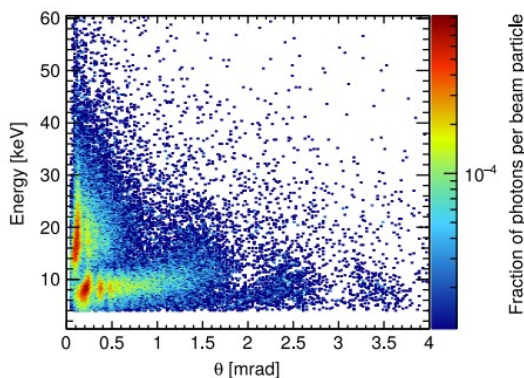


Рисунок 3 – Энергетически-угловое распределение фотонов переходного излучения, полученное с помощью детектора на основе Si

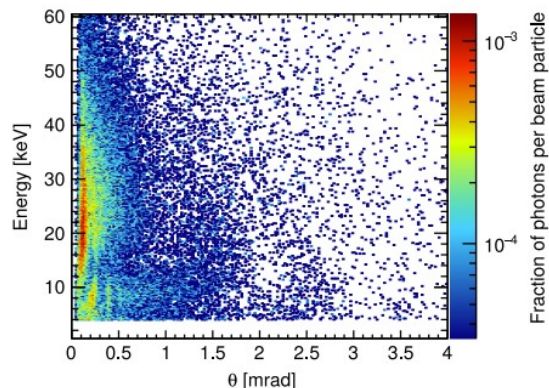


Рисунок 4 – Энергетически-угловое распределение фотонов переходного излучения, полученное с помощью детектора на основе GaAs

Проекции этих распределений на энергетическую ось имеют вид, который можно увидеть на рис. 5. Нетрудно заметить, что для мягкой части спектра (до 12-13 кэВ) детекторы на основе как Si, так и GaAs, обладают хорошей эффективностью. Однако, если фотоны переходного излучения имеют энергию выше 20 кэВ, детекторы GaAs становятся намного эффективнее.

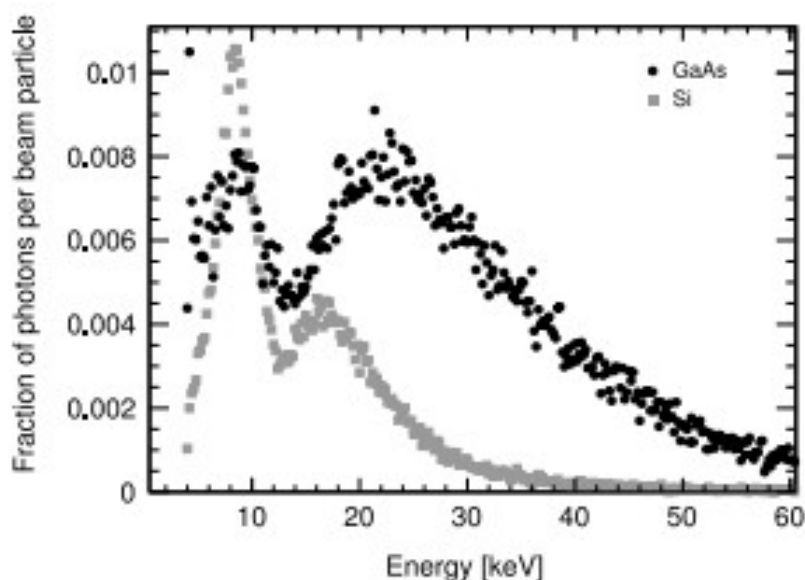


Рисунок 5 – Энергетические распределения фотонов переходного излучения, полученное с помощью детекторов на основе Si и GaAs

## 4 Введение. Тестирование детектора переходного излучения на пучке

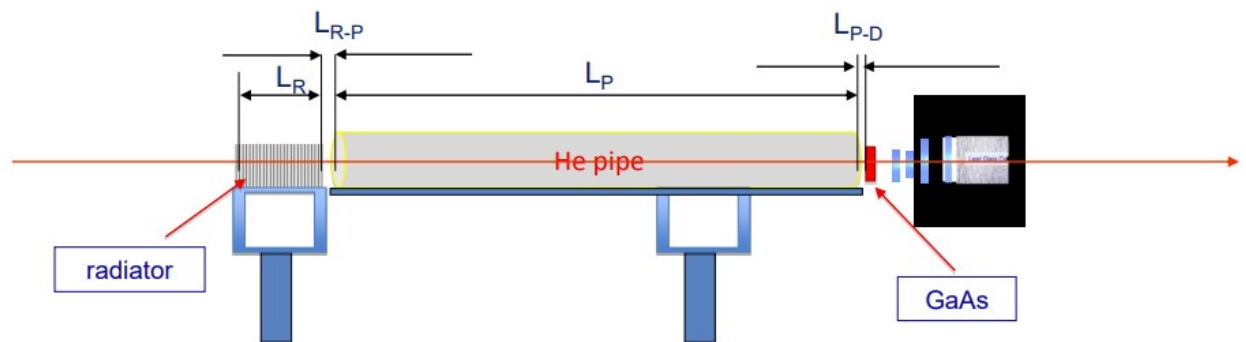
Схему установки, использовавшейся для тестирования детектора переходного излучения на пучке, можно увидеть на рис. 6. Установка состояла из следующих элементов:

1. **Радиатор** - наборы пленок, необходимых для образования фотонов переходного излучения. Были использованы следующие конфигурации радиатора: Полиэтилен, полипропилен, комбинация полиэтилена и полипропилена, Mylar и макетный радиатор; были использованы разные количества пленок, разные расстояния между ними, разные ширины пленок;
2. **Трубки с гелием** - трубки различных длин, заполненные гелием. Они использовались для предотвращения поглощения излучаемых фотонов переходного излучения в воздухе. Проводились тесты как с трубками, длинами в 30см, 50см, 100см, 200см, так и без трубки вообще;
3. **Детектор** - непосредственно сам исследуемый детектор переходного излучения на основе кристалла GaAs ([4], [5]). Состоит детектор из квадратной матрицы размером 256x256 пикселей с шагом пикселей 55мкм, образуя таким образом активную площадь в 1,98см<sup>2</sup>

Суммарное расстояние между точкой выхода фотонов переходного излучения и входом в детектор можно посчитать по следующей формуле:

$$L = L_{R-P} + L_P + L_{P-D} \quad (2)$$

## Test beam set up configuration



$L_R$  – radiator length if this is uniform radiator. If blocks of small radiators are added than parameters  $L_{R1}$ ,  $L_{R2}$  and  $L_{R1-R2}$  should be measured  
 $L_{R-P}$  – radiator to pipe distance.  
 $L_P$  – pipe length.  
 $L_{P-D}$  – pipe to detector distance.

Рисунок 6 – Схема тестирования на пучке

В качестве пучка заряженных частиц использовался пучок  $e/\pi$  энергией 20ГэВ, а также пучок мюонов энергией 180ГэВ для отладки работы эксперимента.



## 5 Ход работы. Общий вид анализа данных эксперимента

Порядок организации анализа данных, полученных с эксперимента, можно увидеть на рис. 7. Этапы анализа:

1. Первым этапом является распаковка данных из выходных файлов с эксперимента (data unpacking) и их приведение к виду, удобному для последующего анализа;
2. Второй этап - построение событий (event building), позволяющий разбить единый поток данных на отдельные события, а также некоторые параметры, необходимые для реализации следующих этапов, например: ToT - Time over Threshold (время над порогом), hdt - разницу во времени между триггером и срабатыванием пикселя и т.д.;
3. Третий этап - процесс кластеризации и калибровки, самый трудоёмкий и важный этап, на котором основан весь анализ. Во время этого этапа определяется точное место, где прошел фотон на основе сработавших в этом событии пикселей
4. Посредний, четвертый, этап - непосредственно сам анализ всех полученных результатов испытания.

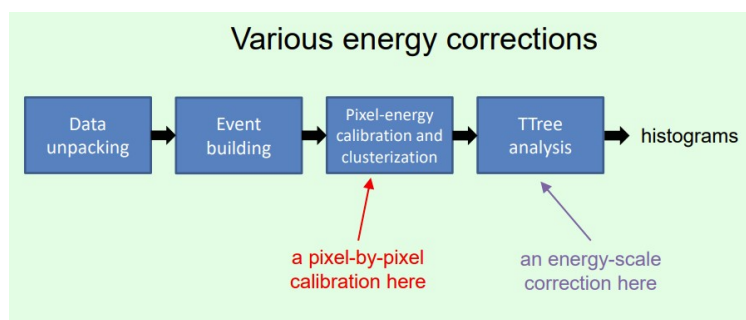


Рисунок 7 – Схема анализа

В данной работе на данный момент рассматривается третий этап анализа - кластеризация.

## 6 Ход работы. Кластеризация

На выходе предыдущего этапа анализа были получены root-файлы с 2 деревьями, содержащие информацию о событиях: координаты X и Y сработавших пикселей, время над порогом и время срабатывания пикселя.

В процессе кластеризации в качестве входных данных используются именно эти файлы. Сам процесс кластеризации состоит в том, что из всех сработавших пикселей нужно выбрать набор тех пикселей, которые будут отвечать одному кластеру. И далее уже рассматривать эту группу сработавших пикселей как "единый" результат взаимодействия пролетающей заряженной частицы с детектором. Более того, некоторые группы сработавших пикселей можно интерпретировать по-разному. Например, такую (см. рис. 8) ситуацию можно рассматривать как один кластер сработавших пикселей, отвечающих одному взаимодействию заряженной частицы с детектором (такая интерпретация в дальнейшем будет называться "Sides + Corners clusterisation то есть кластеризация по смежным бокам или углам) и двум отдельным кластерам, отвечающим разным событиям (такая интерпретация в дальнейшем будет называться "Sides only clusterisation то есть кластер определяется только по тем сработавшим пикселям, которые соприкасаются между собой только боками). Поэтому кластеризация событий будет проделана два раза - для каждого из вышепредставленных интерпретаций.

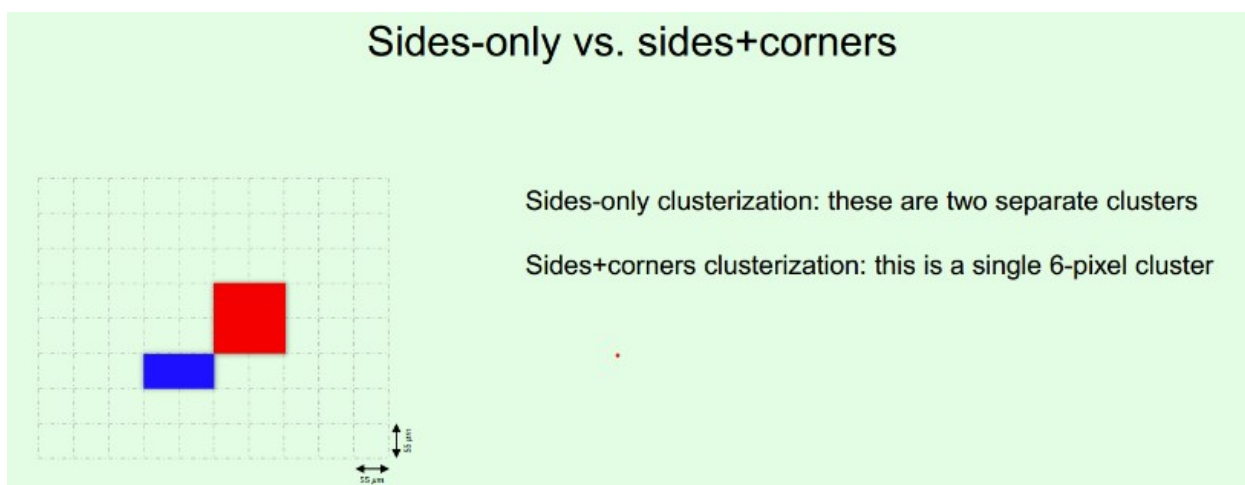


Рисунок 8 – Интерпретации кластеров

## 6.1 Расчет расстояния от центра радиатора до детектора

Одним из важнейших параметров, необходимых для анализа - это параметр, отвечающий за расстояние от центра радиатора до детектора. Его необходимо рассчитать вручную по формуле:  $L = L_{R-P} + L_P + L_{P-D} + L_R/2$ , где  $L_{R-P}$ - это расстояние между радиатором и гелиевой трубой,  $L_P$ - длина гелиевой трубы,  $L_{P-D}$ - расстояние между гелиевой трубой и детектором,  $L_R$  - длина радиатора. Все эти длины были измерены во время эксперимента.

Для удобства все полученные расстояния были записаны в таблицу, пример которой можно увидеть на рис. 9

Run	Radiator	$L_{P-D}$	$L_P$	$L_{R-P}$	$L_R$	$L = L_{P-D} + L_P + L_{R-P} + L_R/2$
239	Mylar 25/0.5 85, 100cm (no pipe)	32	1000	14	44	1068
238	Mylar 25/0.5 85, 200cm	32	2000	14	44	2068
237	Mylar 25/0.5 85, 50cm (no pipe)	32	500	14	44	568
236	Mylar 25/0.5 85, 30cm	32	300	14	44	368
235	Mylar 25/0.5 85, 30cm (no pipe)	32	300	14	44	368
234	Mylar 25/0.5 85, 50cm	32	500	14	44	568
233	Mylar 25/0.5 85, 100cm	32	1000	14	44	1068

Рисунок 9 – Таблица с расстояниями от центра радиатора до детектора

## 6.2 Построение кластеров

После расчета всех расстояний от центра радиатора до детектора можно приступать непосредственно к самому построению кластеров - кластеризации. Как было отмечено ранее, этот процесс будет выполнен два раза: действуя по методике соприкосновения только по бокам и по методике соприкосновения по бокам или углам. А также следует отметить, что всего испытаний в эксперименте - более 150 (По всем испытаниям были составлены информационные таблицы с количеством событий на каждом из этапов; часть одной такой таблицы представлена на рис. 10). По этим причинам ниже будут представлены результаты только для трех испытаний: в двух испытаниях используется радиатор из пленки на основе синтетического полиэфирного волокна - Mylar, используемые толщины пленок - 50 мкм, расстояния между двумя соседними пленками - 3 мм, номинальное расстояние между радиатором и детектором - 2 метра, а число пленок - 90 штук в первом испытании и 30 штук во втором испытании; в третьем испытании используется радиатор-болванка, номинальное расстояние между таким радиатором и детектором - 2 метра.

Run	Radiator	Pass0 (data unpacking)	Pass1 (event building) without cut	Pass1 (event building) with narrow window
239	Mylar 25/0.5 85, 100cm (no pipe)	33784	21822	21815
238	Mylar 25/0.5 85, 200cm	130875	85822	85798
237	Mylar 25/0.5 85, 50cm (no pipe)	129855	83402	83371
236	Mylar 25/0.5 85, 30cm	130077	83643	83622
235	Mylar 25/0.5 85, 30cm (no pipe)	130191	83492	83468

Рисунок 10 – Часть суммарной таблицы с числом событий по всем испытаниям

### 6.3 Проверка результатов кластеризации

Благодаря проведенной кластеризации можно узнать множество полезной информации, однако, чтобы исключить вероятность статистической ошибки, прежде, чем делать выводы о результатах, необходимо проверить выходные файлы на предмет таких ошибок. Добиться этого можно с помощью сравнения полученных результатов с результатами аналогичных испытаний предыдущего эксперимента, который был проведен в 2018 году. По схожим формам гистограмм можно будет сделать вывод о достоверности новых результатов.

Ниже представлены некоторые из гистограммы, выбранных для сравнения между результатами схожих испытаний в экспериментах 2021 и 2018 годов:

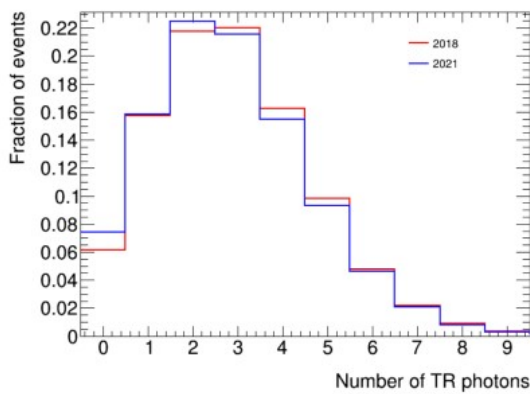


Рисунок 11 – Испытание с 90 пленками, соприкосновение только по бокам, статистика для электронов

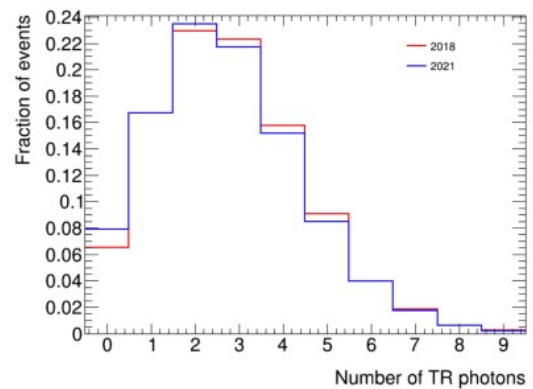
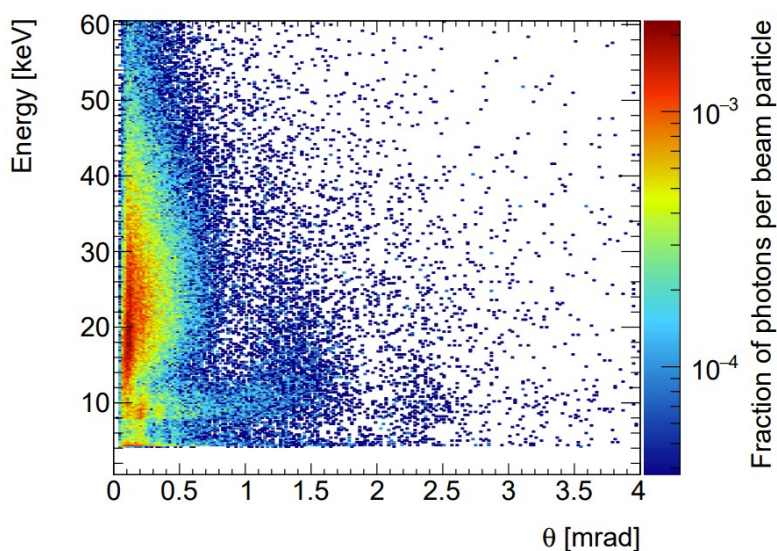


Рисунок 12 – Испытание с 90 пленками, соприкосновение только по бокам, статистика для электронов

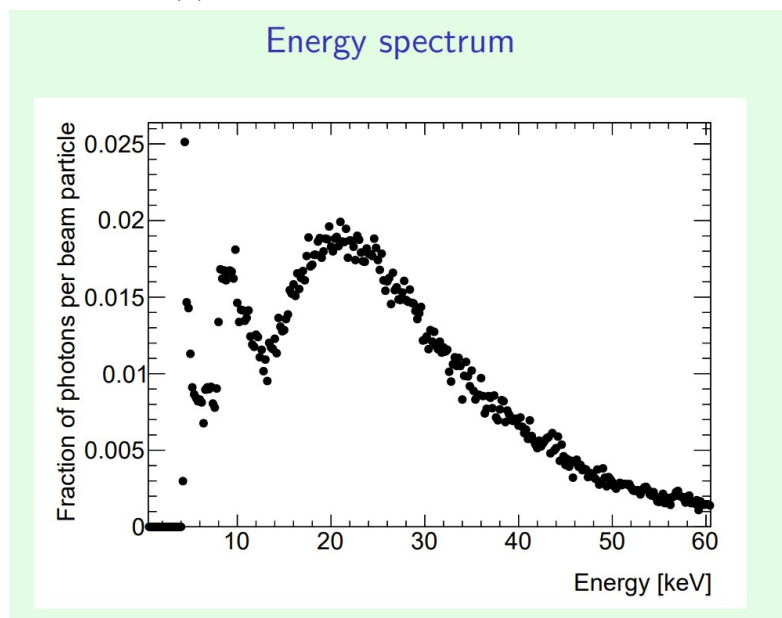
По виду этих гистограмм можно сделать вывод, что полученные новые гистограммы соответствуют действительности и подлежат дальнейшему анализу.

## 6.4 Результаты кластеризации

В качестве результатов кластеризации можно получить множество гистограмм, позволяющих увидеть различные распределения некоторых параметров, зависимости некоторых величин, а также визуализировать сами кластеры, то есть увидеть точку взаимодействия заряженных частиц с веществом детектора. Примеры таких результатов для трех испытаний, для которых проверялись результаты в 6.3, можно увидеть на рис. 13 - 14.

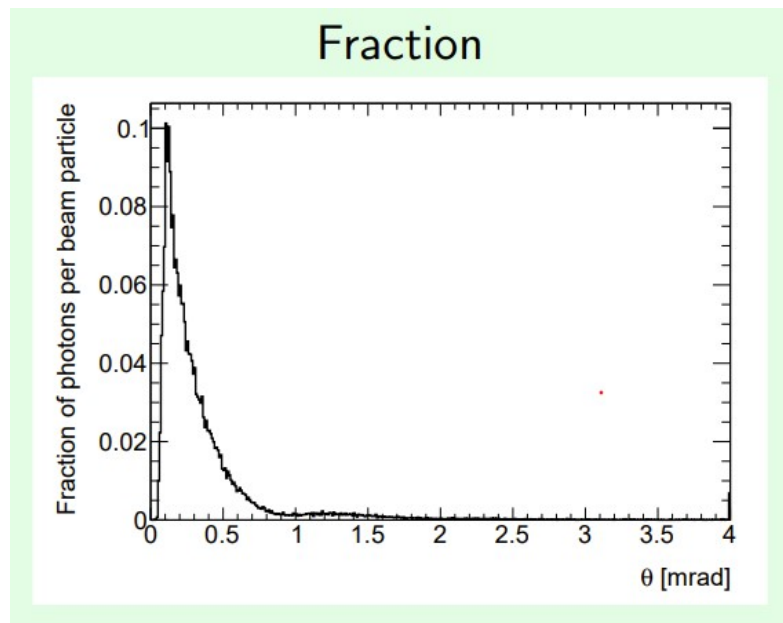


(a) Зависимость энергии от угла

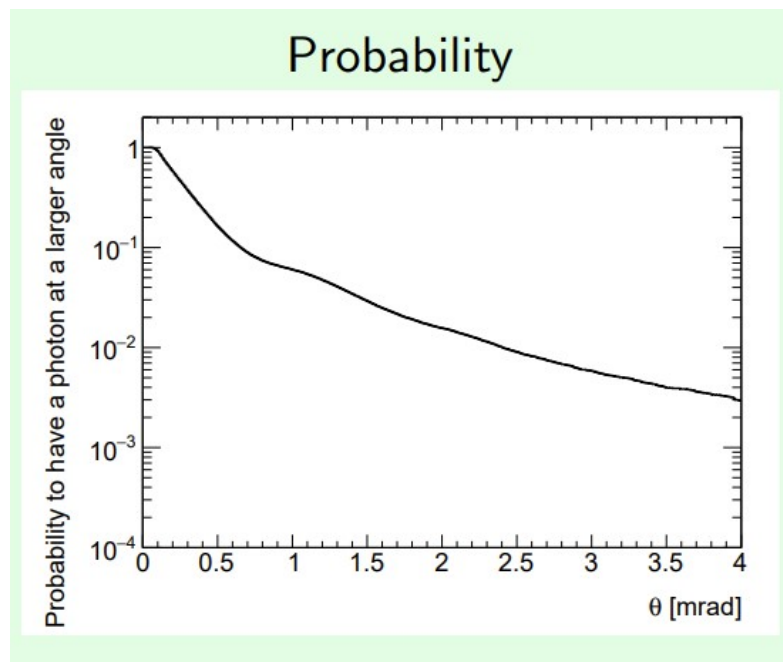


(b) Спектр энергии

Рисунок 13 – Пример зависимости и спектра для фотонов



(a) Угловой спектр фотонов переходного излучения, нормированный на одну частицу пучка



(b) Спектр вероятности фотону рассеяться на больший угол

Рисунок 14 – Угловые спектры фотонов

## 7 Заключение

В данной работе была осуществлена кластеризация - важный этап по анализу данных с эксперимента по тестированию детектора переходного излучения на основе кристалла GaAs на пучке заряженных частиц.

Первым этапом работы был расчет расстояния от центра детектора радиатора до детектора, необходимые для корректного построения кластеров. Для систематизации и повышенной информативности полученные расстояния были записаны в соответствующую таблицу.

Далее был проведен сам процесс кластеризации для некоторых испытаний, после чего полученные результаты было необходимо проверить. Это было реализовано сравнением этих результатов с аналогичными результатами, полученными в 2018 году. После проверки процесс кластеризации был проведен уже для всех испытаний.

Суммарно кластеризация была проведена для более чем 150 испытаний, в каждом случае кластеризация проводилась по двум сценариям определения кластеров и в результате было получено более чем 15 гистограмм для каждого случая. Полученные гистограммы можно использовать для дальнейшего анализа, в том числе и для анализа фотонов переходного излучения, рожденных во время эксперимента



# 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. Timepix3: a 65K channel hybrid pixel readout chip with simultaneous ToA/ToT and sparse readout / T. Poikela [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2014. — May. — Vol. 9, no. 05. — P. C05013–C05013.
3. First measurements of the spectral and angular distribution of transition radiation using a silicon pixel sensor on a Timepix3 chip / E. Schioppa [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — Vol. 936. — P. 523–526.
4. Transition radiation measurements with a Si and a GaAs pixel sensor on a Timepix3 chip / F. Dachs [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2020. — Vol. 958. — P. 162037.
5. Transition radiation, URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/radiat/tr.htm>.