

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

УДК 539.144.3

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
**АНАЛИЗ КООРДИНАТНОЙ ТОЧНОСТИ  
ДЕТЕКТОРА ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА  
ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ПИКСЕЛЬНЫХ СЕНСОРОВ**

Научный руководитель  
доцент

\_\_\_\_\_ С. Ю. Смирнов

Студент

\_\_\_\_\_ Л. А. Якобнюк

Москва 2022

# Содержание

<b>Введение</b>	<b>3</b>
Актуальность . . . . .	3
Цель работы . . . . .	3
<b>1 Описание установки</b>	<b>4</b>
<b>2 Предварительный анализ используемых программ</b>	<b>4</b>
<b>3 Метод кластеризации</b>	<b>6</b>
<b>4 Методы определения положения частицы</b>	<b>6</b>
<b>5 Выводы</b>	<b>7</b>

# Введение

Переходное излучение – это вид электромагнитного излучения, возникающего при пересечении заряженной частицей границы раздела сред с разными диэлектрическими проницаемостями. Данное излучение ещё в 1945 году было предсказано В.Л.Гинзбургом и И.М.Франком

Наибольший интерес представляет переходное излучение, созданное ультрарелятивистской частицей ( $\gamma \gg 1$ ). Формируется переходное излучение, основная энергия которого лежит в области рентгеновского спектра. В этом спектре энергия довольно сильно зависит от Лоренц-фактора (гамма-фактора).

Детекторы переходного излучения (TRDs) широко используются для регистрации ультрарелятивистских заряженных частиц. Больше информации о Лоренц-факторе можно получить, используя угловое распределение переходных фотонов.

## Актуальность

Столкновения между адронами при  $\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$  и малым поперечным импульсом  $p_T$  мало изучены на данный момент, однако изучение этих процессов способно помочь в исследовании спектров космических лучей, например аномальное количество мюонов в них может быть следствием распада адронов содержащих очарованные и прелестные кварки, 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 около  $\sqrt{s} = 63 \text{ ГэВ}$ .

Этот эксперимент подразумевает создание адронного спектрометра Very Forward Hadron Spectrometer (**VFHS**) 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 что бы детектор работал в диапазоне от  $\gamma = 10^3$  для 1Тэв  $p$  до  $\gamma = 3.6 * 10^4$  для 5 ТэВ  $\pi$ . Измерение гамма-фактора с точностью в 10% должно дать возможность корректно разделять  $\pi$ ,  $K$  и  $p$ . По угловому спектру переходного излучения можно определить гамма-фактор, поэтому в ходе данного эксперимента предполагается использовать пиксельный детектор переходного излучения, определяющий в том числе и угол распространения излучения.

Детектор переходного излучения, прототип которого описан в статье [2] является возможно единственным подходящим детектором для создания **VFHS**.

## Цель работы

С 2017 по 2021 годы было проведено 3 эксперимента по изучению переходного излучения: в 2017 г. использовался сенсор из кремния, а в 2018 и 2021 гг. был использован сенсор из арсенида галлия. Целью работы является анализ координатной точности пиксельного детектора переходного излучения с сенсором из Si (эксперимент 2017 года) и из GaAs (эксперименты 2018 и 2021 годов). Необходимо рассмотреть разные методы определения координатной точности и получаемые в результате использования этих методов значения.

# 1 Описание установки

В ходе работы производился анализ данных полученных с экспериментальной установки (Схема установки 1 представлена в статье [3] ), состоящей из многослойного радиатора, находящегося на расстоянии около 2 м от детектора, трубы, заполненной гелием для предотвращения поглощения фотонов переходного излучения и сенсора из кремния толщиной 500 мкм, соединенного с Timepix3 чипом, который использовался как детектор с квадратной матрицей  $256 \times 256$  пикселей с шагом пикселя в 55 мкм. За

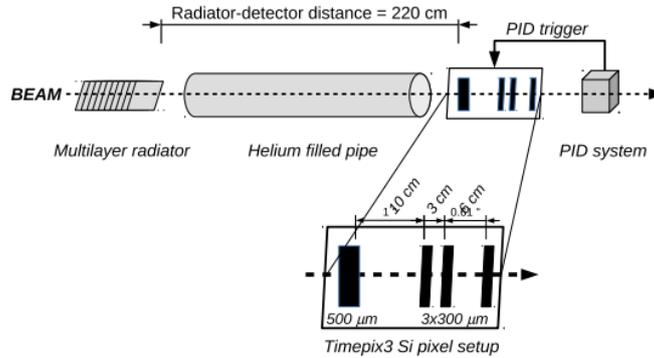


Рис. 1 — Схема экспериментальной установки

детектором располагается система определения частиц, состоящая из калориметра из свинцового стекла, детектора предварительного ливня и черенковского детектора (не показан на картинке). Рентгеновские лучи поглощаются в первом датчике, а заряженная частица продолжает свой путь и оставляет след в следующих трёх пиксельных плоскостях, и по этому следу можно реконструировать трек частицы.

# 2 Предварительный анализ используемых программ

## GaAs-2018 test beam summary

(run numbers and statistics)

/eos/atlas/atlascentrondisk/det-trt/tb/testbeam2018/GaAs/Analysis/pass2/run\*\_3.root

		Mylar		Polyethylene				No radiator	Dummy radiator
		50μ/3mm		67μ/3mm		67/2	91/2.3		
		30 foils	90 foils	30 foils	90 foils	90 foils	30 foils		
e/π 20 GeV	2 m	32+51 11948-21201 11904-20284	31+50 12186-21732 11835-21144	35+53 23881+17772 22154+17292	33+34+52 7822+18888-20040 7204+18237+19011	36+54 2844+20537 23924+19266	37+55 29442+19080 22778+18247	38 23261 21265	39 22413 21618
	4 m	43 48687 48610	40+41+42 23202-17182+14262 22287+1852+13887	45 32882 32798	44 43487 43444	46+47 34152-20685 3378-20093	48 32062 32268	-	49 18222 18288
μ 120 GeV	2 m	2 82585 81880	1 88841 87498	4 95270 94292	3 92669 94978	5 97810 96781	6 87222 86790	-	7 90856 89857
	4 m	9 81768 80598	8 88223 87182	11+12 42758-49781 43287+49125	10 92885 94882	13+14 77279-29131 78253-28783	15 91813 93822	-	16 94856 92008
μ 180 GeV	2 m	25 64878 63929	24 64183 63991	27 63381 62130	26 64885 63400	28 61135 59887	29 42254 41821	-	30 21882 21187
	4 m	18 68273 64822	17 68187 63820	20 67246 65848	19 63876 64584	21 68843 64987	22 60688 63822	-	23 63820 62493
μ 290 GeV	2 m	61 40326 39207	62 39374 39225	59 38957 39079	60 38118 38949	57 48124 42982	56 38027 34728	-	58 39228 38142
	4 m	68 23207 22873	63 22443 22548	67 22828 22730	64 28178 28565	65 28105 27158	66+70 18265+17828 17211+17182	-	69 22495 24885

It's actually calculated: 39846  
(this is just an old table)

Statistics:  
Upper: TRTB2018  
Lower: TRD\_unifiedformat

Рис. 2 — Результаты обработки данных с пиксельного детектора в эксперименте 2018 года по исследованию детектора из GaAs

Для обработки данных сотрудниками эксперимента были написаны 2 программы: TRTB2018 (программа 2018 года) и TRD\_unifiedformat (программа 2020 года, по-

зиционируется как усовершенствованная версия программы 2018 года). В процессе анализа была выявлена проблема: при обработке экспериментальных данных программой 2020 года примерно 1-3 процента событий терялся по сравнению с данными, полученными при обработке программой 2018 года (рисунок 2). Поэтому было принято решение об предварительном анализе этих программ для выявления и устранения ошибки. Был применен метод последовательных обрезаний, т.е. последовательное наложение всех возможных ограничений на данные и построение сравнительной гистограммы, с целью выяснения момента, с которого начинается расхождение (и выявление этого ограничения, которое работает неправильно). На рисунке 3 представлена данная гистограмма,

CutFlow (run 50: Mylar, 50 $\mu$ /3mm, 90 foils)

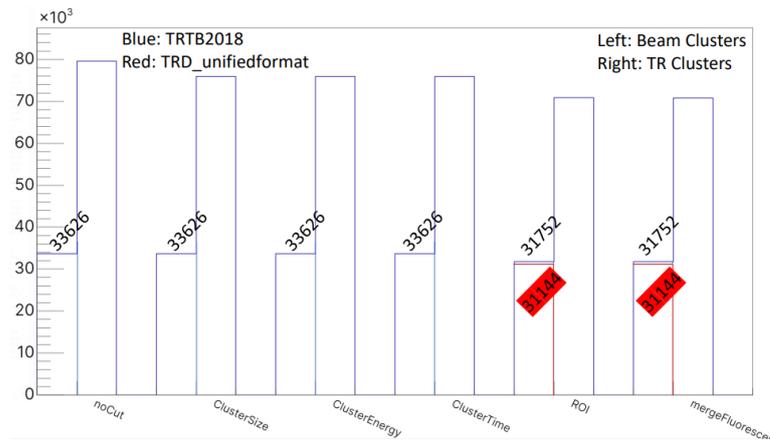


Рис. 3 — CutFlow (последовательные обрезания) для данных эксперимента 2018 года для двух разных программ обработки данных

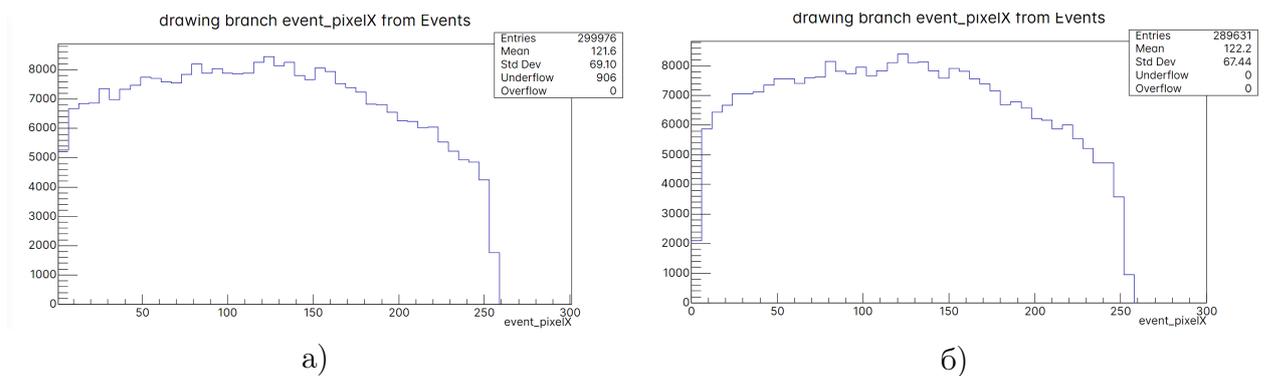


Рис. 4 — Сумма вхождений в каждую колонку пикселей: слева - после обработки программой 2018 года, справа - 2020

из которой видно, что события теряются после применения обрезания по ROI (region of interest - интересующие нас пиксели, крайние пиксели должны быть обрезаны как самые шумящие). Если посмотреть на гистограмму, показывающую сумму вхождений в каждую вертикальную колонку пикселей (рисунок 4), то видно, что старая программа не убирает вхождения в первый пиксель, который должен быть убран из статистики как один из самых шумящих, в отличие от новой. Основываясь на этом важном различии, можно сделать вывод: для кластеризации (этот метод будет описан далее) стоит использовать программу 2020 года.

### 3 Метод кластеризации

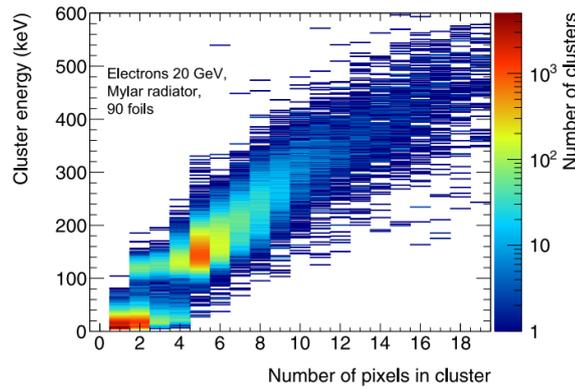


Рис. 5 — Двумерная гистограмма зависимости энергии кластера в зависимости от его размера

Кластер определяется как группа соседних сработавших пикселей, окруженных пустыми пикселями. Как только все пиксели сгруппированы в кластеры, энергии кластеров вычисляются путем суммирования энергий всех пикселей в кластере. На рисунке 5 представлена двумерная гистограмма зависимости энергии кластеров в зависимости от размеров кластеров (т.е. количества пикселей в кластере) для пучка электронов энергией 20 ГэВ, пересекающими 90-фольговый радиатор из майлара. Видно, что существует два основных семейства кластеров: кластеры большого размера с энергиями выше 80 кэВ соответствуют частицам, в то время как кластеры малого размера с более низкими энергиями соответствуют фотонам переходного излучения. Типичный размер кластера составляет 5-6 для частиц и 1-2 для фотонов.

### 4 Методы определения положения частицы

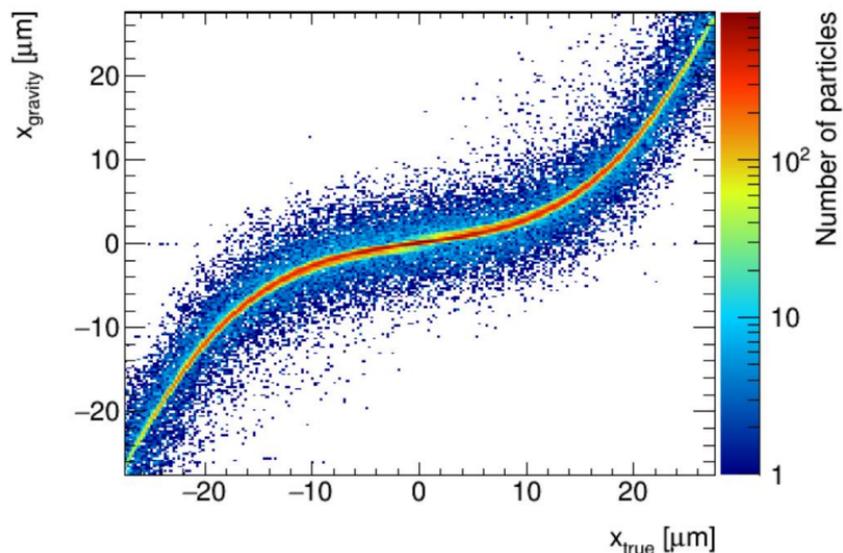


Рис. 6 — По горизонтальной оси-истинная координата частицы, по вертикальной - координата, восстановленная методом центра тяжести

Зачастую положение частицы определяется методом центра тяжести. В итоге получаем точность пиксельного детектора около 11 мкм [4]. Но этот метод не является самым точным. Восстановленное положение частицы отличается от реального её положения. Введем обозначения:  $x_{gravity}$  - положение, реконструированное методом центра тяжести,  $x_{true}$  - истинное положение частицы. Отклонение наглядно видно на рисунке 6. Эту зависимость называют S-кривой. Очевидно, что если бы истинное положение совпадало с положением, восстановленным методом центра тяжести, то зависимость выглядела бы как прямая из левого нижнего угла в правый верхний. Необходимо определить эту зависимость, т.е. найти функцию, которой можно лучше всего отфитировать эту кривую. Устранение смещения означает нахождение функции  $x_{corr}(x_{gravity})$ , такой что  $\frac{dN}{dx_{corr}}$  имеет ту же форму, что и  $\frac{dN}{dx_{true}}$ . Это можно получить, используя распределения:  $P_{true}(x) = \frac{1}{N_{tot}} \int_{-p/2}^x (\frac{dN}{dx_{true}}) dx_{true} dx$  и  $P_{gravity}(x) = \frac{1}{N_{tot}} \int_{-p/2}^x (\frac{dN}{dx_{gravity}}) dx_{gravity} dx$ . На

рисунке 7(b) представлены  $p \cdot P_{true}(x)$  и  $p \cdot P_{gravity}(x)$ . Для равномерного  $\frac{dN}{dx_{true}}$   $P_{true}(x)$  это диагональ между  $-p/2$  и  $p/2$ , а  $x_{corr} = p \cdot (P_{gravity}(x_{gravity} - 0.5))$ . Для неравномерного  $\frac{dN}{dx_{true}}$  необходимо использовать горизонтальное расстояние, показанное на рисунке 7(b).

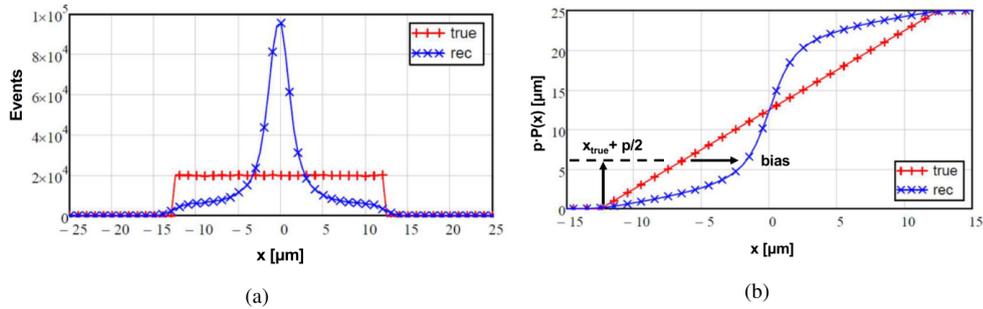


Рис. 7 — (a) Распределение  $\frac{dN}{dx}$  для  $x_{rec(gravity)}$  и  $x_{true}$ , (b) Нормализованные распределения кривых, показанных в (a), умноженные на  $p$ . Горизонтальная стрелка показывает среднее смещение, используемое для коррекции  $x_{gravity}$

## 5 Выводы

В ходе работы по определению координатной точности пиксельного детектора обнаружилась потеря событий при обработке данных одной и той же программой, но разных версий (обе программы написаны одним и тем же сотрудником эксперимента). Поэтому было принято решение о проведении досконального анализа с целью выявить ошибку. В результате оказалось, что в программе 2018 года не предусмотрено выкидывание крайних (самых шумящих) пикселей. Поэтому было принято решение в дальнейшем использовать программу 2020 года.

Также было проведено ознакомление с методами определения положения частицы. В результате оказалось, что метод центра тяжести не дает самых точных значений координаты частицы (около 11 мкм). При построении графика зависимости координаты частицы, восстановленной методом центра тяжести от истинной координаты частицы возникает S-кривая. При дальнейшей работе с этой S-кривой для координатной точности предположительно должно получаться значение лучше, чем 11 мкм.

Замечание: все данные, про которые говорится в предыдущем абзаце, были получены ранее методами Монте-Карло, поэтому в дальнейшем необходимо провести рас-

четы и проверить улучшение координатной точности при ориентировании на S-кривую для экспериментальных данных 2017 года (пиксельный детектор из Si).

## Список литературы

- [1] Michael Albrow. A Very Forward Hadron Spectrometer for the LHC and Cosmic Ray Physics. *PoS*, EDSU2018:048, 2018.
- [2] N Belyaev, M L Cherry, S A Doronin, K Filippov, P Fusco, F Gargano, S Konovalov, F Loparco, M N Mazziotta, A Mufazalova, S Nechaeva, D Ponomarenko, C Rembser, A Romaniouk, A A Savchenko, E Shulga, S Smirnov, Yu Smirnov, P Spinelli, L Sultanaliyeva, P Teterin, V Tikhomirov, K Vorobev, and K Zhukov. 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] E. J. Schioppa et al. First measurements of the spectral and angular distribution of transition radiation using a silicon pixel sensor on a Timepix3 chip. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 936:523–526, 2019.
- [4] J. Alozy et al. Studies of the spectral and angular distributions of transition radiation using a silicon pixel sensor on a Timepix3 chip. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 961:163681, 2020.