

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 №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 539.1.05

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ  
АНАЛИЗ КООРДИНАТНОЙ ТОЧНОСТИ ДЕТЕКТОРА  
ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПИКСЕЛЬНЫХ СЕНСОРОВ**

Студент \_\_\_\_\_ Л. А. Якобнюк

Научный руководитель \_\_\_\_\_ С. Ю. Смирнов

Москва 2023

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**АНАЛИЗ КООРДИНАТНОЙ ТОЧНОСТИ ДЕТЕКТОРА  
ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПИКсельНЫХ СЕНСОРОВ**

Студент

\_\_\_\_\_ Л. А. Якобнюк

Научный руководитель

\_\_\_\_\_ С. Ю. Смирнов

Рецензент,

к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ А. Г. Майоров

Секретарь ГЭК,

к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,

д.ф.-м.н., проф.

\_\_\_\_\_ М. Д. Скорохватов

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b>	<b>3</b>
Актуальность . . . . .	3
Цель работы . . . . .	4
<b>1 Описание установки</b>	<b>5</b>
1.1 Наборы радиаторов . . . . .	6
1.2 Микросхема Timerix3 . . . . .	6
1.3 Детектор . . . . .	7
1.4 Система PID . . . . .	7
<b>2 Метод кластеризации</b>	<b>9</b>
2.1 Механизм кластеризации . . . . .	9
2.2 Разделение кластеров по энергиям . . . . .	9
2.3 Потеря событий в процессе кластеризации . . . . .	10
<b>3 Методы определения положения частицы</b>	<b>13</b>
<b>4 Юстировка пиксельных плоскостей</b>	<b>14</b>
4.1 Используемое ПО . . . . .	14
4.2 Обработка данных . . . . .	14
<b>5 Восстановление трека частицы</b>	<b>19</b>
<b>Заключение</b>	<b>23</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>25</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 случае переходное излучение носит пороговый характер зависимости от  $\gamma$ , что позволяет разделять частицы по массе.

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  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ и малым поперечным импульсом  $p_T$  мало изучены на данный момент, однако тщательное исследование 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 на ЛНС [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 CERN при энергиях столкновения около  $\sqrt{s} = 63$  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 протонов с энергией 1 ТэВ до  $\gamma = 3.6 * 10^4$  для пи-мезонов с энергией 5 ТэВ . 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, так как полупроводниковые пиксельные детекторы предоставляют уникальную возможность для точных одновременных измерений спектральных и угловых параметров

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

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

С 2017 по 2021 годы на пучке ускорителя SPS в ЦЕРН 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).

# 1 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Измерения проводились на установке SPS CERN со смешанными электронными и пионными пучками с энергией 20 ГэВ/с, а также мюонными пучками с энергией 120 и 180 ГэВ/с, проходящими через различные типы радиаторов. Экспериментальная установка, представленная на рисунке 1.1 [3], состоит 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 [4], который использовался как детектор. На расстоянии 100 мм от детектора расположены 3 кремниевые плоскости, также установленные на Timepix3 чипы, расстояние между первой и второй плоскостями - 31 мм, а между второй и третьей - 62 мм. Исследуемый детектор расположен перпендикулярно пучку, а дополнительные плоскости наклонены на  $9^\circ$  относительно осей X и Y (пучок направлен вдоль оси Z). Это приближение оптимального угла наклона датчика к пучку частиц, при котором пространственное разрешение может быть улучшено путем взвешивания накопленного заряда в соседних пикселях. Когда датчик находится под таким углом, практически все треки будут оставлены кластерами, состоящими из нескольких пикселей [5]. За детекто-

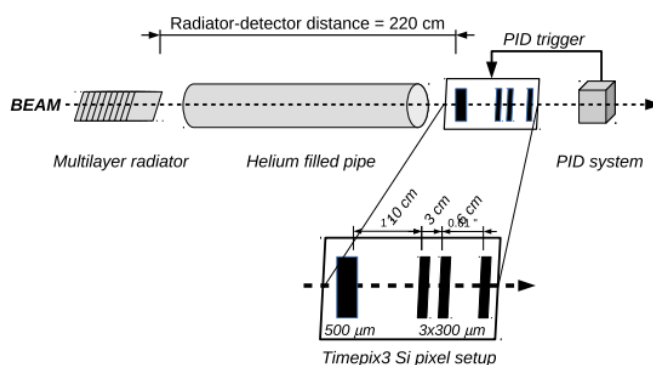


Рисунок 1.1 — Схема экспериментальной установки

ром 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.

## 1.1 НАБОРЫ РАДИАТОРОВ

Radiator	Mylar		Polyethylene		Polypropylene			Fibre	Dummy	No radiator
	50 $\mu\text{m}/3\text{ mm}$	125 $\mu\text{m}/3.3\text{ mm}$	15 $\mu\text{m}/0.2\text{ mm}$	62 $\mu\text{m}/2.2\text{ mm}$	5 sets	3 sets	5 sets			
Beam	1 set	3 sets	1 set	3 sets	5 sets	3 sets	5 sets			
e/ $\pi$ 20 GeV	18-22	23-27	–	28-31	32-36	50+51	81	76	52+77	53
$\mu$ 120 GeV	68	69	71	72	73	70	–	67	74	–
$\mu$ 180 GeV	54+66	55+56	57	58+59	60+61	62+63	80	78	65+79	64

Рисунок 1.2 — Результаты обработки данных с пиксельного детектора в эксперименте 2017 года по исследованию детектора из Si

На рисунке 1.2 представлена сводная таблица, несущая информацию о типе радиатора и пучка, использованных в каждом конкретном сеансе измерений. Радиатор – набор пленок, создающих границу раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью. Необходимо много слоёв, для увеличения числа переходных фотонов. Из таблицы видно, что в качестве радиатора использовались пленки из майлара, полипропилена и полиэтилена различных толщин, а также были сеансы измерений с Fibre и Dummy радиаторами и вообще без радиатора

## 1.2 МИКРОСХЕМА TИМЕРИХ3

Чип Timerix3 толщиной 700 мкм состоит из двух основных частей: пиксельной матрицы (исследуемый детектор) и периферии. Чип позволяет каждому пикселю работать в трёх режимах: подсчет событий, время прибытия (ToA) и превышение порогового значения (ToT) [5].

### 1.3 ДЕТЕКТОР

Детектор представляет собой квадратную пиксельную матрицу размером  $256 \times 256$  пикселей, каждый из пикселей  $55 \times 55$  мкм. Благодаря такой структуре появляется возможность фиксировать не только энергетические, но и одновременно угловые характеристики поглощенных фотонов переходного излучения с высоким разрешением.

### 1.4 СИСТЕМА PID

- Детектор черенковского излучения - прибор для регистрации заряженных частиц. Принцип работы основан на регистрации излучения Вавилова-Черенкова, возникающего при движении заряженной частицы в прозрачной среде со скоростью, большей скорости света в данной среде. Фотоны черенковского излучения испускаются под углом  $\alpha$  к направлению движения частицы, причем величина этого угла определяется соотношением  $\cos \alpha = 1/\beta n$ , где  $\beta = v/c$ ,  $n$  – показатель преломления среды. Определяя этот угол можно узнать энергию частицы.
- Калориметр из свинцового стекла (LeadGlass Calorimetr). Калориметры предназначены для измерения полной энергии частиц. Попав в вещество калориметра частица рождает электромагнитный или адронный ливень, передавая им свою энергию. Чем больший процент ливня поглотится в калориметре, тем точнее будет измерена энергия. Калориметры чувствительны как к заряженным, так и к нейтральным частицам. Калориметр из свинцового стекала относится к типу гомогенных, т.е. поглощающий материал одновременно является детектирующим. Основное преимущество гомогенных детекторов – вся энергия падающей частицы поглощается в детектирующей среде.
- Детектор предварительного развития ливня (PreShower detector) позволяет эффективно разделять источники высвобожденной энергии, отличая одиночные фотоны от пар фотонов, появляющихся в результате распадов пи-мезонов. Принцип его работы такой же, как и у



калориметра. Он состоит из свинцовой пластины толщиной 5 мм и сцинтилляционной пластины толщиной 20 мм.

## 2 МЕТОД КЛАСТЕРИЗАЦИИ

В данной главе описан механизм кластеризации при обработке данных с пиксельных полупроводниковых детекторов переходного излучения.

В разделе 2.1 разобран сам механизм кластеризации, в разделе 2.2 представлены два различных типа кластеров, а в разделе 2.3 обнаружена и решена проблема потери событий при обработке данных двумя версиями одной и той же программы кластеризации.

### 2.1 МЕХАНИЗМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Кластер определяется как группа соседних сработавших пикселей, окруженных пустыми пикселями [6]. Как только все пиксели сгруппированы в кластеры, энергии кластеров вычисляются путем суммирования энергий всех пикселей в кластере. В детекторе практически поглощается рентгеновское излучение, поэтому в следующих за ним пиксельных плоскостях обнаруживается в основном только один кластер от заряженной частицы.

### 2.2 РАЗДЕЛЕНИЕ КЛАСТЕРОВ ПО ЭНЕРГИЯМ

На рисунке 2.1 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

переходного излучения.

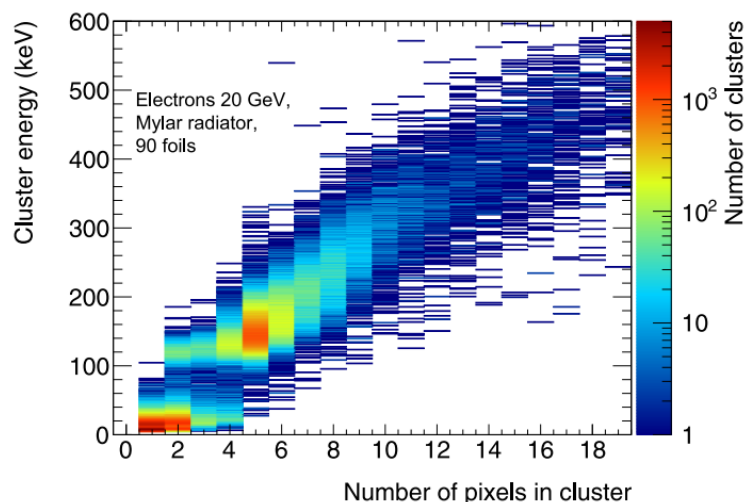


Рисунок 2.1 — Двумерная гистограмма зависимости энергии кластера в зависимости от его размера

### 2.3 ПОТЕРЯ СОБЫТИЙ В ПРОЦЕССЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Для обработки данных сотрудниками эксперимента были написаны 2 программы: TRTB2018 (программа 2018 года) и TRD\_unifiedformat (программа 2020 года, позиционируется 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 2.2 - самое верхнее число в серых ячейках - номер сеанса измерений, среднее - результат обработки данных «старой» программой, а нижнее - «новой»).

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 2.3 представлена данная гистограмма, из которой видно, что события теряются после применения обрезания по ROI (region of interest - интересующие нас пиксели, крайние пиксели должны быть обрезаны как самые шумя-

# GaAs-2018 test beam summary

(run numbers and statistics)

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

		Mylar		Polyethylene				No radiator	Dummy radiator
		50 $\mu$ /3mm		67 $\mu$ /3mm		67/2	91/2.3		
		30 foils	90 foils	30 foils	90 foils	90 foils	30 foils		
e/ $\pi$ 20 GeV	2 m	32+51 11943+31201 11604+30394	31+50 12139+31752 11835+31144	35+53 22881+17772 22154+17335	33+34+52 7822+18838+20040 7594+18297+19601	36+54 23544+20437 22854+19995	37+55 23442+19080 22719+18547	38 22351 21595	39 22413 21613
	4 m	43 49887 48510	40+41+42 20926+2768+14352 20267+2692+13897	45 33602 32768	44 40497 39846	46+47 3415+29565 3376+29093	48 32992 32208	- - -	49 19023 18399
$\mu$ 120 GeV	2 m	2 82565 81655	1 88941 87748	4 95270 94250	3 95959 94973	5 97810 96761	6 87722 86760	- - -	7 90656 89637
	4 m	9 87605 86598	8 98229 97162	11+12 43758+49781 43287+49126	10 95893 94932	13+14 77279+29131 76353+28783	15 97570 96352	- - -	16 94856 93606
$\mu$ 180 GeV	2 m	25 64876 63539	24 64193 62891	27 63361 62100	26 64685 63400	28 61135 59937	29 42204 41321	- - -	30 21662 21187
	4 m	18 66070 64830	17 65147 63900	20 67245 65846	19 65876 64594	21 65643 64367	22 65069 63802	- - -	23 63830 62493
$\mu$ 290 GeV	2 m	61 40339 38906	62 29374 28325	59 36357 35019	60 38116 36849	57 45124 43592	56 36037 34703	- - -	58 39528 38142
	4 m	68 28001 26979	63 28443 27546	67 26626 25709	64 38173 36955	65 28100 27158	66+70 18556+17853 17911+17160	- - -	69 25963 24965

Рисунок 2.2 — Результаты обработки данных с пиксельного детектора в эксперименте 2018 года по исследованию детектора из GaAs

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

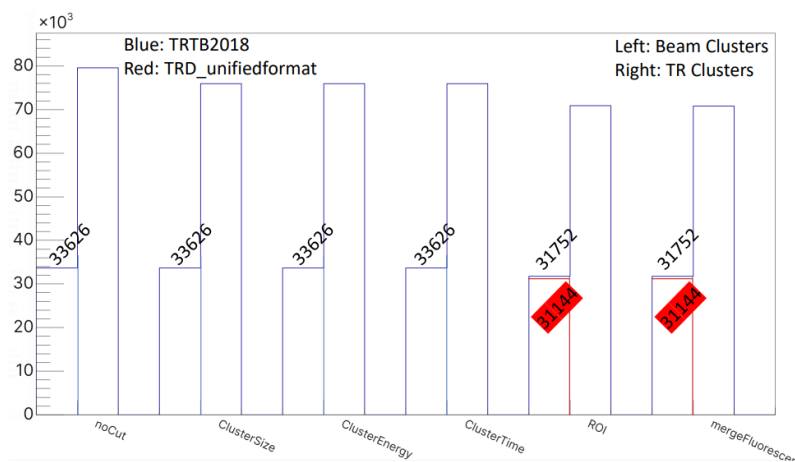


Рисунок 2.3 — CutFlow (последовательные обрезания) для данных эксперимента 2018 года для двух разных программ обработки данных

щие). Если посмотреть на гистограмму, показывающую сумму вхождений в каждую вертикальную колонку пикселей (рисунок 2.4), то видно, что

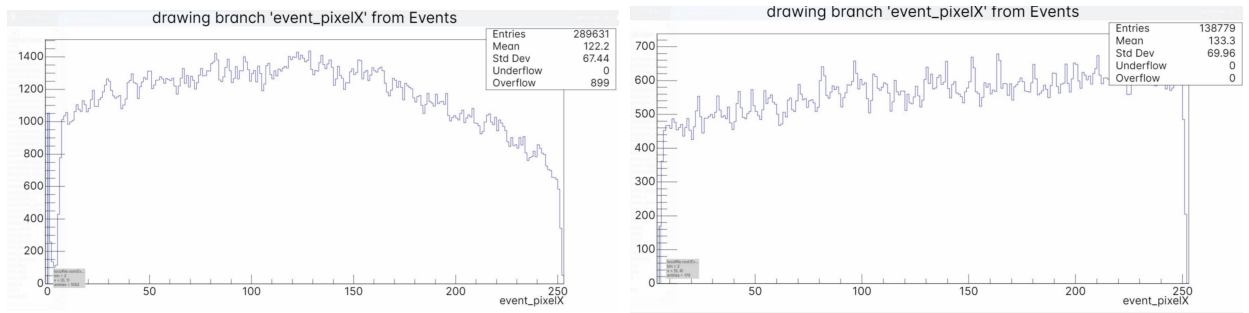


Рисунок 2.4 — Сумма вхождений в каждую колонку пикселей: слева - после обработки программой 2018 года, справа - 2020

старая программа не убирает вхождения в крайние 5 пикселей, которые должны быть убраны из статистики как один из самых шумящие, в отличие от новой.

Основываясь на этом важном различии, можно сделать вывод: для кластеризации стоит использовать программу 2020 года

## 3 МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ

Зачастую положение частицы определяется методом центра тяжести. В итоге получаем точность пиксельного детектора около 11 мкм [6]. Но этот метод не является самым точным. Восстановленное положение частицы отличается от реального её положения, что наглядно видно на рисунке 3.1 . Чем дальше от центра пикселя попадает частица, тем больше рас-

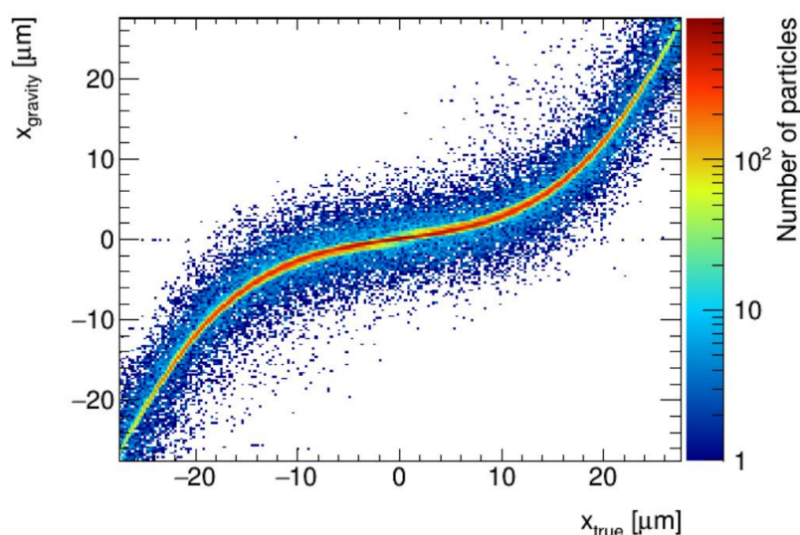


Рисунок 3.1 — По горизонтальной оси - истинная координата частицы, по вертикальной - координата, восстановленная методом центра тяжести

хождение в определении её положения. 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. Таким образом, необходимо провести фит этой так называемой S-кривой, и с помощью этого откорректировать положение, определенное методом центра тяжести. В результате должно получиться улучшенное значение координатного разрешения.

В данной работе будет рассматриваться только метод центра тяжести для расчёта координатной точности.

## 4 ЮСТИРОВКА ПИКсельНЫХ ПЛОСКОСТЕЙ

### 4.1 ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ПО

Вся дальнейшая работа была сделана с использованием программы Proteus [7]. Это программное обеспечение для восстановления и анализа данных с пучковых телескопов. Она берет исходные данные, группирует сработавшие пиксели в кластеры, находит треки кластеров на нескольких плоскостях, оценивает оптимальные параметры трека на выбранных плоскостях и предоставляет выходные данные для дальнейшего анализа.

Данная программа позволяет искать и убирать из статистики зашумленные пиксели, задавать параметры пиксельных детекторов переходного излучения (материал, количество строк и столбцов пикселей, толщину датчика и т.д.) и юстировать эти детекторы, устанавливать необходимую геометрию (можно задать количество пиксельных плоскостей, расстояния между ними и наклон согласно экспериментальной установке).

### 4.2 ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Среди выходных данных программы Proteus имеются гистограммы, показывающие отклонения в определении координаты кластера двумя разными пиксельными плоскостями. Они представлены на рисунке 4.1. Для удовлетворительного фитирования функцией Гаусса данных гистограмм, необходимо выбрать более узкий диапазон по оси абсцисс и увеличить количество бинов. Результаты - на рисунке 4.2. По результатам фитирования были получены расстояния, на которые плоскости смещены друг относительно друга: плоскость 0 сдвинута относительно плоскости 1 на  $650,6 \pm 0,1$  мкм, относительно плоскости 2 на  $704,6 \pm 0,2$  мкм, а плоскость 1 от-

носителем плоскости 2 соответственно на  $53,8 \pm 0,2$  мкм по оси X (по Y они равны соответственно  $-213,6 \pm 0,2$  мкм,  $-370,8 \pm 0,3$  мкм,  $-159,4 \pm 0,1$  мкм). По этим результатам плоскости были выровнены друг относительно друга в несколько итераций (рисунок 4.3).

На рисунке 3 можно заметить, что полученные данные хорошо фитируются функцией Гаусса, за исключением пика посередине и двух симметричных пиков по бокам. Возможное решение проблемы - убрать кластеры из одного сработавшего пикселя. Поэтому была произведена оценка числа кластеров из одного пикселя для каждой из пиксельных плоскостей. Результат - около 3 % кластеров для каждой из плоскостей состоят из одного пикселя.

Далее были построены гистограммы с применением условия на размер кластера, но результат практически не изменился: чуть улучшились параметры фитирования, но пики остались (рисунок 4.4).



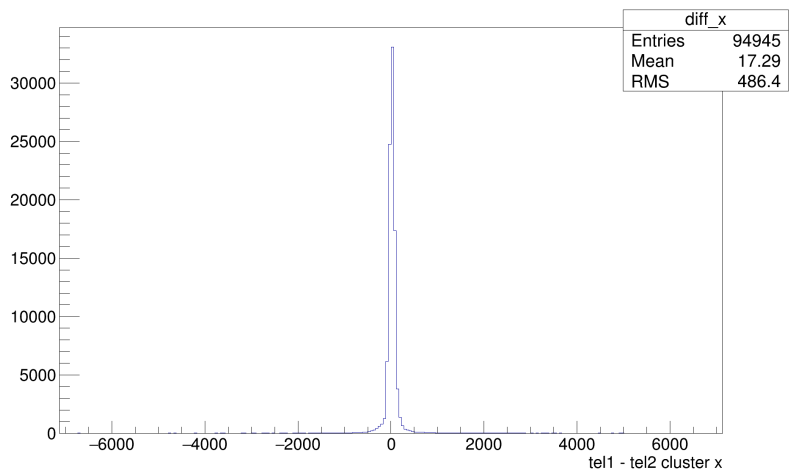
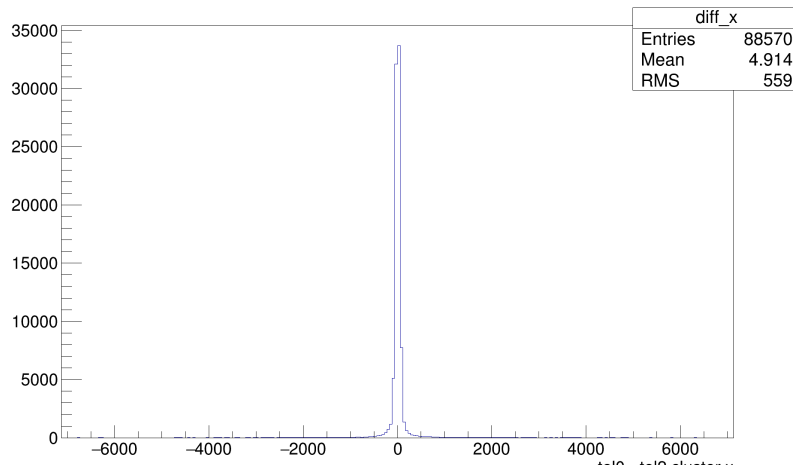
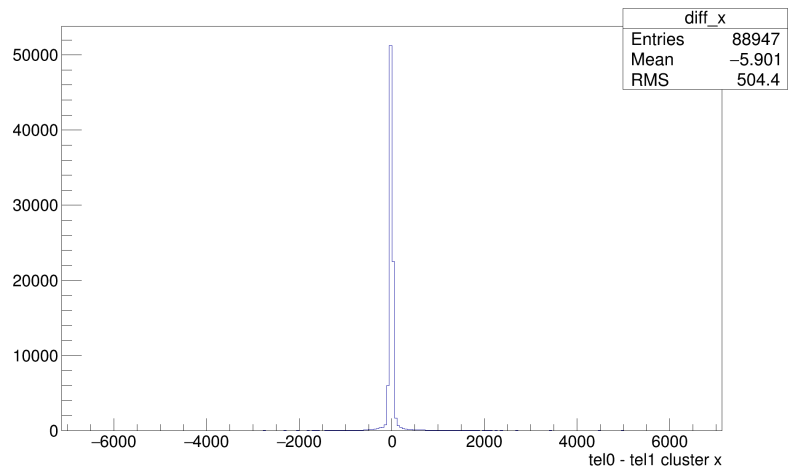
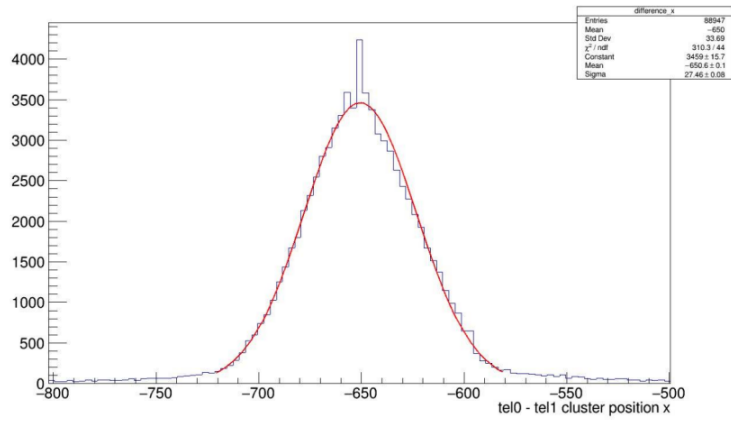
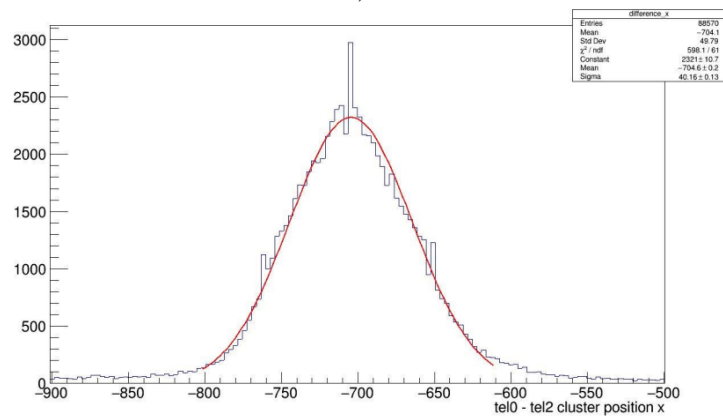


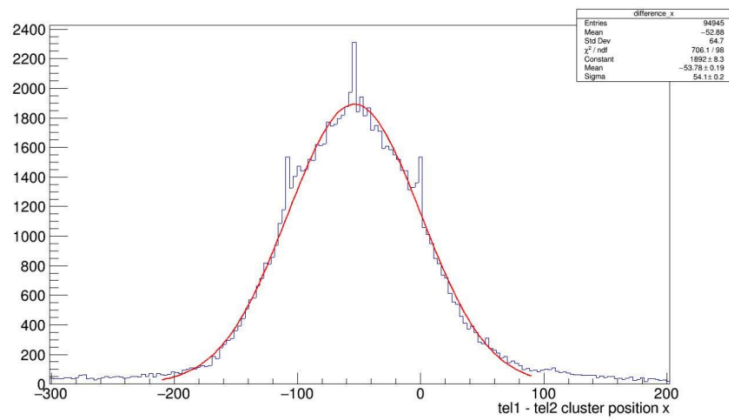
Рисунок 4.1 — Разница в определении координаты  $X$  кластера разными пиксельными плоскостями



а)



б)

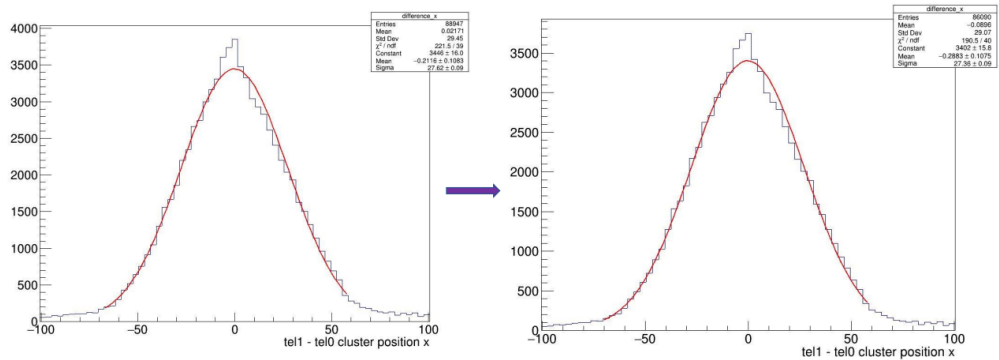


в)

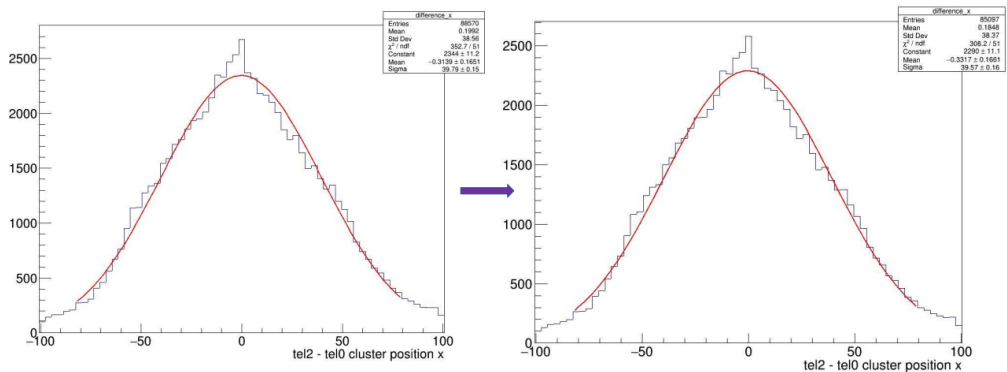
Рисунок 4.2 — Результаты фитирования



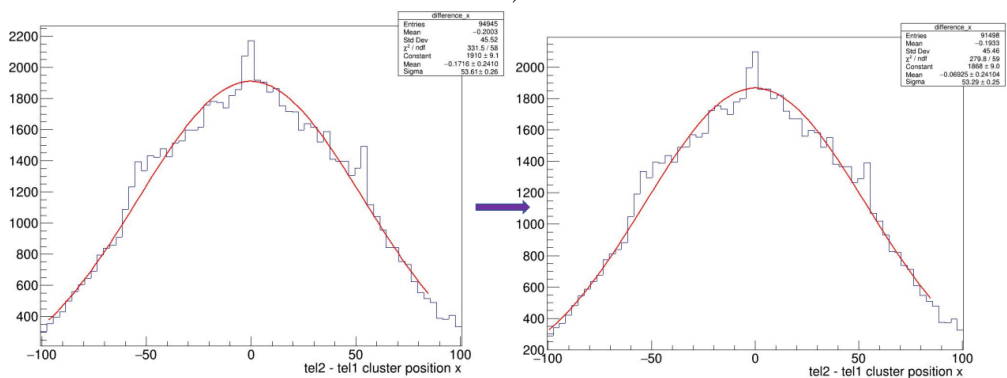
Рисунок 4.3 — Выравнивание пиксельных плоскостей



а)



б)



в)

Рисунок 4.4 — Разница в определении координаты X кластера разными пиксельными плоскостями после юстировки

## 5 ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТРЕКА ЧАСТИЦЫ

Для того, чтобы восстановить трек частицы в пространстве, сперва необходимо учесть, что в эксперименте плоскости были наклонены на  $9^\circ$  относительно осей  $X$  и  $Y$ , что можно наблюдать на рисунке 5.1. По вертикальной оси отложена  $Z$ -координата кластера, а по горизонтальной -  $Y$ -координата кластера. Если бы плата стояла строго перпендикулярно оси  $Z$ , то такая зависимость представляла бы собой прямую. Однако видно, что все координаты  $X$  смещены на определенные углы по двум осям. Поэтому необходимо с помощью матриц поворота преобразовать координаты кластера, что и было сделано далее (рисунок 5.2).

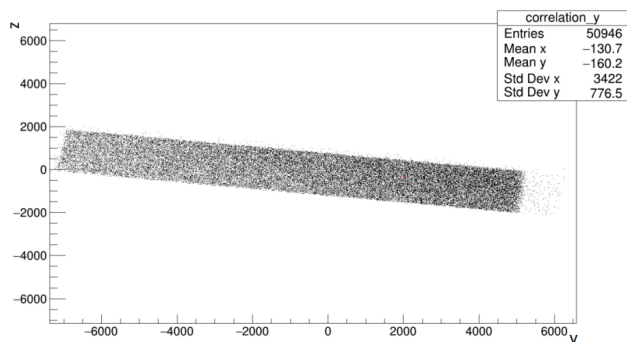


Рисунок 5.1 — Демонстрация наклона пиксельных плоскостей

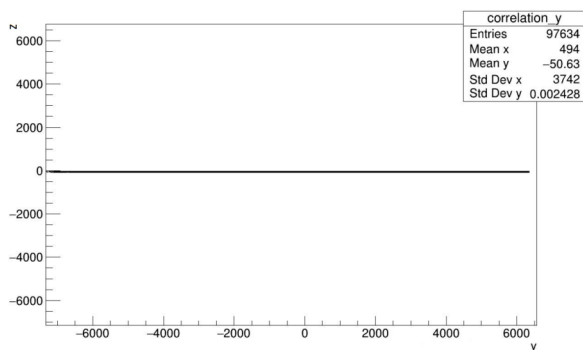


Рисунок 5.2 — Демонстрация отсутствия наклона плат после преобразований

Для получения значения координатной точности необходимо проделать следующие действия:

1. Берутся любые 2 пиксельные плоскости.
2. На этих двух плоскостях вычленяются координаты кластера.
3. По этим двум точкам в пространстве проводится трек и проецируется на третью плоскость.
4. Строится гистограмма отклонения спроецированной на третью плоскость точки от позиции кластера, зафиксированной плоскостью.
5. Среднеквадратичное отклонение ( $\sigma$ ) полученного отфитированного распределения Гаусса и даёт значение координатной точности.

Данная гистограмма называется «Residuals». При этом необходимо учитывать только те события, в которых кластер пересёк все три пиксельные плоскости. Полученные результаты представлены на рисунках 5.3, 5.4, 5.5 и 5.6 .

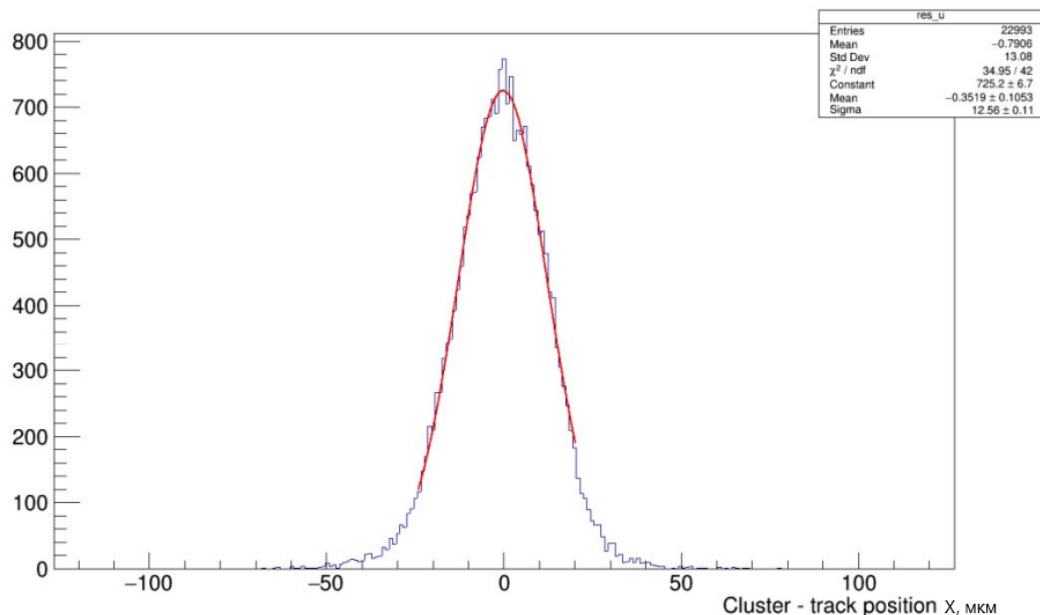


Рисунок 5.3 — Измерение координатной точности для первой пиксельной плоскости по оси X

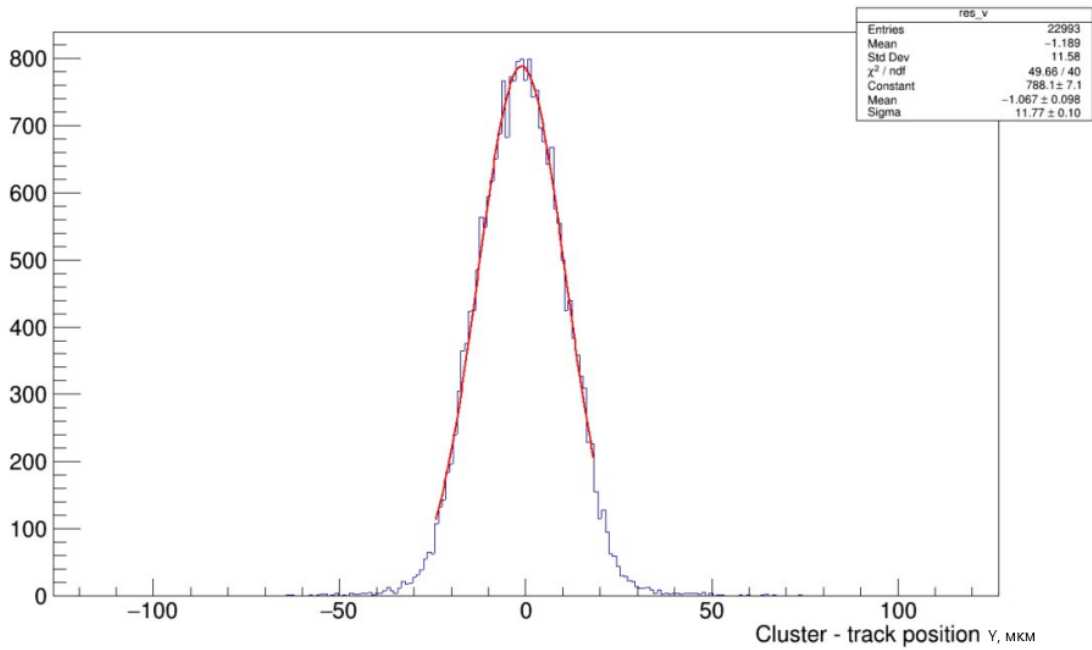


Рисунок 5.4 — Измерение координатной точности для первой пиксельной плоскости по оси Y

Получаем следующие значения координатной точности:

- $12,6 \pm 0,1$  мкм для первой плоскости,  $18,7 \pm 0,1$  мкм для второй и  $6,20 \pm 0,04$  мкм для третьей плоскости по оси X;
- $11,8 \pm 0,1$  мкм для первой плоскости,  $18,0 \pm 0,1$  мкм для второй и  $5,74 \pm 0,04$  мкм для третьей плоскости по оси Y.

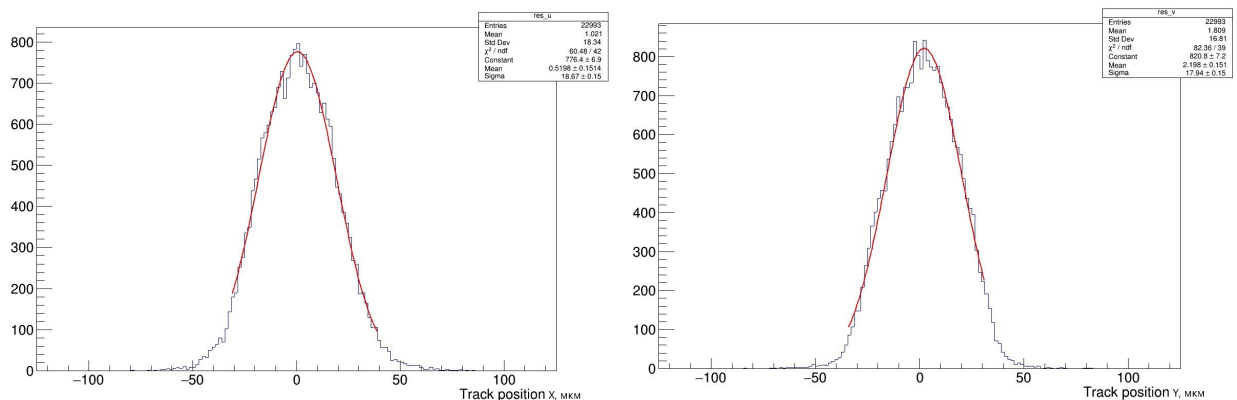


Рисунок 5.5 — Измерение координатной точности для второй пиксельной плоскости: слева - по оси X, справа - Y

После выполнения всех этих действий и получения значений координатной точности трёх дополнительных пиксельных плоскостей необходимо

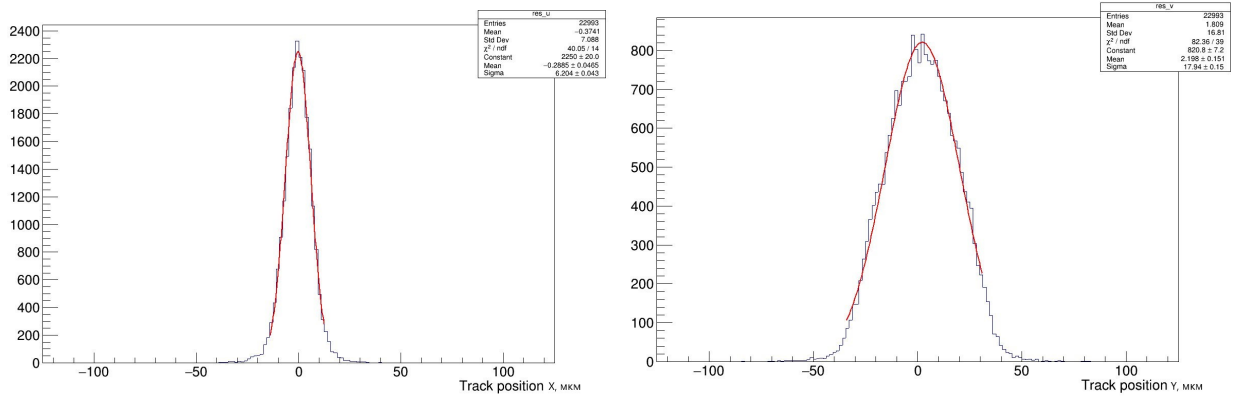


Рисунок 5.6 — Измерение координатной точности для третьей пиксельной плоскости: слева - по оси X, справа - Y

методом наименьших квадратов независимо в плоскостях XOZ и YOZ по координатам частицы, зафиксированной плоскостями, провести прямую до исследуемого детектора, и уже для него построить «Residuals». Результаты представлены на рисунке 5.7

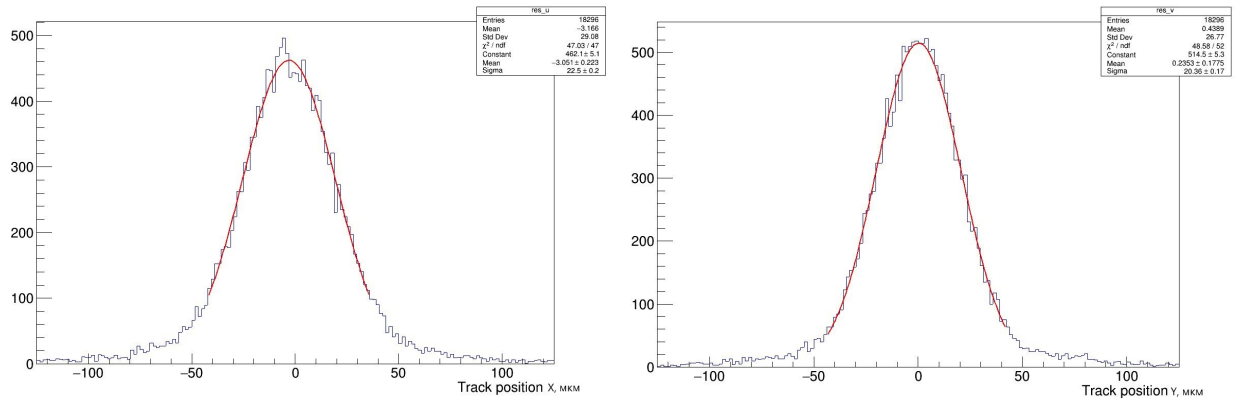


Рисунок 5.7 — Измерение координатной точности для исследуемого детектора: слева - по оси X, справа - Y

Получаем такие значения координатной точности исследуемого кремниевое детектора переходного излучения:  $22,5 \pm 0,2$  мкм по оси X,  $20,4 \pm 0,2$  мкм по оси Y.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 в дальнейшем необходимо 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. Поэтому было начато создание алгоритма улучшения координатной точности детектора, включающего в себя построение S-кривой и её применение для коррекции положения частицы, восстановленного методом центра тяжести.

Далее были проанализированы и обработаны данные, полученные с помощью программного обеспечения Proteus. Дополнительные 3 пиксельные плоскости были выровнены друг относительно друга, до выравнивания имеем:

- пл.1 - пл.0 =  $650,6 \pm 0,1$  мкм по оси X,  $-213,6 \pm 0,2$  мкм по оси Y;
- пл.2 - пл.0 =  $704,6 \pm 0,2$  мкм по оси X,  $-370,8 \pm 0,3$  мкм по оси Y;
- пл.2 - пл.1 =  $53,8 \pm 0,2$  мкм по оси X,  $-159,4 \pm 0,1$  мкм по оси Y;

После выравнивания получено:

- пл.1 - пл.0 =  $-0,3 \pm 0,1$  по оси X,  $-0,23 \pm 0,07$  по оси Y;
- пл.2 - пл.0 =  $-0,3 \pm 0,1$  по оси X,  $-0,11 \pm 0,13$  по оси Y;
- пл.2 - пл.1 =  $-0,07 \pm 0,24$  по оси X,  $-0,3 \pm 0,1$  по оси Y.



На следующем шаге работы было проведено восстановление трека частицы. Для этого был учтён наклон пиксельных плоскостей на  $9^\circ$  относительно осей X и Y. После этого были построены «Residuals» для всех трёх плоскостей. Фитируя полученные распределения функцией Гаусса получаем значения координатной точности трёх пиксельных плоскостей:

- $12,6 \pm 0,1$  мкм для первой плоскости,  $18,7 \pm 0,1$  мкм для второй и  $6,20 \pm 0,04$  мкм для третьей плоскости по оси X;
- $11,8 \pm 0,1$  мкм для первой плоскости,  $18,0 \pm 0,1$  мкм для второй и  $5,74 \pm 0,04$  мкм для третьей плоскости по оси Y.

Для расчёта координатной точности для исследуемого детектора был реализован метод наименьших квадратов независимо в двух плоскостях, после построения гистограммы «Residuals» получаем следующие значения:

- $22,5 \pm 0,2$  мкм по оси X,  $20,4 \pm 0,2$  мкм по оси Y.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Albrow M.* A Very Forward Hadron Spectrometer for the LHC and Cosmic Ray Physics. — 2018.
2. *Belyaev N., Cherry M. L., Doronin S. A., Filippov K., Fusco P., Gargano F., Konovalov S., Loparco F., Mazziotta M. N., Mufazalova A., Nechaeva S., Ponomarenko D., Rembser C., Romaniouk A., Savchenko A. A., Shulga E., Smirnov S., Smirnov Y., Spinelli P., Sultanaliyeva L., Teterin P., Tikhomirov V., Vorobev K., Zhukov K.* A concept of the transition radiation detector for a hadron separation in a forward direction of the LHC experiments // *Journal of Physics: Conference Series.* — 2020. — v. 1690, iss. 1, 012043.
3. *Schioppa E., Dachs F., Alozy J., Belyaev N., Campbell M., Cherry M., Doronin S., Filippov K., Fusco P., Gargano F., Heijne E., Konovalov S., Krasnopevtsev D., Llopart X., Loparco F., Mascagna V., Mazziotta M., Pernegger H., Ponomarenko D., Prest M., Pyatiizbyantseva D., Radomskii R., Rembser C., Romaniouk A., Shulga E., Smirnov S., Smirnov Y., Soldani M., Spinelli P., Sergeeva D. Y., Savchenko A., Schaefer D., Strikhanov M., Tishchenko A., Teterin P., Tikhomirov V., Vallazza E., van Beuzekom M., van der Heijden B., Vorobev K., Zhukov K.* First measurements of the spectral and angular distribution of transition radiation using a silicon pixel sensor on a Timepix3 chip // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 2019. — v. 936. — p. 523–526. — ISSN 0168-9002. — *Frontier Detectors for Frontier Physics: 14th Pisa Meeting on Advanced Detectors.*
4. *Poikela T., Plosila J., Westerlund T., Campbell M., Gaspari M. D., Llopart X., Gromov V., Kluit R., Beuzekom M. van, Zappon F., Zivkovic*

- V., Brezina C., Desch K., Fu Y., Kruth A.* Timepix3: a 65K channel hybrid pixel readout chip with simultaneous ToA/ToT and sparse readout // *Journal of Instrumentation*. — 2014. — v. 9, iss. 05, C05013.
5. *Akiba K., Artuso M., Badman R., Borgia A., Bates R., Bayer F., Beuzekom M. van, Buytaert J., Cabruja E., Campbell M., Collins P., Crossley M., Dumps R., Eklund L., Esperante D., Fleta C., Gallas A., Gandelman M., Garofoli J., Gersabeck M., Gligorov V. V., Gordon H., Heijne E. H., Heijne V., Hynds D., John M., Leflat A., Llin L. F., Llopart X., Lozano M., Maneuski D., Michel T., Nicol M., Needham M., Parkes C., Pellegrini G., Plackett R., Poikela T., Rodrigues E., Stewart G., Wang J., Xing Z.* Charged particle tracking with the Timepix ASIC // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2012. — v. 661, 1. — p. 31–49.
  6. *Alozy J., Belyaev N., Campbell M., Cherry M., Dachs F., Doronin S., Filippov K., Fusco P., Gargano F., Heijne E., Konovalov S., Krasnopevtsev D., Llopart X., Loparco F., Mascagna V., Mazziotta M., Pernegger H., Ponomarenko D., Rembser C., Romaniouk A., Savchenko A., Schaefer D., Schioppa E., Sergeeva D., Shulga E., Smirnov S., Smirnov Y., Soldani M., Spinelli P., Strikhanov M., Teterin P., Tikhomirov V., Tishchenko A., van Beuzekom M., van der Heijden B., Vorobev K., Zhukov K.* Studies of the spectral and angular distributions of transition radiation using a silicon pixel sensor on a Timepix3 chip // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2020. — v. 961, 163681. — ISSN 0168-9002.
  7. *Kiehn M.* Proteus beam telescope reconstruction. — 2019.