

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
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
КООРДИНАТНОЙ ТОЧНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПИКСЕЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ПЕРЕХОДНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ

Научный руководитель:

доцент

_____ С. Ю. Смирнов

Выполнил:

_____ А. И. Дуров

Москва 2023

Содержание	1
1 Введение. Переходное излучение	2
2 Введение. Детекторы переходного излучения. Актуальность текущего исследования	3
3 Введение. Сравнение детекторов на основе Si и GaAs	4
4 Введение. Тестирование детектора переходного излучения на пучке 2017 года	6
5 Введение. Тестирование детектора переходного излучения на пучке 2021 года	7
6 Ход работы. Предварительный анализ программного обеспе- чения	9
7 Ход работы. Кластеризация	11
8 Ход работы. Методы определения положения частицы	12
9 Ход работы. Текущий этап: S-кривая по данным 2017 года	13
10 Ход работы. Текущий этап: разработка алгоритма юстировки трека частицы и дальнейшая работа	14
11 Заключение	15

Целью работы является обработка результатов теста на пучке заряженных частиц детектора переходного излучения, а именно - исследования координатной точности полупроводниковых пиксельных детекторов переходного излучения на основе данных 2017 и 2021 годов.

1

Переходное излучение возникает при пересечении заряженной частицей границы раздела сред с разными диэлектрическими проницаемостями в веществе или в конфигурации окружающего пространства.

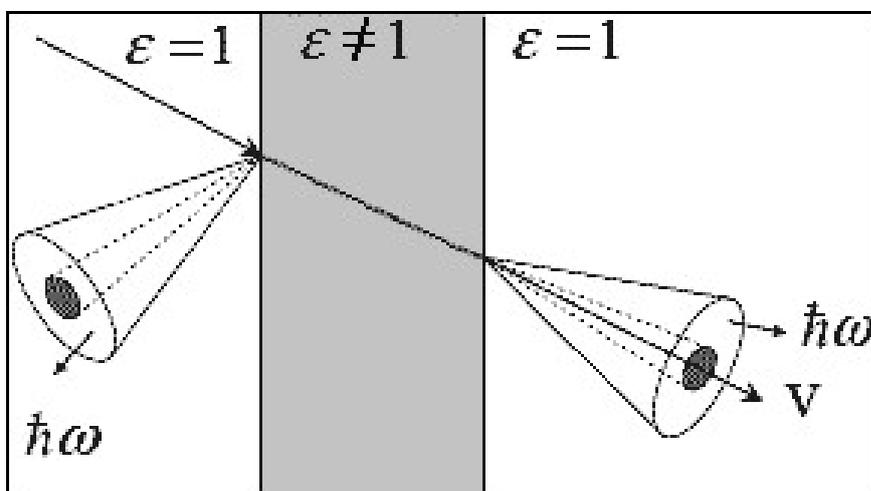


Рисунок 1 – Переходное излучение

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 ω_p , равна:

$$I = (Z^2 \hbar \omega_p)^3 \quad (1)$$

Изменяя параметры радиатора, чувствительность детектора переходного излучения может быть настроена на определенный диапазон γ -фактора. Это, в свою очередь, делает переходное излучение привлекательным для идентификации частиц при очень высоких γ 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 γ -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 пиксельная чипов с высоким разрешением, таких как Timepix3 [2], подключенных к толстым датчикам Si или GaAs (а именно: в эксперименте 2017 года - Si, в эксперименте 2021 года - 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].

В данной работе исследуется координатная точность пиксельного ДПИ (Детектора Переходного Излучения), так как это способствует разработке нового типа комбинированных детекторов переходного излучения, которые с одной стороны эффективно регистрируют переходные кванты (что свойственно общему назначению детекторов, основанных на явлении пере-

ходного излучения), что позволяет идентифицировать частицу по эффекту переходного излучения, а с другой - одновременно точно измеряют координату этой частицы (что свойственно уже, например, пиксельным кремниевым детекторам, описанным в п.4).

3

Si 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].

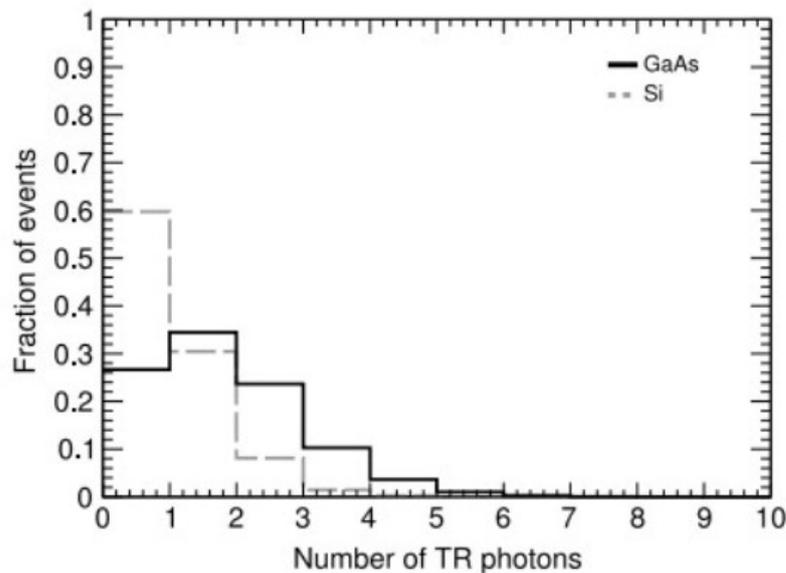


Рисунок 2 – Сравнение GaAs и Si по количеству обнаруженных фотонов

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.

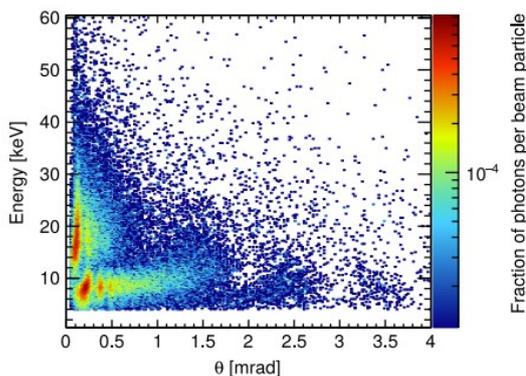


Рисунок 3 – Энергетически-угловое распределение фотонов переходного излучения, полученное с помощью детектора на основе Si

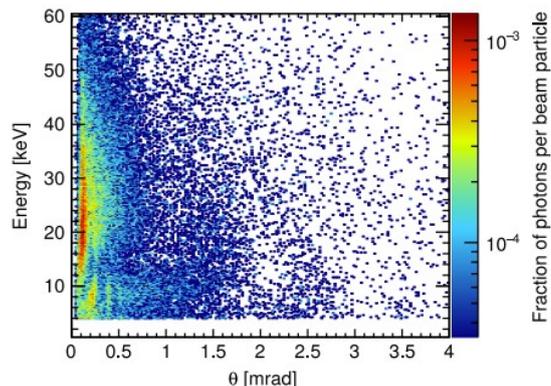


Рисунок 4 – Энергетически-угловое распределение фотонов переходного излучения, полученное с помощью детектора на основе GaAs

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.

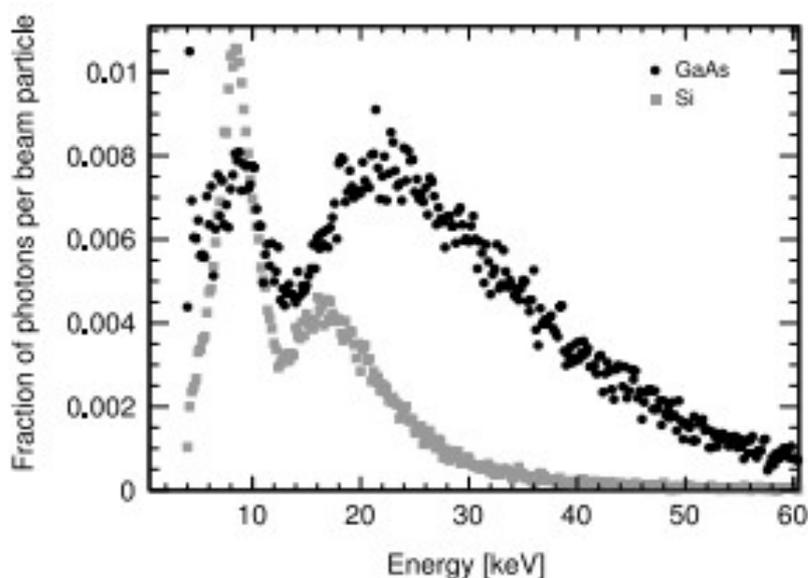


Рисунок 5 – Энергетические распределения фотонов переходного излучения, полученное с помощью детекторов на основе Si и GaAs

Исследование начинается с рассмотрения эксперимента 2017 года по тестированию детектора переходного излучения на пучке. Принципиальным отличием этого эксперимента от последующих рассматриваемых является наличие трех дополнительных кремниевых пиксельных детекторов, помимо основного пиксельного детектора. Все эти детекторы измеряют координаты трека частицы пучка независимо. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 6.

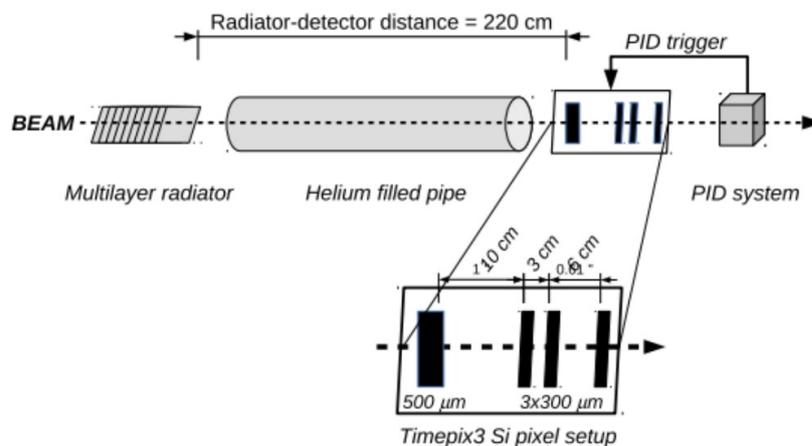


Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки 2017 года

Состоит установка из многослойного радиатора, находящегося на расстоянии около 2м 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 256×256 пикселей с шагом пикселя в 55 мкм. За детектором располагается система определения частиц, состоящая из калориметра из свинцового стекла, детектора предварительного ливня и черенковского детектора (на рис. 6 отсутствует черенковский детектор). Далее идут, непосредственно, сама система регистрации координаты трека частицы пучка, состоящая из четырех детекторов. Три из них - кремниевые пиксельные детекторы - имеют заметно меньшую толщину, чем оставший, четвертый - исследуемый пиксельный ДПИ (детектор переходного излучения). Из-за такой толщины эффективность регистра-

ции гораздо меньше по сравнению с исследуемым детектором, однако они хорошо определяют ионизационные потери частиц пучка. Их координатная точность составляет 8 мкм [5].

5

2021

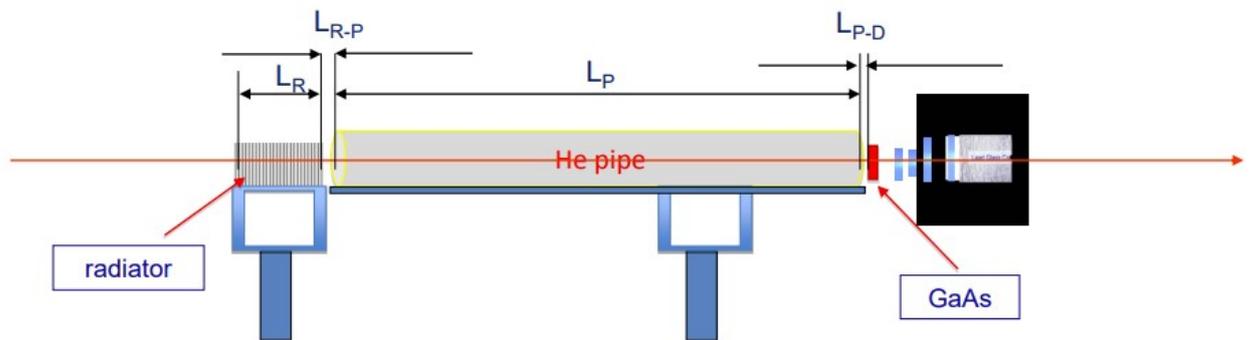
Схему установки, использовавшейся для тестирования детектора переходного излучения на пучке в 2021 году, можно увидеть на рис. 7. Установка состояла из следующих элементов:

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 толщины 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], [6]). Состоит детектор из квадратной матрицы размером 256x256 пикселей с шагом пикселей 55мкм, образуя таким образом активную площадь в 1,98см²

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 7 – Схема экспериментальной установки 2021 года

В качестве пучка заряженных частиц использовался пучок e^- энергией 20ГэВ, а также пучок мюонов энергией 180ГэВ для отладки работы эксперимента.

Для обработки данных использовались написанные ранее 2 программы: TRTB2018 (программа 2018 года) и TRD_unifiedformat (программа 2020 года - более новая и совершенная версия программы 2018 года). В процессе анализа была выявлена проблема: при обработке экспериментальных данных программой 2020 года примерно 1-3% событий терялись по сравнению с данными, полученными при обработке программой 2018 года (рис. 8).

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	
		50μ/3mm		67μ/3mm	67/2	91/2.3			
		30 foils	90 foils	30 foils	90 foils	30 foils			
e/π 20 GeV	2 m	32+51 11945+31201 11964+30984	31+50 12139+31732 11808+31144	35+53 22981+17772 22164+17268	33+34+52 7822+18888+25040 7294+18257+18901	36+54 23644+29457 23654+29506	37+55 23442+19030 23710+18647	38 22981 21896	39 22413 21613
	4 m	43 44667 48810	40+41+42 20829+21784+41882 20287+20962+13997	45 23882 32798	44 42487 44644	46+47 3415+29695 3579+29083	48 32962 32008	-	49 18233 18399
μ 120 GeV	2 m	2 81565 81555	1 88841 87748	4 95270 94390	3 90899 94979	5 97910 96781	6 87722 86780	-	7 90656 89697
	4 m	9 81905 80089	8 88259 87182	11+12 43768+49781 43287+49128	10 90883 94982	13+14 77279+29131 78383+28783	15 97970 98302	-	16 94896 93036
μ 180 GeV	2 m	25 64876 63959	24 64193 63991	27 63361 62190	26 64990 69490	28 61135 59857	29 42254 41921	-	30 21982 21187
	4 m	18 69270 64020	17 66147 65020	20 67245 65849	19 65876 64584	21 69843 64287	22 69009 69002	-	23 63930 62483
μ 290 GeV	2 m	61 40309 39049	62 39874 39225	59 39267 39219	60 38116 38649	57 40124 40602	56 39287 38795	-	58 39228 38142
	4 m	68 23201 20979	63 28443 27048	67 28826 25739	64 28179 26956	65 28190 27198	66+70 18864+17885 17811+17180	-	69 23683 24985

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

Statistics:
Upper: TRTB2018
Lower: TRD_unifiedformat

Рисунок 8 – Результаты обработки данных с пиксельного детектора в эксперименте 2018 года по исследованию детектора на основе GaAs

Поэтому было принято решение о предварительном анализе этих программ для выявления и устранения возможных ошибок. Был применен метод последовательных обрезаний (CutFlow), то есть - последовательное наложение всевозможных ограничений на данные и построение сравнительной гистограммы, с целью выяснения момента, с которого начинается расхождение (и определение ограничения, которое вызывает это расхождение). На рис. 9 представлена такая гистограмма, из которой видно, что события теряются после применения обрезания по параметру ROI (Region Of Interest - область пикселелей, сигнал с которых нас интересует; пиксели вне этой области несут некорректную информацию о сигнале, так как явля-

ются наиболее шумящими из-за своего крайнего расположения в группе).

CutFlow (run 50: Mylar, 50 μ /3mm, 90 foils)

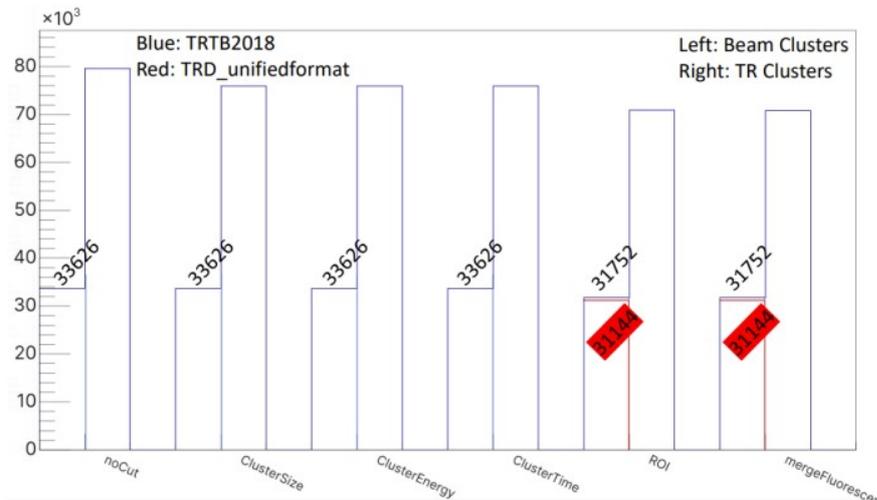


Рисунок 9 – CutFlow для данных эксперимента 2018 года для двух разных программ обработки данных

Если посмотреть на гистограмму, показывающую сумму вхождений в каждый ряд пикселей (бин, отвечающий за ряд пикселей с определенной x-координатой) (рис. 10), то видно, что более старая программа не убирает вхождения в первый бин пикселей, который должен быть убран из статистики как один из самых шумящих, в отличие от новой. Основываясь на этом важном различии, можно сделать вывод, что для кластеризации (этот процесс будет описан далее) стоит использовать программу 2020 года.

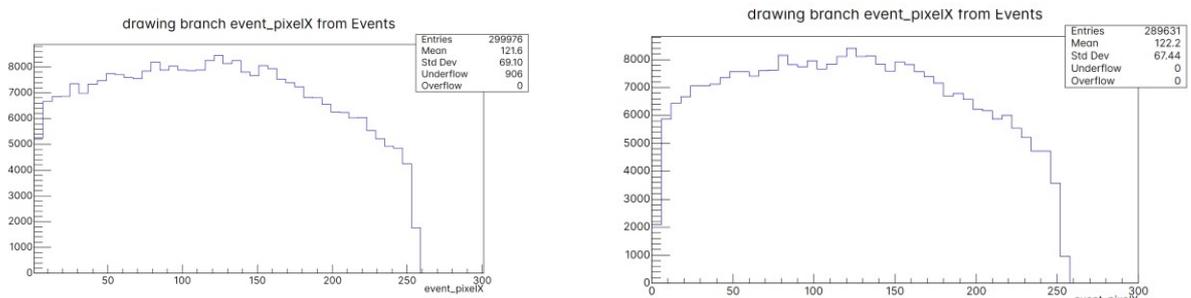


Рисунок 10 – Сумма вхождений в каждый ряд пикселей: слева - после обработки программой 2018 года, справа - после обработки программой 2020 года

Следующим этапом анализа данных является процесс кластеризации. 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 рис. 11 представлена двумерная гистограмма зависимости энергии кластеров в зависимости от размеров кластеров (т.е. количества пикселей в кластере) для пучка электронов энергией 20 ГэВ, пересекающими радиатор толщиной в 90 майларовых фольг. 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 пикселелей для частиц и 1-2 пикселя для фотонов.

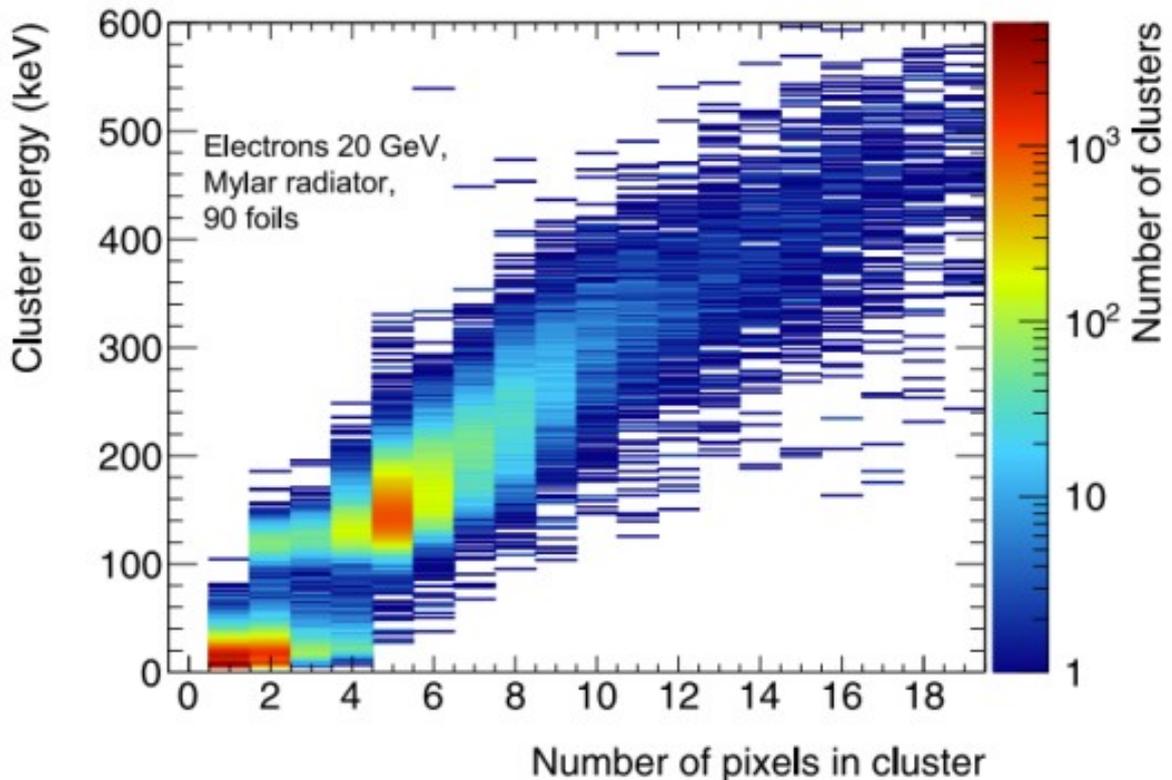


Рисунок 11 – Двумерная гистограмма зависимости энергии кластера в зависимости от его размера

На самом деле, восстановленное положение частицы отличается от реального её положения. Введем следующие обозначения: $x_{gravity}$ - положение, реконструированное методом центра тяжести, x_{true} - истинное положение частицы, CoG (Centre of Gravity) - метод "центра тяжести" определения координаты частицы [5]. Отклонение наглядно видно на рис. 13.

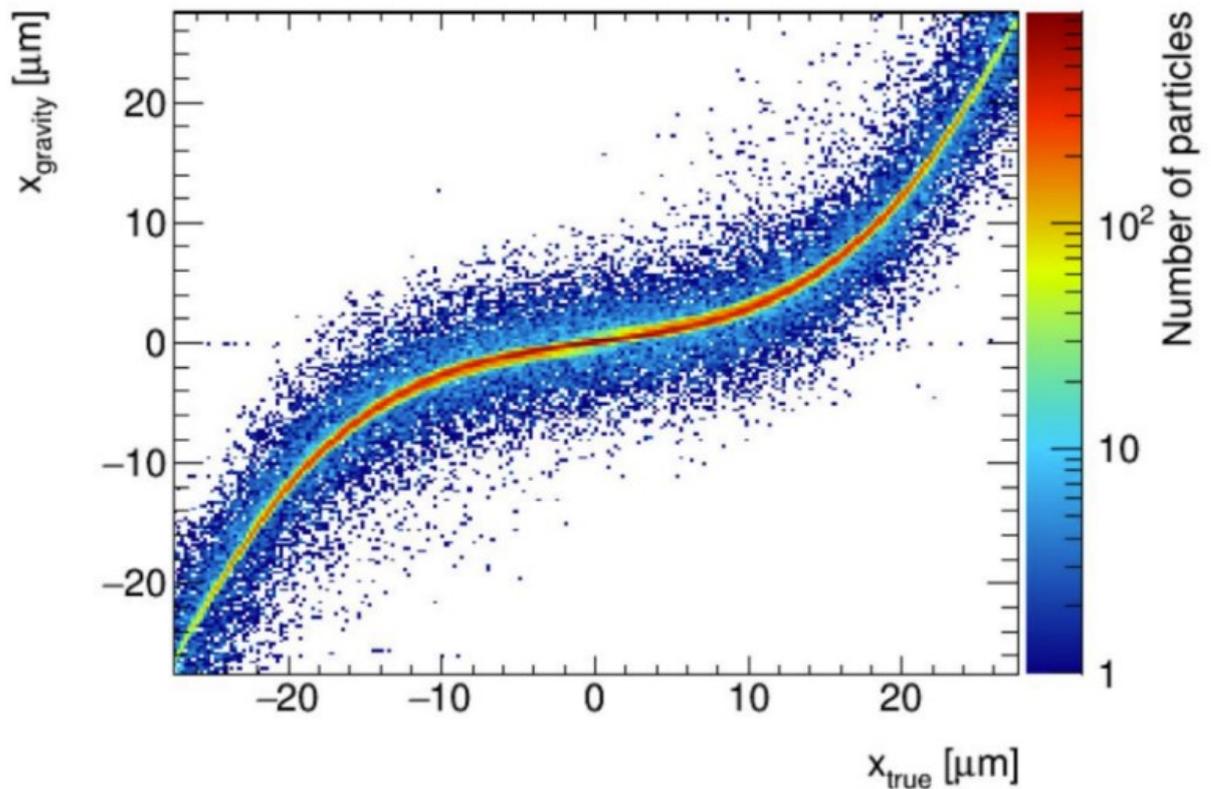


Рисунок 12 – Координата частицы, восстановленная методом CoG от реальной координаты частицы

Такую зависимость называют S-кривой. Очевидно, что если бы истинное положение совпадало с положением, восстановленным методом центра тяжести, то зависимость выглядела бы как прямая, идущая диагонально из левого нижнего угла в правый верхний. Одной из текущих задач является определение этой зависимости, т.е. найти функцию, которой можно лучше всего отфитировать эту кривую. Устранение смещения означает находде-

ние функции $\chi_{corr}(\chi_{gravity})$, такой что $\frac{dN}{dx_{corr}}$ имеет ту же форму, что и $\frac{dN}{dx_{true}}$ [5]. На рис. 13а представлены $p \cdot P_{true}(x)$ и $p \cdot P_{rec}(x)$. Для равномерного это диагональ между , а Для неравномерного необходимо использовать горизонтальное расстояние, показанное на рис. 13б.

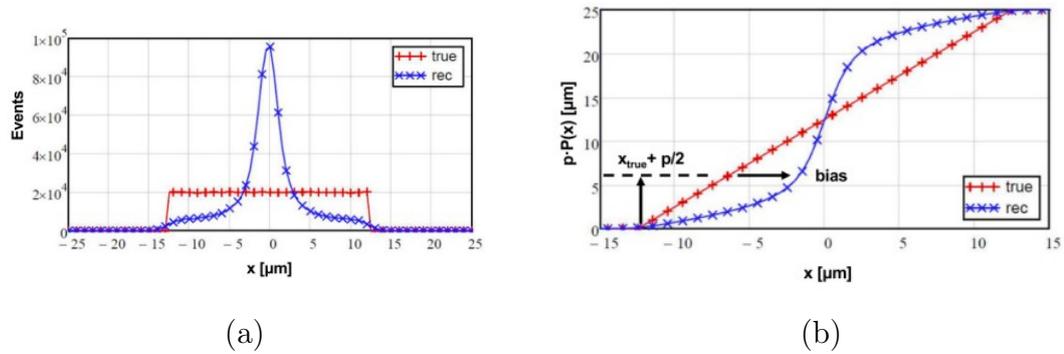


Рисунок 13 – Распределение dN/dx для $\chi_{rec}(gravity)$ и χ_{true} , (b) Нормализованные распределения кривых, показанных в (а), умноженные на p . Горизонтальная стрелка показывает среднее смещение, используемое для коррекции $\chi_{gravity}$

9

: S-

2017

В данной работе в качестве истинных координат χ_{true} выступают координаты, полученные от трех кремниевых пиксельных детекторов. А именно - здесь требуется восстановление трека частицы пучка по трем координатам от трех кремниевых пиксельных детекторов и определение координаты прохождения этой же частицей через исследуемый пиксельный ДПИ. Такая восстановленная координата и является χ_{true} координатой. Полученную же методом CoG координату по данным с исследуемого ДПИ будет считаться $\chi_{gravity}$. По этим двум величинам можно построить аналогичную пункту 8 S-кривую для данных экспериментальных данных 2017 года.

Описанная выше S-кривая позволит улучшить координатную точность детектора - с помощью точек на ней, можно будет вносить определенные поправки в измеренные координаты частицы, что и скажется положительно на координатной точности. Однако, прежде чем построить и корректно применять S-кривую, нужно исследовать получение трека частицы при её прохождении трёх пиксельных плат, с каждой из которых снимается координата прохождения частицы через неё. По трем полученным координатам восстанавливается трек частицы с определенной точностью. Для этого исследование в текущей работе начинается с эксперимента 2017 года - когда данные снимаются со всех четырех детекторов. Далее будут рассмотрены эксперименты 2018 и 2021 годов, где использовался только один ДПИ.

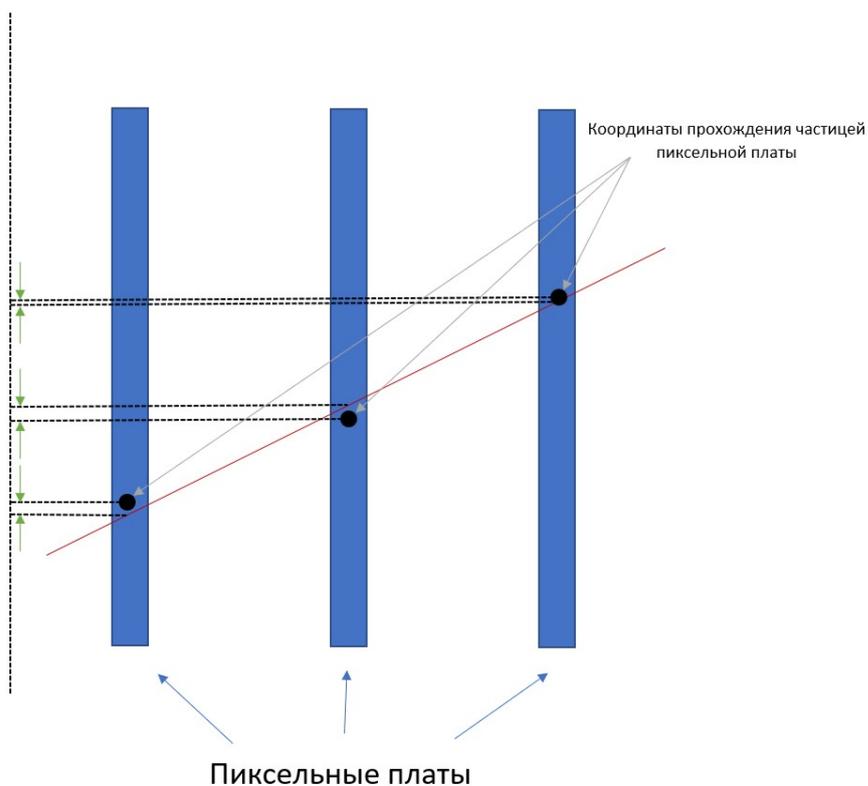


Рисунок 14 – Схематически показанные отклонения измеренных координат прохождения пиксельных плат частицей от восстановленных треков

На данный момент по эксперименту 2017 года одной из текущих задач является разработка оптимального алгоритма для восстановления трека с возможностью последующего внесения корректировок в расчеты. Другой же, более важной и сложной задачей является анализ отклонений измеренной координаты каждой из пиксельных плат от реконструированного трека (рис. 14). По полученным результатам можно будет определить, непосредственно, самую координатную точность детектора - это будет сигмой этих отклонений.

11

В данной работе проводилась подготовка к определению и улучшению координатной точности полупроводниковых пиксельных детекторов переходного излучения.

Первым этапом работы было исследование работы двух версий программ по анализу результатов эксперимента: 2018 года и 2020 года. По результату исследования был сделан вывод, что использовать следует версию 2020 года.

Далее проводилось ознакомление с методиками определения координат частиц (реальной координаты X_{true} и координаты, восстановленной по методу CoG $X_{gravity}$) и вычисления координатной точности детектора.

Также было начато создание алгоритма юстировки трека частицы для вычисления координаты X_{true} и последующего построения S-кривой и далее, вычисления, непосредственно, самой координатной точности детектора.

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. Studies of the spectral and angular distributions of transition radiation using a silicon pixel sensor on a Timepix3 chip / J. Alozy [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. | 2020. | Feb. | Vol. 961. | P. 163681.
6. Transition radiation, URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/radiat/tr.htm>.