

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 539.1.07

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
**КАЛИБРОВКА ПРОТОТИПА ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ
GaAs**

Студент _____ В. С. Попов

Научный руководитель _____ С. Ю. Смирнов

Москва 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
Актуальность	2
Цель работы	3
Описание экспериментальной установки	4
1 Калибровка детектора	5
1.1 Принцип работы детектора на основе чипа Timerix3	5
1.2 Подготовка данных	7
1.3 Определение среднего значения ToT	8
1.4 Построение калибровочной кривой	11
2 Заключение	12
Список использованных источников	13

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 (γ). Метод определения частиц, 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 θ от γ .

АКТУАЛЬНОСТЬ

Рождение адронов с малым поперечным импульсом p_T в столкновениях с $\sqrt{s} = 13$ ТэВ мало изучено, что является большим упущением. Измерение спектров частиц с большим значением фейнмановской скейлинговой переменной $x_F = p_z/p_{BEAM}$ с импульсами от сотен ГэВ до нескольких ТэВ крайне полезно. Существует несколько различных моделей, дающих различающиеся на порядки результаты, описывающих эту область фазового пространства. Точное измерение спектров рождения частиц с малым p_T в протон-протонных столкновениях не только поможет уточнить модели описывающие данные процессы, но и может привести к новому понима-

нию КХД. Также изучение космических лучей высоких энергий зависит от наших знаний о рождении адронов с большим x_F . 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 изучения описанных выше физических вопросов, понадобится детектор имеющий возможность идентифицировать заряженные частицы при больших гамма. Принципиально новым для данных целей может стать детектор переходного излучения на основе чипа Timerix3 [1–4]. Отличие этого детектора от остальных детекторов переходного излучения заключается в том, что кроме идентификации частицы он способен определять координату частицы с точностью в несколько мкм. Детектор переходного излучения состоит из радиатора и детектора, в традиционных детекторах переходного излучения используется газовый детектор. Такая координатная точность описываемого в работе детектора переходного излучения может быть достигнута благодаря использованию пиксельного чипа высокого разрешения подключенного к полупроводниковому матричному сенсору в роли детектора.

Для эффективной работы данного детектора радиатор должен состоять из нескольких сотен пленок (для образования достаточного количества фотонов переходного излучения), по причине большого количества материала мягкая часть спектра переходного излучения будет поглощаться самим радиатором. Однако разделение фотонов переходного излучения по энергиям не дает большого преимущества в идентификации частиц. Вместо этого для идентификации частицы может использоваться угловая информация переходного излучения имеющая зависимость от γ .

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является калибровка прототипа детектора переходного излучения, по данным полученным на ускорителе SPS в ЦЕРНе в 2024 году, для последующей возможности анализа экспериментальных данных. Для достижения описанной цели, было установлено соответствующее ПО использовавшиеся в предыдущих годах, обнаружены минусы ПО

например, некорректное считывание входных данных, и написан альтернативный код для калибровки экспериментальных данных, так же был проведен анализ данных для подбора оптимальных параметров калибровки.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В ходе работы проводилась калибровка детектора для экспериментальной установки (Схема установки 1 из статьи [5]), которая представляет из себя: многослойный радиатор, находящийся на расстоянии порядка 2 м от детектора; трубу, заполненную гелием для предотвращения поглощения фотонов переходного излучения в воздухе; сенсор из компенсированного хромом GaAs толщиной 500 мкм, соединенный с TimePix3 чипом, используемый как детектор с квадратной матрицей 256×256 пикселей с размером пикселя в 55 мкм. За GaAs располагается ливневый детектор и калориметр из свинцового стекла, перед радиатором находится черенковский детектор. Вместе они образуют систему определения частицы. В статье [5] описываются некоторые результаты измерений 2018 года. Для калибровки пиксельного детектора использовались только пиксельный детектор и набор различных материалов, которые при облучении испускали фотоны фиксированной энергии. При помощи рентгеновской трубки пластина из материала облучалась тормозным рентгеновским излучением, и сама в свою очередь испускала характеристическое рентгеновское излучение.

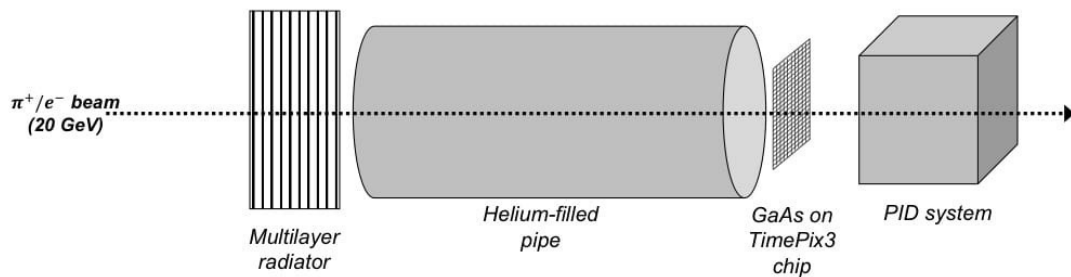


Рисунок 1 — Схема экспериментальной установки

1 КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА

Целью калибровки является определить функцию для каждого пикселя для перевода ToT (время в течении которого амплитуда сигнала с пикселя превышает порог) в кэВ, поглощённые в пикселе. Для этого было произведено несколько калибровочных сессий измерения. Детектор облучался фотонами с известной энергией, всего 13 различных энергий в диапазоне от 5.95 кэВ до 59.5 кэВ. Время сессии достаточно велико что бы в каждом пикселе набралась достаточно большая статистика для каждой конкретной энергии. Затем в каждом пиксел определяется среднее значение ToT для данной энергии. Полученные точки фитируются функцией(1.1). В итоге получается функция для преобразования ToT в кэВ для каждого пикселя. Стоит отметить, что все итоговые результаты получены в альтернативной программе для калибровки, так как в программе используемой ранее на основе «Katherine» были обнаружены некоторые минусы: программа не сортирует вхождения по времени, а так же нет возможности установить динамические пределы фитирования распределений ToT для различных пикселей.

$$E = \frac{1}{2a} \left(ToT + a \cdot t - b + \sqrt{(b + a \cdot t - ToT)^2 + 4a \cdot c} \right) \quad (1.1)$$

1.1 ПРИНЦИП РАБОТЫ ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ ЧИПА TIMEX3

На выходе с пиксельного детектора мы получаем определенный набор данных, а именно координаты сработавших пикселей, времена этих срабатываний, а также некоторая величина, связанная с энерговыделением в каждом пикселе для данного детектора (ToT – время над порогом). Рассмотрим, как происходит формирование этой информации в нашем случае.

В момент пролета частицы через пиксель детектора происходит образование электрон дырочных пар, из-за чего появляется импульс напряжения на входе чипа, связанного с данным пикселем. В момент, когда амплитуда входного сигнала достигает установленного заранее порогового значения, включается тактовый счетчик с частотой 640 МГц. Этот счетчик выключается в момент, когда приходит импульс с постоянно включенного генератора с частотой 40 МГц. Количество тактов постоянно работающего генератора записывается до того момента, пока входной импульс не станет меньше заранее установленного порога. Соответственно время срабатывания пикселя определяется временем прихода первого импульса генератора с частотой 40 МГц, когда амплитуда аналогового сигнала превышала порог минус время, соответствующее тому количеству периодов, которое успел проработать счетчик с частотой 640 МГц. Энерговыведение в пикселе определяется количеством тактов генератора с частотой 40 МГц, которые он успел произвести, пока амплитуда входного сигнала была выше порогового значения. Принцип работы пикселя Timerix3 приведен на рисунке 1.1 из статьи [6]. Во время калибровочных сеансов чип работал в режиме управления данными, то есть любой пиксель с сигналом выше порога запускал считывание с чипа.

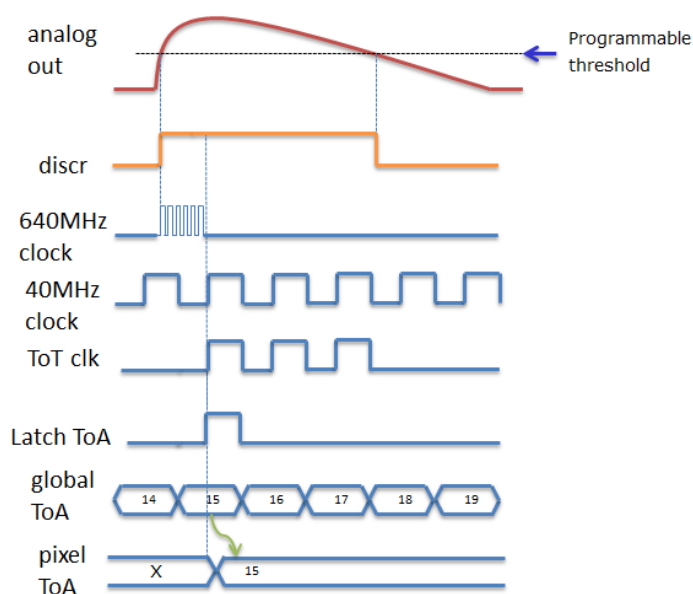


Рисунок 1.1 — Принцип работы пикселя Timerix3

1.2 ПОДГОТОВКА ДАННЫХ

Для анализа данных необходима их корректно считать, так как одна сессия обычно представляет из себя несколько файлов сырого формата. Каждому сработавшему пикселю соответствует номер пикселя, время срабатывания, и значение ToT. Для калибровки необходимо работать только с однопиксельными событиями, случай, когда энергия фотона полностью поглотилась и выделилась в пределах одного пикселя. Для того что бы определить является ли событие однопиксельным необходимо установить длительность события – некоторый временной интервал. В случае если в течении данного временного интервала после срабатывания пикселя, никаких других пикселей не сработало событие считается однопиксельным, в обратном случае событие считается многопиксельным и не подходит для калибровки. Временной интервал был определен как 100 нс. Пред отбором однопиксельных событий данные были отсортированы по времени. Затем все данные были считаны в root файлы (13 файлов – по файлу на каждую энергию) состоящие из 65536 гистограмм, демонстрирующих распределение по ToT в каждом пикселе например 1.2. Статистика в каждом пикселей для конкретной энергии порядка 1000 вхождений.

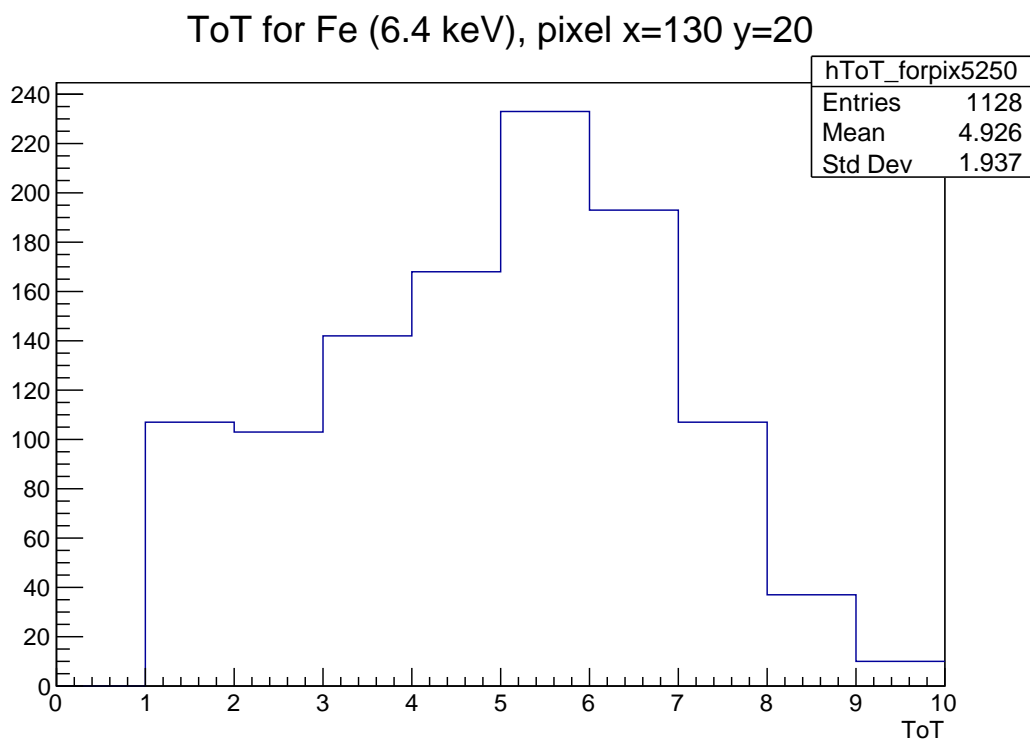


Рисунок 1.2 — Распределение по ToT

1.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ ТОТ

Следующий шаг сопоставить в каждом пикселе каждой энергии значение ТоТ. Логично взять значение полученное из фитирования Гауссом. Необходимо определиться с границами фитирования. Можно выбрать границы фитирования одинаковыми для всех пикселей основываясь на распределении для всех пикселей, как показано на рисунке 1.3. Этот метод не очень точен, в данном примере полученное значение смещенно от оптимального примерно на 1 ТоТ однако это не очень значительно для высоких энергий, так как относительная погрешность будет мала, однако эти неточности становятся критически важны, когда речь идет о близких по энергиям точкам (Fe55 – 5.95кэВ; Fe – 6.4кэВ), с малыми значениям энергии.

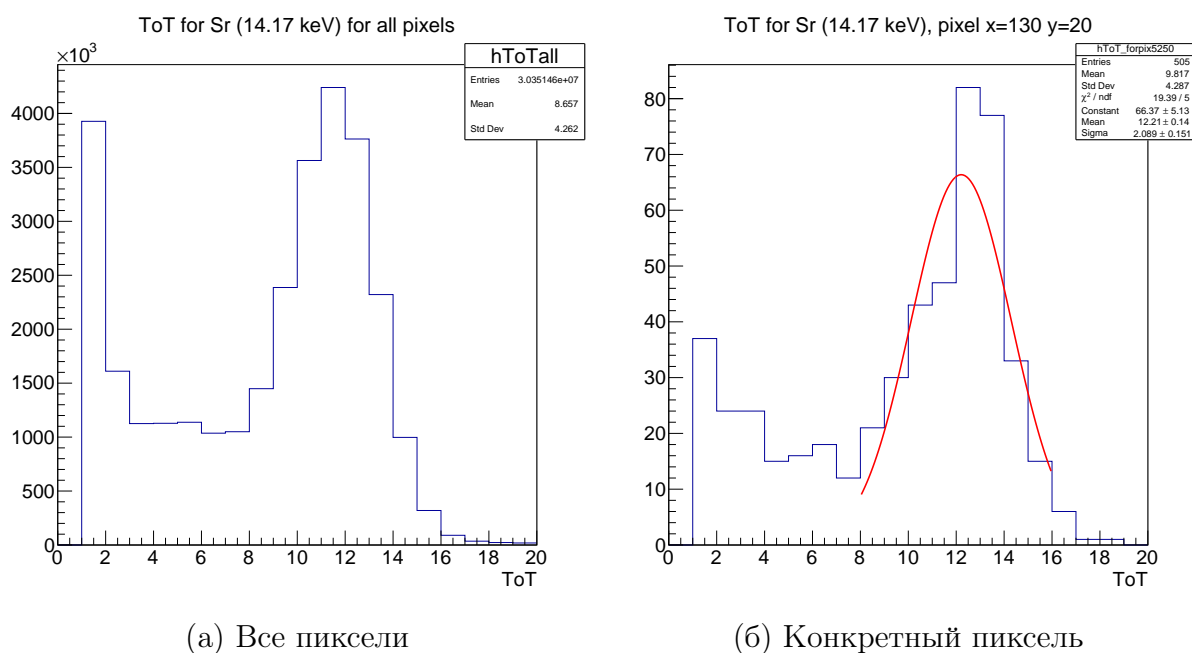


Рисунок 1.3 — Распределение по ТоТ

При неверно выбранных пределах фитирования для близких по энергиям точкам может произойти ошибка как на рисунке 1.4, значение среднего ТоТ для меньшей энергии окажется больше, чем среднее ТоТ для большей энергии. Такого рода ошибки могут сильно ухудшить качество калибровки.

На рисунке 1.5 представлена гистограмма разницы средних ТоТ для соседних точек по энергии, в каждом пикселе определяется среднее значе-

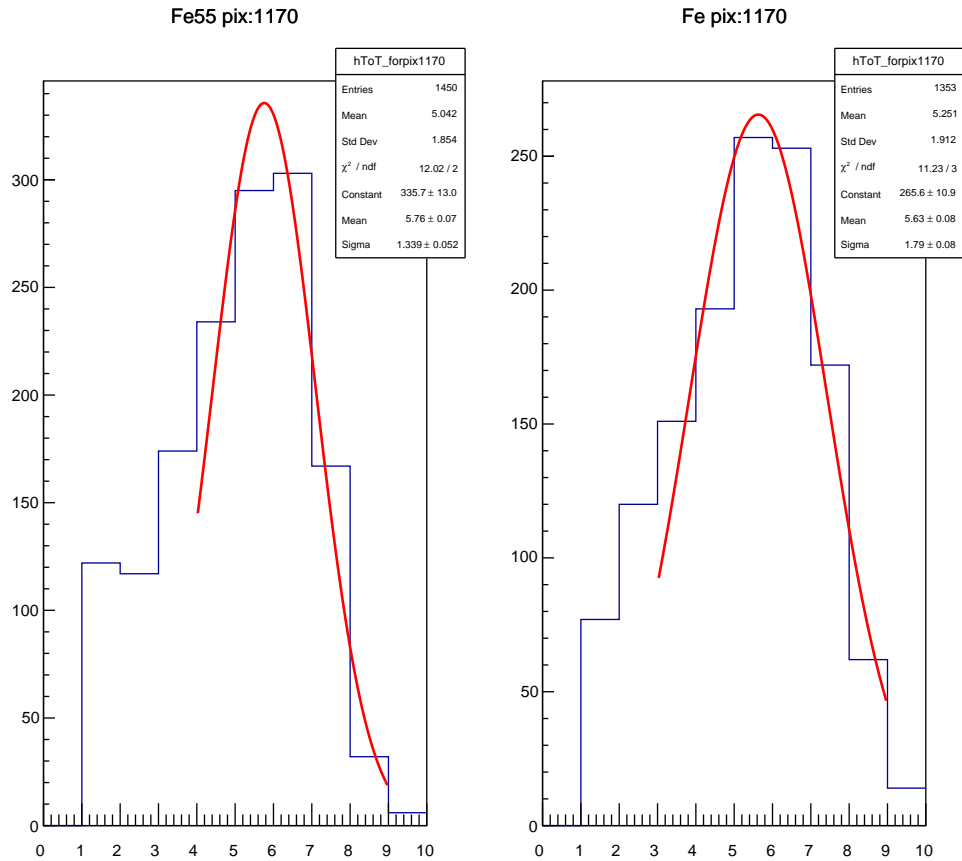


Рисунок 1.4 — Распределение по ToT

ние ToT для конкретных энергий дальше разница между значениями для 2х энергий для одного пикселя заносится в гистограмму и так для всех пикселей, стоит уточнить что здесь и далее под всеми пикселями подразумеваются не все 256 на 256 пикселей а все пиксели за исключением 4х крайних рядов и столбцов с верху и снизу так как в них сильны помехи электроники и они не входят в ROI.

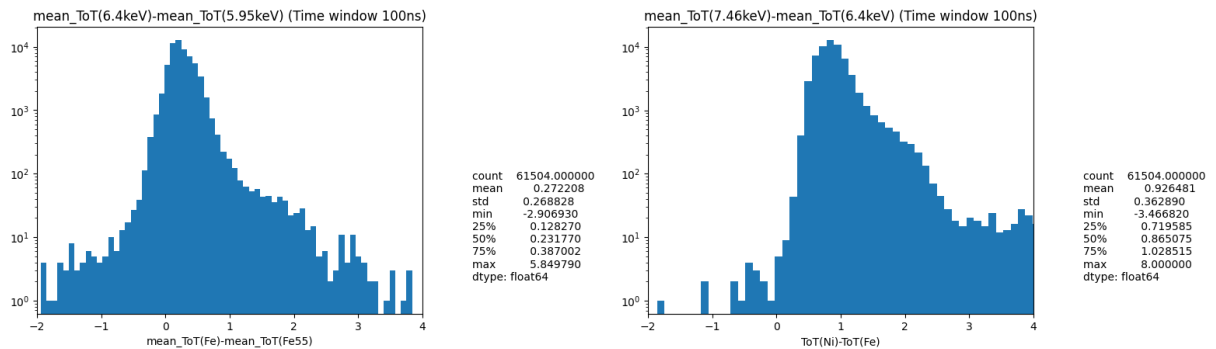


Рисунок 1.5 — Гистограммы разниц средних ToT

Необходимо выбрать оптимальный метод определения границ фити-

рования. Для этого сравнивались различные методики. В итоге была выбрана следующая методика определения границ фитирования, для энергий 6.4 и 5.9 кэВ. В диапазоне от 3 до 10 ТоТ определяется наивысший бин для данного пикселя. В диапазон фитирования входит 2 бина слева, в случае если самый левый бин входящий в диапазон больше, чем определенная доля от наивысшего бина и так же он меньше следующего бина в ином случае входит 1 бин слева. В диапазон фитирования справа в любом случае входит 2 бина справа от наивысшего. (left border= number of max bin - 2 if $\text{Bin Content}(\text{number of max bin} - 2) > \text{fraction} \cdot \text{Bin Content}(\text{number of max bin})$ and $\text{Bin Content}(\text{number of max bin} - 2) < \text{Bin Content}(\text{number of max bin} - 1)$ else left border = number of max bin - 2 ; right border = number of max bin + 2).

Для наглядности на рисунке 1.6 приведена зависимость количества пикселей, для которых меньшей энергии соответствует больший ТоТ от параметра fraction – доли наибольшего бина с которой сравнивается крайний левый бин в диапазоне фитирования. Зависимость оказалось монотонной, и наименьшее количество «плохих» пикселей соответствует тому случаю когда в диапазон фитирования всегда включается 2 бина слева.

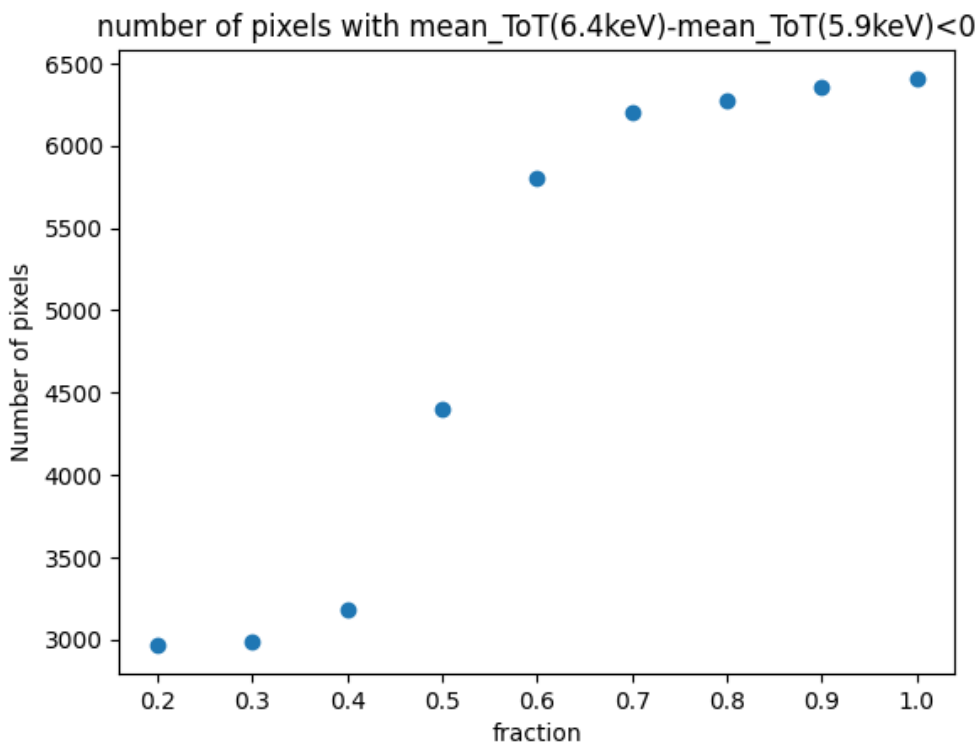


Рисунок 1.6 — Количество «плохих» пикселей от параметра fraction.

Однако было принято решение установить параметр $\text{fraction}=0.5$, во избежание ошибочного определения «плохого» пикселя за «хороший». Даже при таком значении параметра fraction количество «плохих» пикселей уменьшилось больше, чем в 2 раза по сравнению с одинаковыми для всех пикселей фиксированными пределами фитирования.

1.4 ПОСТРОЕНИЕ КАЛИБРОВОЧНОЙ КРИВОЙ

Для построения калибровочной кривой кроме 13 точек соответствующих энергиям фотонов которыми облучали детектор, необходимо знать еще одну точку, соответствующую нулевому значению T_0T – значение того самого порога в энергетических единицах. Для определения этого значения производится отдельная операция сканирования порога, данные со сканирования были набраны в ходе эксперимента 2024 года, однако пока что значение порога не получено, поэтому в данной работе будет использоваться значение порога из прошлых лет равное 3.6 кэВ.

Как уже говорилось ранее, формула для перевода T_0T в энергию имеет вид (1.1). Необходимо при помощи фитирования точек получить коэффициенты a , b , c и t . Стоит обратить внимание что коэффициент c не стоит оставлять свободным, так как он может принять значение равное 0, и тогда кривая вырождается в ломанную 1.7. В данном случае коэффициент c фиксируется равным 7 аналогично прошлым калибровкам.

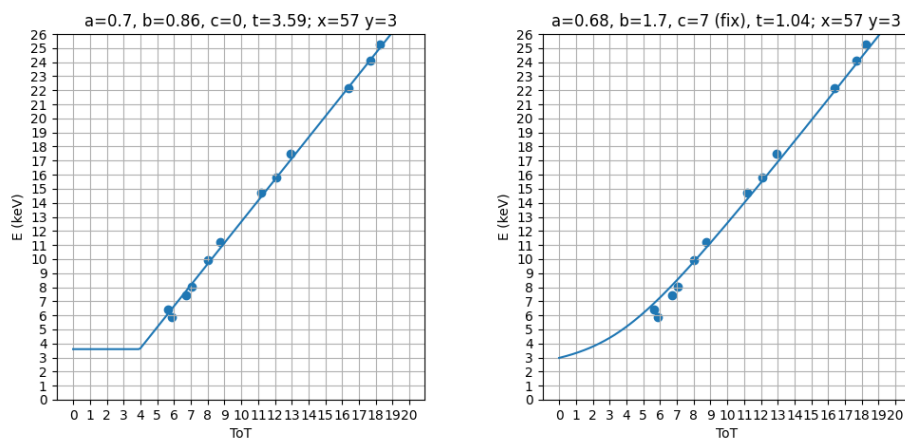


Рисунок 1.7 — Пример калибровочной кривой при свободном и фиксированном коэффициенте c .

2 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был написан код для подготовки данных и калибровки пиксельного детектора на основе GaAs с матрицей 256 на 256 пикселей. Изучены различные методы выбора границ фитирования для определения среднего значения ToT соответствующего конкретной энергии в каждом пикселе. Количество «плохих» пикселей было уменьшено в 2 раза по сравнению с программой, используемой в предыдущих калибровках, доля «плохих» пикселей составляет примерно 7%. На данный момент получены калибровочные кривые для значения порога из прошлых калибровок. Калибровочные кривые будут перестроены после получения значения порога для эксперимента 2024 года.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. A concept of the transition radiation detector for a hadron separation in a forward direction of the LHC experiments / N. Belyaev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1690, no. 1. — P. 012043.
2. Studies of the spectral and angular distributions of transition radiation using a silicon pixel sensor on a Timepix3 chip / J. Alozy [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2020. — Vol. 961. — P. 163681.
3. 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.
4. Transition radiation detectors for hadron separation in the forward direction of LHC experiments / M. Albrow [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2023. — Т. 1055. — С. 168535. — ISSN 0168-9002.
5. Registration of the transition radiation with GaAs detector: Data/MC comparison / J. Alozy [et al.] // J. Phys. Conf. Ser. / ed. by P. Teterin. — 2020. — Vol. 1690, no. 1. — P. 012041.
6. Timepix3: a 65K channel hybrid pixel readout chip with simultaneous ToA/ToT and sparse readout / T. Poikela [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2014. — Vol. 9, no. 05. — P. C05013–C05013.