

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Отчет
о научно-исследовательской работе

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДЕТЕКТОРА НА
ОСНОВЕ STRAW ТРУБОК (STT) ПРИ ПОМОЩИ
ПАКЕТА GARFIELD++: РЕКОНСТРУКЦИЯ
ТРЕКОВ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ.**

Научный руководитель
НИЦ «Курчатовский институт»

_____ Е. В. Кузнецова

Научный консультант
НИЦ «Курчатовский институт»

_____ С. А. Буланова

Студент

_____ А.И. Гурова

Москва 2025

Оглавление

Благодарности	2
1 Введение	3
2 Физические процессы в газоразрядном детекторе	5
2.1 Взаимодействие заряженных частиц с веществом газового детектора	5
2.1.1 Первичная ионизация	5
2.2 Транспорт электронов и ионов в газах	5
2.2.1 Дрейф и подвижность ионов	5
2.3 Выбор рабочего газа	6
2.4 Принцип работы straw-трубок	6
3 Параметризация временных характеристик сигналов straw-трекера . . .	8
3.1 Моделирование в Garfield++	8
3.1.1 Garfield++: инструмент для моделирования отклика газоразрядных детекторов	8
3.2 Электроника в LTSpice	9
3.3 Параметры моделирования straw-трубок для эксперимента SPD	9
3.3.1 Моделирование сигналов трубки в Garfield++ и LTSpice	9
3.4 Drift time	11
3.5 Исследование зарядового разрешения.	11
3.5.1 Определение типа частицы с малыми импульсами.	12
3.6 Исследование зависимости зарядового разрешения от времени интегрирования.	13
Заключение	16
Литература	16

Благодарности

Выражаю благодарность научному руководителю Е. В. Кузнецовой и научному консультанту С. А. Булановой за руководство работой и ценные замечания.

Особую благодарность хочу выразить Т.Л. Енику и А. Т. Мухамеджановой за помощь в освоении программного пакета Garfield++ и поддержку на всех этапах выполнения работы.

А.И. Гурова

1 Введение

Дрейфовые трубки используются для измерения координат треков заряженных частиц. В эксперименте Spin Physics Detector (SPD) на коллайдере NICA в ОИЯИ трекер на основе straw-трубок является основным инструментом измерения импульса заряженных частиц [1].

Импульс частицы восстанавливается по радиусу кривизны трека частицы в магнитном поле, для чего необходимо точно измерить координаты в нескольких десятках точек траектории. Трекер SPD состоит из порядка 20 тысяч straw-трубок. Детальная симуляция отклика трекера на прохождение заряженной частицы, с учётом процессов лавинного усиления сигнала, является чрезвычайно ресурсоёмкой задачей. Поэтому для реалистичной симуляции необходимо создать параметризацию, которая позволит предсказывать свойства сигнала трекера в зависимости от координаты прошедшей частицы.

Целью данной работы является разработка реалистичной параметризации сигнала, основанной на результатах точного моделирования отклика straw-трубки на прохождение заряженной частицы. Сигналы, полученные в результате симуляции физических процессов в straw-трубке, проведённого методом Монте-Карло с помощью программного пакета Garfield++ [2], поступают на вход модели электроники, реализованной в программе LTSpice [3].

Так как координата прохождения заряженной частицы через straw-трубку реконструируется по измеренному времени дрейфа электронов первичной ионизации, непосредственным объектом изучения является время регистрации сигнала считывающей электроникой.

Таким образом, задача реалистичной параметризации отклика straw-трекера сводится к изучению распределения времен регистрации сигнала со straw-трубки для разных условий: тип частицы, её импульс, угол наклона трека, величина и направление магнитного поля, тип и параметры считывающей электроники, уровень шумов и др.

Цели

- Изучение принципа работы газовых детекторов на основе Straw Tube Trackers.
- Моделирование сигналов отклика Straw трубок с использованием программ Garfield++ и LTSpice.
- Анализ зависимости параметров сигналов от расстояния до трека и влияния магнитного поля.
- Исследование важности временных характеристик сигнала (drift time) и их использование в процессе анализа.

- Создать цепочку для реалистичного моделирования сигналов детектора: Garfield++ для газа, LTSpice для электроники.
- С помощью этой модели понять, как параметры считывающей электроники влияют на параметры.
- На основе результатов моделирования создать параметризацию отклика детектора для использования в программах симуляции эксперимента (SPDroot).

2 Физические процессы в газоразрядном детекторе

Газовые детекторы представляют собой устройства, заполненные газом, в рабочий объём которых введены электроды. Как правило, рабочим газом выбирают смесь аргона и малое количество другого газа, например, CO_2 или CH_4 . Частицы, проходя через рабочее вещество детектора, ионизируют газ. Высвобожденные заряды (электроны и ионы) индуцируют сигнал на электродах детектора, который подвергается преобразованию, оцифровке и, в конечном счете, сохраняется для дальнейшего анализа. В зависимости от типа детектора, количество первичных зарядов может быть увеличено в результате газового усиления. [4] [5]

2.1 Взаимодействие заряженных частиц с веществом газового детектора

2.1.1 Первичная ионизация

В процессе взаимодействия заряженных частиц с веществом газового детектора могут происходить два вида электромагнитных процессов: ионизация и возбуждение атомов газа. Предположим, в смеси есть атом газа X , с ним взаимодействует заряженная частица p . Если энергия частицы выше потенциала ионизации атома X (например, у атома Ar потенциал ионизации составляет 15.7 эВ), то электрон покидает атом, атом становится положительным ионом i , таким образом, образуется электрон-ионная пара.

Сечение реакции ионизации зависит от газа и энергии заряженной частицы и для Ar составляет $O(10^{-16}) \text{ см}^2$. Ионы и электроны, рожденные в результате прямого взаимодействия частицы с атомом или молекулой, называются первичными.

2.2 Транспорт электронов и ионов в газах

2.2.1 Дрейф и подвижность ионов

В присутствии электрического поля ионы и электроны, освобожденные излучением, ускоряются вдоль силовых линий поля — электроны движутся к положительно заряженному аноду, а положительные ионы — к отрицательно заряженному катоду. На пути электронов и ионов встречаются молекулы рабочего газа, которые ограничивают среднюю скорость дрейфа.

2.3 Выбор рабочего газа

Выбор газовой смеси для ионизационного детектора определяется несколькими факторами:

1. Невысокое рабочее напряжение,
2. Высокое газовое усиление,
3. Хорошая пропорциональность и высокое быстродействие,
4. Стабильность работы и низкая вероятность возникновения стримеров и искровых разрядов.

Для достижения этих целей, как правило, используются газовые смеси, а не чистые газы. Минимальным рабочим напряжением, при котором образуется лавина, обладают благородные газы. Аргон, например, широко распространен и обладает высокой удельной ионизацией (количество ионизаций на единицу пути частицы). Однако аргон нельзя использовать в чистом виде при высоком газовом усилении (порядка $10^3 - 10^4$), так как в нем легко возникают искровые разряды. У аргона достаточно большая энергия возбуждения (11.6 эВ): возбужденные атомы аргона, образующиеся в лавине, испускают фотоны высокой энергии, способные вызывать эмиссию электронов с катода, что приводит к образованию последующей лавины.

Эти свойства аргона можно компенсировать добавлением многоатомного газа, например, метана или паров этанола, а также CO_2 или CH_4 . Эти многоатомные молекулы поглощают фотоны, а затем рассеивают энергию в упругих столкновениях. Даже небольшая примесь многоатомного газа производит значительные изменения — самопроизвольные разряды не возникают даже при газовом усилении порядка 10^6 . В обычных пропорциональных счетчиках часто используется смесь из 90% аргона и 10% метана (также эту смесь называют газом P10), а в качестве поглотителей выбирают изобутан или CO_2 [6].

2.4 Принцип работы straw-трубок

В физике высоких энергий применяются straw-трубки, являющиеся цилиндрическим газоразрядным детектором, работающим в пропорциональной моде. Внутренняя поверхность тонкой полиэтилентерефталатовой (ПЭТ) трубки металлизирована тонким слоем золота или алюминия и является катодом. Толщина стенок трубки обычно составляет несколько десятков микрон. По оси трубки расположена тонкая проволока диаметром 20-35 микрон, являющаяся анодом. Такие трубки обеспечивают высокое быстродействие благодаря малому диаметру и используются для создания трековых детекторов большой площади. Тонкие стенки трубки минимизируют многократное рассеяние заряженных частиц, пересекающих треки.

Определение координаты частицы дрейфовой трубкой осуществляется путем измерения времени дрейфа электронов, которые получаются в результате ионизации рабочего газа заряженной частицей. Заряженная частица, ионизируя газовую смесь, образует трек положительных ионов и электронов. Электроны дрейфуют к проволоке и в области сильного поля у ее поверхности образуют лавину, положительные ионы дрейфуют к стенкам

трубки, на электродах индуцируется сигнал. Обычно сигнал считывается с анодной проволоки. Усиленный предусилителем, сигнал сравнивается с заданным порогом. Время пересечения порога оцифровывается временем-цифровым преобразователем (Time Digital Converter – TDC) и передается в систему сбора данных [7]. Величина порога выбирается минимально возможной, чтобы определить время дрейфа электронов, находящихся на наименьшем расстоянии от анода, т.е. дрейфующих практически перпендикулярно треку. Это позволяет наиболее точно оценить расстояние между треком и анодом, т.е. измерить относительную координату трека.

К материалам и геометрии трубки, а также к считывающей электронике предъявляется множество требований. Это связано как с необходимостью радиационной устойчивости, так и с особенностями сбора сигнала. Например, очень важно соблюдать симметрию в трубке — проволока должна быть натянута строго вдоль оси, иначе нарушается зависимость времени дрейфа от координаты трека.

3 Параметризация временных характеристик сигналов straw-трекера

3.1 Моделирование в Garfield++

3.1.1 Garfield++: инструмент для моделирования отклика газоразрядных детекторов

Garfield++ — объектно-ориентированная программа для симуляции двух- и трёхмерных газоразрядных детекторов. Первоначально программа была написана на языке FORTRAN для двумерных камер из проволоки и плоскостей, таких как дрейфовые камеры, время-пролётные камеры и многопроволочные счётчики. Для многих из этих конфигураций могут быть вычислены точные значения величин поля в любой точке. Однако это не относится к трёхмерным конфигурациям, даже к таким, как два пересекающихся провода.

Для работы с такими всё более популярными детекторами Garfield++ взаимодействует с программой *neBEM*. Garfield++ также принимает двух- и трёхмерные карты полей, рассчитанные программами конечных элементов, такими как *Ansys*, *Maxwell*, *Tosca*, *QuickField* и *FEMLAB*, в качестве основы для своих расчётов. Эти методы позволяют работать с произвольными формами электродов, а также с диэлектриками.

В Garfield++ встроен пакет *Magboltz* для расчёта свойств переноса электронов в различных газовых смесях. Программа также имеет интерфейс взаимодействия с пакетом *Heed* для моделирования ионизации молекул газа частицами, пересекающими камеру.

Возможности Garfield++

Garfield++ поддерживает расчёт следующих величин:

- карты полей в виде контурных графиков и трёхмерных проекций;
- провисание анодной проволоки, вызванное электростатическими силами;
- оптимальные настройки потенциала для различных конфигураций электродов;
- графики электронных и ионных треков;
- таблицы времени дрейфа и распределения времени развития сигнала;
- сигналы, индуцированные заряженными частицами, пересекающими детектор, с учётом как электронной, так и ионной составляющих.

Garfield++ обладает мощными инструментами визуализации, такими как построение дрейфовых линий и карт силовых линий поля. Все классы визуализации интегрированы с фреймворками *ROOT* от CERN.

3.2 Электроника в LTSpice

Моделирование электроники в среде LTSpice является популярным и эффективным способом проверки и анализа работы электронных схем. LTSpice — это программное обеспечение для моделирования аналоговых и смешанных сигналов, разработанное компанией Linear Technology (в настоящее время часть Analog Devices).

3.3 Параметры моделирования straw-трубок для эксперимента SPD

В эксперименте SPD используются straw-трубки диаметром 10 мм с рабочим напряжением 1750 В. Для моделирования таких трубок в Garfield++ использовались следующие параметры:

- Диаметр straw-трубки: 10 мм
- Диаметр анода: 30 мкм
- Рабочее напряжение: 1750 В
- Газовая смесь: Ar+CO₂ (70:30 %)
- Температура газовой смеси: 20 °C
- Давление газовой смеси: 1 атм
- Ионизирующие частицы: мюон, протон, позитрон, электрон
- Импульсы частиц: 0,1 - 10 ГэВ
- Магнитное поле, сонаправленное с осью трубки: 0 Т и 2 Т

3.3.1 Моделирование сигналов трубки в Garfield++ и LTSpice

С помощью Garfield++ были построены изображения движения электронов с магнитным полем и без него, что позволило оценить влияние магнитного поля на сигналы.

Также были промоделированы сигналы, индуцированные на аноде straw-трубки при прохождении мюона через трубку на заданном расстоянии от анодной проволоки. Эти сигналы использовались как входные для модели считывающей электроники, заданной в LTSpice

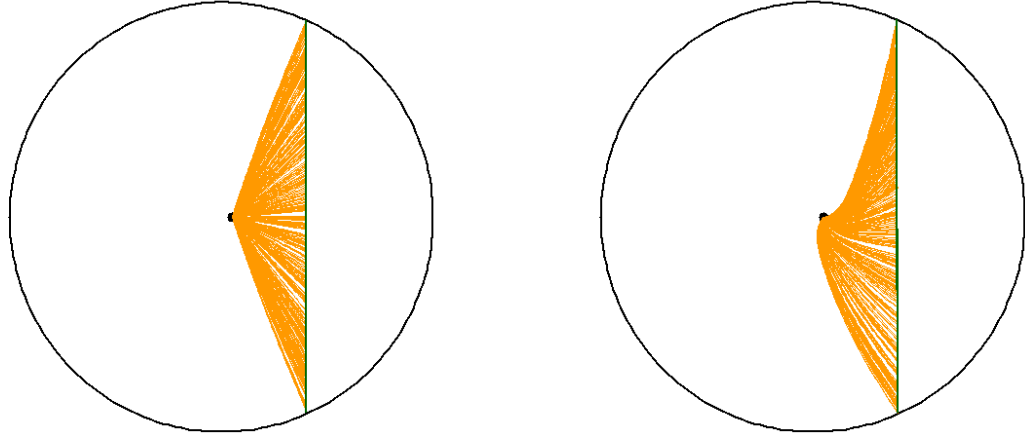


Рис. 3.1: Примеры дрейфовых линий электронов в объеме straw-трубки при отсутствии (слева) и наличии (справа) магнитного поля $B = 2$ Т. Мюон пересекает объем трубки, ионизируя рабочий газ. Электроны дрейфуют к аноду и формируют лавину. В магнитном поле траектории электронов искривляются.

Графики слева показывают множество сигналов, полученных в результате моделирования. Графики справа показывают распределение моментов пересечения порогового уровня сигнала (10 мВ). Эти графики являются важным инструментом для анализа и оптимизации работы детекторов, а также для точной интерпретации результатов, полученных в процессе моделирования.

Моделирование проводилось для мюонов, пересекающих straw-трубку на расстояниях 0,1 мм (рисунок 3.2), 2,0 мм (рисунок 3.3) и 4,8 мм (рисунок 3.4) от анода.

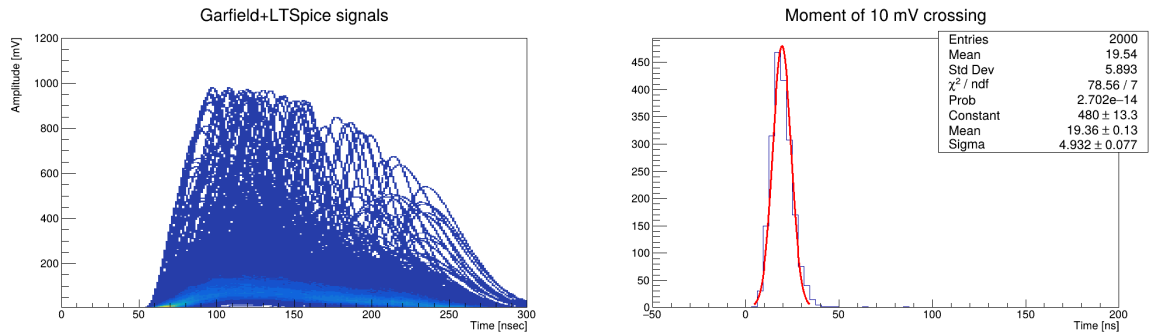


Рис. 3.2: Смоделированы сигналы (слева) и распределение времён пересечения сигналом порога дискриминатора (справа) для треков проходящих на расстоянии 0,1 мм от анодной проволоки.

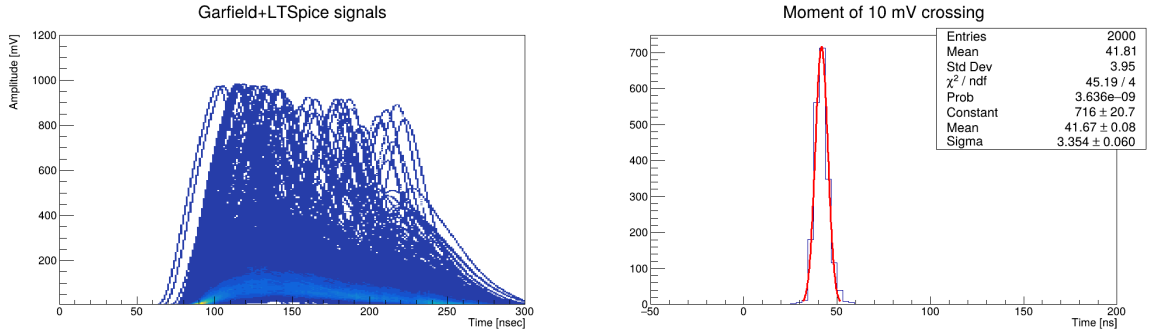


Рис. 3.3: Расстояние трека от оси проволоки равно 2,0 мм.

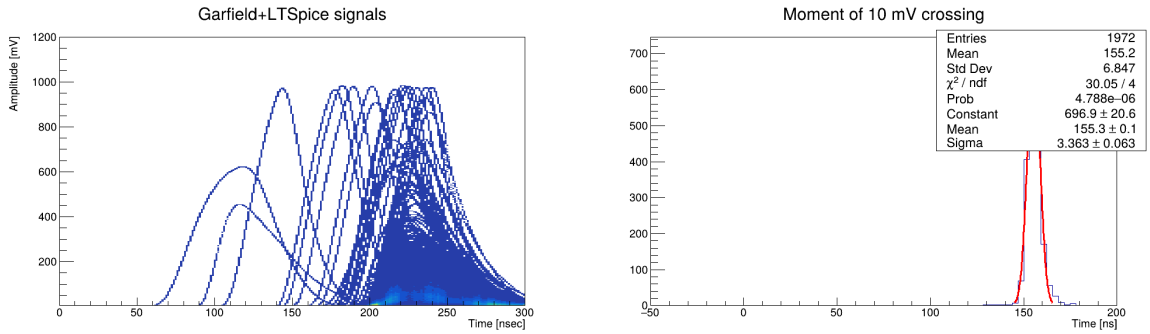


Рис. 3.4: Расстояние трека от оси проволоки равно 4,8 мм.

3.4 Drift time

Drift time — это время, прошедшее от момента первичной ионизации газа заряженной частицей до момента, когда индуцированный сигнал на анодной проволоке пересекает заданный порог дискриминатора. Величина drift time напрямую связана с расстоянием между треком и анодом и определяет пространственное разрешение straw-детектора. Корректное определение drift time позволяет точно восстановить трек частицы по координатам в пространстве.

3.5 Исследование зарядового разрешения.

Garfield++ даёт доступ к моделированию потерь энергии на ионизацию. Измерение ионизационных потерь, заряженной низкоэнергетичной частицей, пересекающей straw-tracker, является основой для определения её типа, или Particle Identification, PID. Проводимое нами моделирование служит для поддержки измерений на тестовых пучках, при этом полный учёт ионизационных потерь обеспечивает физическую достоверность результатов.

Рисунок 3.5 показывает распределение ионизационных потерь в трубке при прохождении через неё позитронов и пионов, пересекающих straw-трубку на расстоянии 0,2 мм от анодной проволоки.

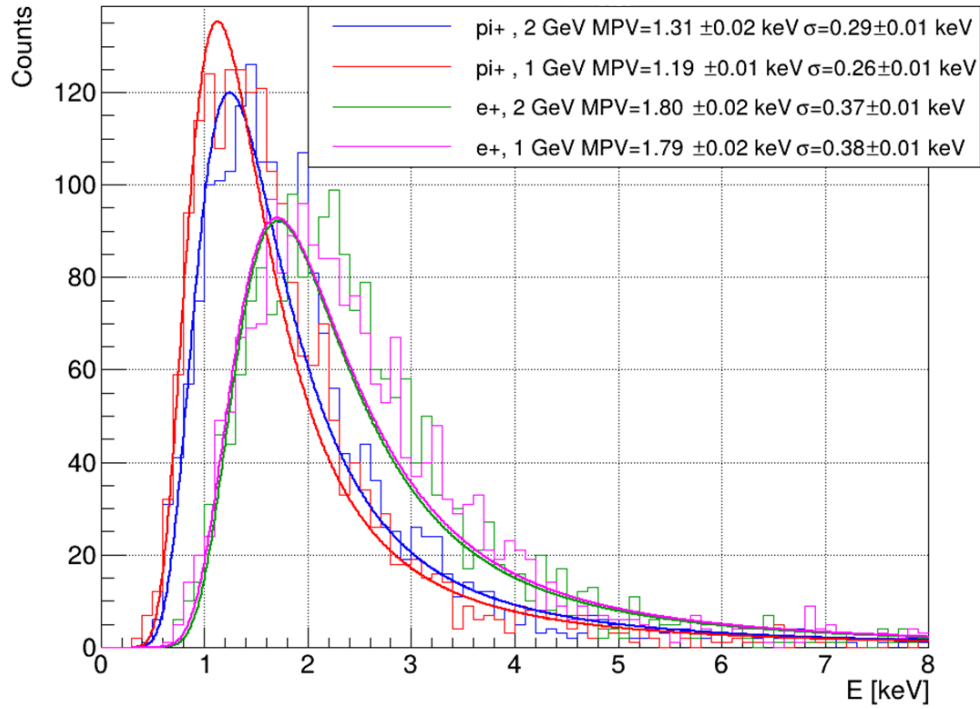


Рис. 3.5: Ионизационные потери пионов и позитронов

3.5.1 Определение типа частицы с малыми импульсами.

График показывает, что можно различать частицы с небольшими значениями импульсов. Оценивая положение пика распределения ионизационных потерь для частиц с различными импульсами, можно получить зависимости, приведённые на рисунке 3.6.

При сравнительно небольших относительных значениях ширин распределений σ/MPV , возможно определение типа частицы с помощью straw-трекера, что является важной опцией для детектора SPD.

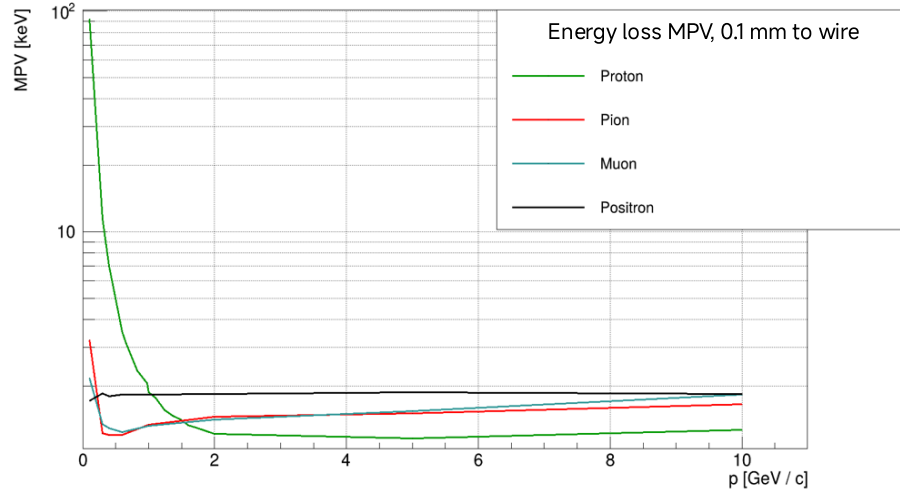


Рис. 3.6: График зависимости наиболее вероятного значения от импульса частиц.

3.6 Исследование зависимости зарядового разрешения от времени интегрирования.

Сигналы в пропорциональных газоразрядных детекторах обладают длительным ионным хвостом. Полный заряд, индуцированный на электродах детектора, пропорционален ионизационным потерям. Однако реальная считывающая электроника обычно имеет время формирования, в течении которого происходит интегрирование сигнала, достаточно короткое.

Инструмент Garfield++ позволяет интегрировать заряд сигнала в произвольном временном окне. Это позволяет изучать влияние времени формирования на относительное расширение, σ/MPV . На графиках (Рис.3.7-3.10) показаны распределения интеграла заряда для пионов с импульсами 1 и 2 ГэВ и для позитронов с импульсом 2 ГэВ, индуцированного в течение 12, 25, 50, 220 наносекунд. Это наглядно демонстрирует влияние времени интегрирования на форму распределения и его параметры. Рисунок 3.11 показывает распределение полного заряда, индуцированного на анод трубки.

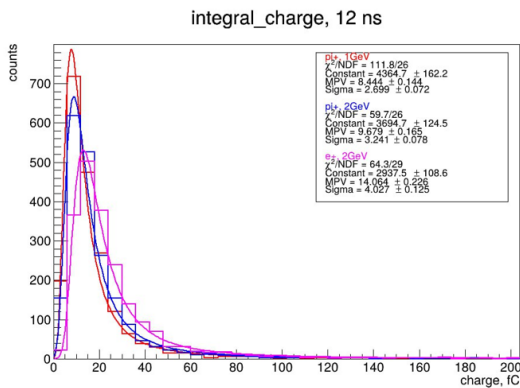


Рис. 3.7: Время интегрирования - 12 нс.

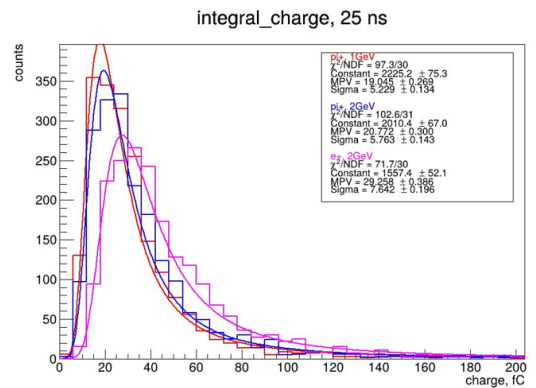


Рис. 3.8: Время интегрирования - 25 нс.

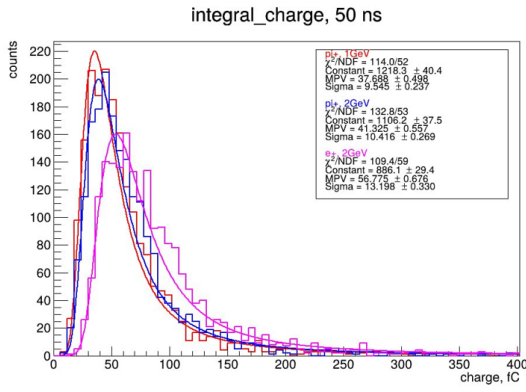


Рис. 3.9: Время интегрирования - 50 нс.

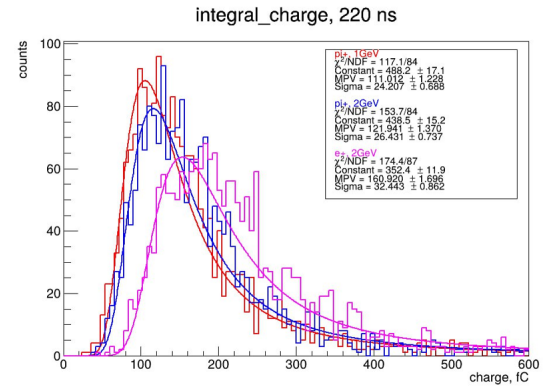


Рис. 3.10: Время интегрирования - 220 нс.

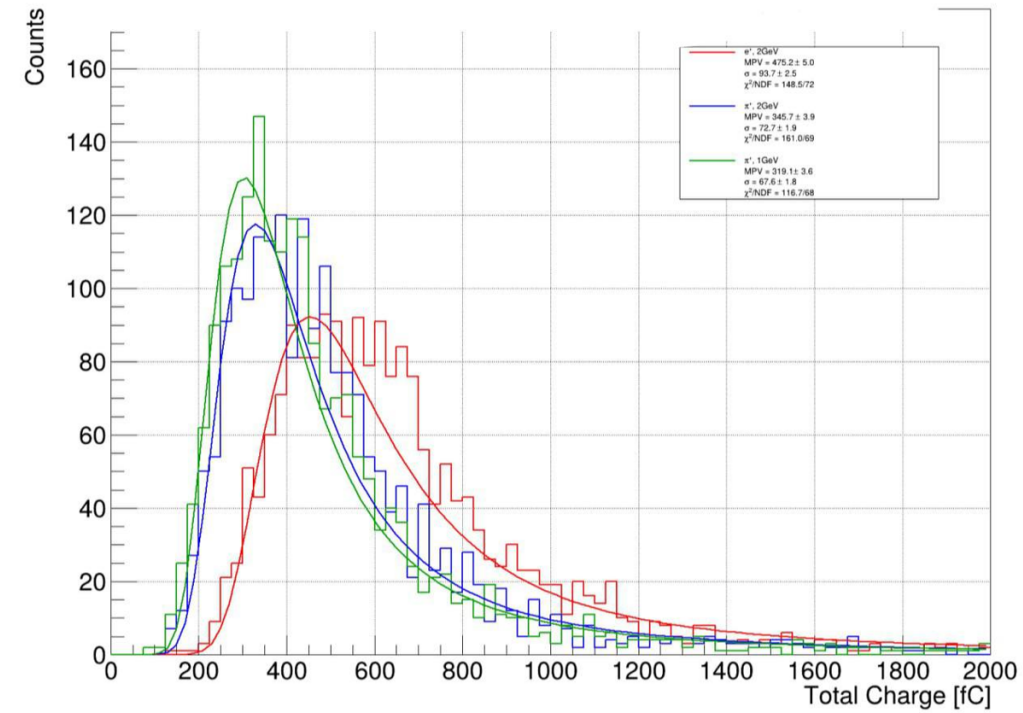


Рис. 3.11: Бесконечное время интегрирования

Предусилитель работает с ограниченным временем формирования сигнала, поэтому была исследована зависимость собираемого заряда от времени его накопления. Наблюдается сильная зависимость зарядового разрешения от выбранного времени интегрирования.

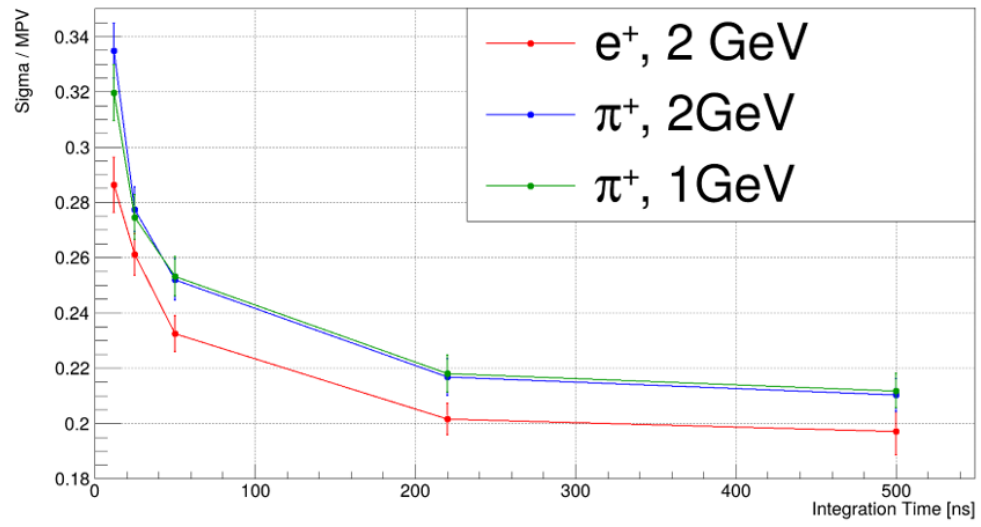


Рис. 3.12: Зависимость зарядового разрешения от выбранного времени интегрирования. (Для 500 нс указано бесконечное время интегрирования).

Заключение

Данная работа посвящена созданию реалистичной параметризации сигналов трубок *straw*-трекеров с помощью моделирования отклика трубок в программе *Garfield++*. Разработана реалистичная модель формирования и обработки сигнала в детекторе с использованием *Garfield++* и *LTSpice*.

В ходе исследования было произведено моделирование процессов формирования заряда на аноде *straw*-трубки при прохождении через неё мюона. Моделирование проводилось для нескольких случаев: отсутствие магнитного поля, магнитное поле с величиной 2 Т, расстояние трека от оси проволоки равно 0,1 мм, 2,0 мм, 4,8 мм. Результаты моделирования заряда, индуцированного на аноде *straw*-трубки, использовались для эмуляции отклика считывающей электроники, реализованной в программе *LTSpice*. Было проведено детальное изучение влияния времени формирования предусилителя считывающей электроники на зарядовое разрешение трубки, которое является важным параметром, характеризующим возможность использования *straw*-трекера для идентификации частиц.

Зарядовое разрешение ухудшается при сокращении времени интегрирования. Моделирование позволило количественно оценить компромисс между зарядовым и временным разрешением и определить оптимальное время формирования.

Результаты работы помогут в проектировании считывающей электроники и проведении новых исследований, обеспечивающих более надежные и точные детекторы для исследований частиц в будущем.

Литература

- [1] <https://git.jinr.ru/nica/spdroot>
- [2] Heinrich Schindler. Garfield++ User Guide.
- [3] Gilles Brocard. The LTspice IV Simulator: Manual, Methods and Applications // Würth Elektronik. – 2013. – 744 p.
- [4] Garfield++/LTSpice for modelling response of Straw Tubes with custom readout - IOPscience <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2984/1/012020>
- [5] Straw signal modeling using Garfield++ interface to LTSPICE - IOPscience <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2642/1/012005>
- [6] William R. Leo. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments // Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH. – 1994.
- [7] The SPD collaboration. Technical Design Report of the Spin Physics Detector // Joint Institute for Nuclear Research. – 2023. pp. 288-290.