

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
мнс, ЛФВЭ, ОИЯИ

_____ А. Т. Мухамеджанова

Студент

_____ А.И. Гурова

Москва 2025

Оглавление

1	Введение	2
2	Физические процессы в газоразрядном детекторе	3
2.1	Взаимодействие заряженных частиц с веществом газового детектора	3
2.1.1	Первичная ионизация	3
2.2	Транспорт электронов и ионов в газах	3
2.2.1	Дрейф и подвижность ионов	3
2.3	Выбор рабочего газа	4
2.4	Принцип работы straw-трубок	4
3	Параметризация временных характеристик сигналов straw-трекера . . .	6
3.1	Моделирование в Garfield++	6
3.1.1	Garfield++: инструмент для симуляции газоразрядных детекторов . .	6
3.2	Электроника в LTSpice	7
3.3	Параметры моделирования straw-трубок в эксперименте	7
3.3.1	Моделирование сигналов трубки в Garfield++ и LTSpice	7
3.4	Drift time	9
3.5	Шумы	9
	Заключение	11
	Литература	11

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.

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.

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 и, таким образом, образуется электрон-ионная пара.

Сечение реакции ионизации зависит от газа и энергии заряженной частицы и для Ar составляет $O(10^{-16})$ см². 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 C_2H_6 . 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 [5].

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 выстлана проводящей фольгой (Au, Cu) и является катодом. Толщина стенок трубки обычно составляет несколько десятков микрон. По оси трубки расположена проволока, 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 [6]. 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 симуляции 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 в эксперименте

В эксперименте 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
- Ионизирующая частица: мюон с энергией 1 ГэВ
- Магнитное поле: 0 Т и 2 Т

3.3.1 Моделирование сигналов трубки в Garfield++ и LTSpice

Были построены изображения движения электронов с магнитным полем и без него, что позволило оценить влияние магнитного поля на сигналы.

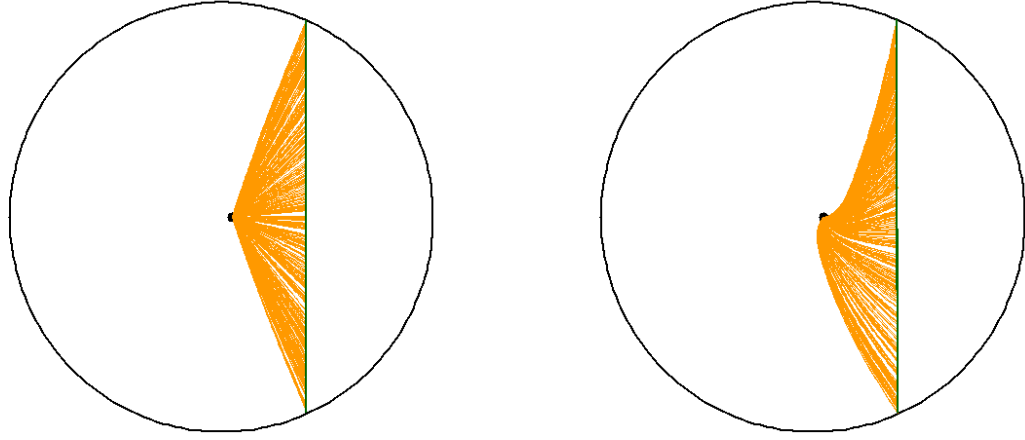


Рис. 3.1: Примеры дрейфовых линий электронов в объеме straw-трубки при отсутствии (слева) и наличии (справа) магнитного поля $B = 2$ Т. Мюон пересекает объем трубки, ионизируя рабочий газ. Электроны дрейфуют к аноду и формируют лавину. В магнитном поле траектории электронов искривляются.

Также были построены графики, отображающие различные расстояния трека, что позволило наглядно продемонстрировать поведение частиц в условиях эксперимента. Графики слева показывают множество сигналов, полученных из эксперимента. 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. Различие расстояний помогает выявить ключевые особенности взаимодействий частиц с рабочими газами детекторов, что, в свою очередь, способствует улучшению параметризации откликов и повышению точности измерений в дальнейшем.

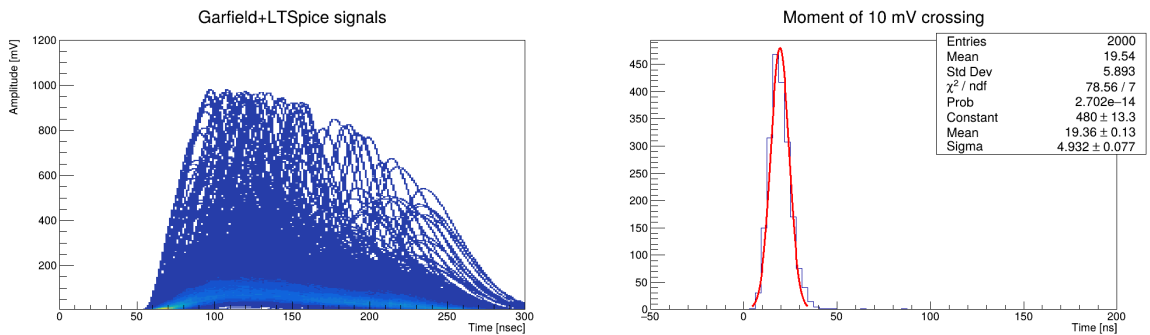


Рис. 3.2: Расстояние трека от оси проволоки равно 0,1 мм.

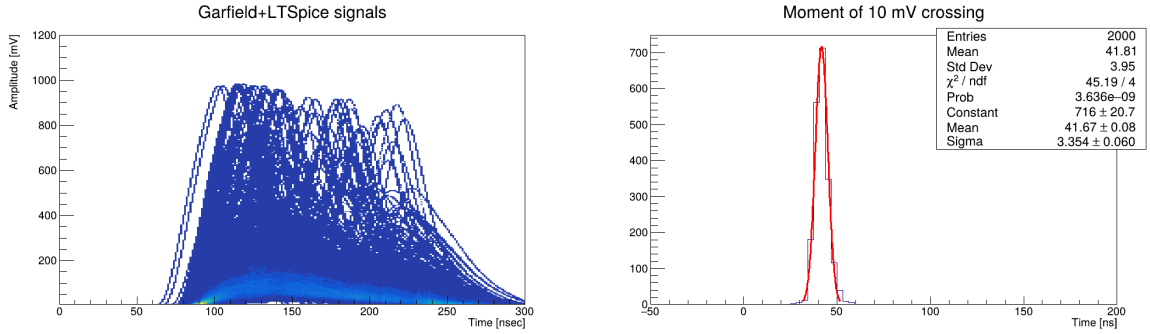


Рис. 3.3: Расстояние трека от оси проволоки равно 2,0 мм.

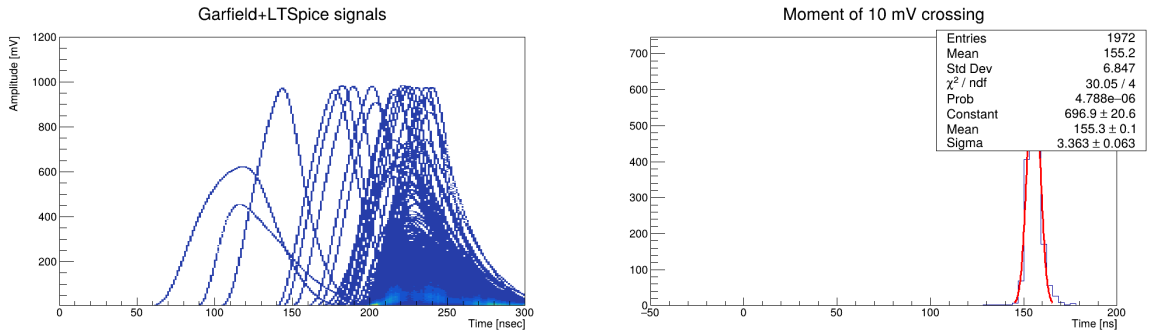


Рис. 3.4: Расстояние трека от оси проволоки равно 4,8 мм.

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 Шумы

Для приближения модели фронт-энд электроники к реальным условиям на смоделированные в Garfield++ сигналы накладывается белый гауссов шум (AWGN) с эквивалентным шумовым зарядом (ENC) 500 е, 1000 е и 1500 е. ENC в единицах электрона отражает уровень флуктуаций электронного тракта. Повышение ENC ведёт к увеличению разброса времени пересечения порога и смещению среднего значения drift time. Анализ распределений времени пересечения порога при разных уровнях шума позволяет оптимально выбрать порог дискриминирования и настройки усиления, что улучшает временное и пространственное разрешение детектора.

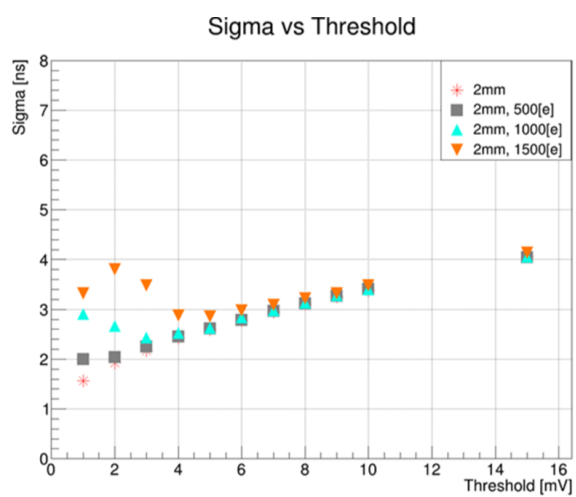


Рис. 3.5: Пример с учетом шума

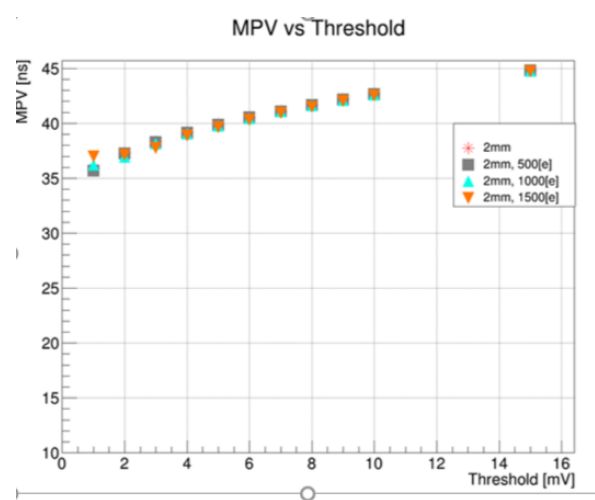


Рис. 3.6: Пример с учетом шума

Заключение

Данная работа посвящена созданию реалистичной параметризации сигналов трубок *straw*-трекеров с помощью моделирования отклика трубок в программе *Garfield++*.

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*.

После этапа моделирования в *LTSpice* были построены распределения времени пересечения сигналами заданного порога. Исследовано влияние шумов на форму сигнала и точность измерения времени. Модель учитывает параметры микросхемы VMM3a и согласуется с данными эксперимента NA62.

Результаты работы помогут в проектировании и проведении новых экспериментов, обеспечивая 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] H.J. Hilke, W. Riegler. Gaseous Detectors // Particle Physics Reference Library: Volume 2: Detectors for Particles and Radiation. – 2020. – P. 91–136.
- [5] William R. Leo. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments // Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH. – 1994.
- [6] The SPD collaboration. Technical Design Report of the Spin Physics Detector // Joint Institute for Nuclear Research. – 2023. pp. 288-290.