

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

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ
СЧИТЫВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА ТОЧНОСТЬ
ИЗМЕРЕНИЙ STRAW TRACKER SPD С
ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ GARFIELD И LTSPICE**

Научный руководитель НИЦ «Курчатовский институт»	_____ Е. В. Кузнецова
Научный консультант Объединённый институт ядерных исследований	_____ Т. Л. Еник
Научный консультант НИЦ «Курчатовский институт»	_____ С. А. Буланова
Студент	_____ А.И. Гурова

Алматы 2026

Оглавление

Благодарности	3
1 Введение	4
2 Физические процессы в газоразрядном детекторе	6
2.1 Взаимодействие заряженных частиц с веществом газового детектора	6
2.1.1 Первичная ионизация	6
2.2 Транспорт электронов и ионов в газах	6
2.2.1 Дрейф и подвижность ионов	6
2.3 Выбор рабочего газа	7
2.4 Принцип работы straw-трубок	7
3 Влияние параметров считывающей электроники на точность измерений Straw Tracker SPD	9
3.1 Актуальность и недостатки стандартной параметризации в SPDroot	9
3.1.1 Garfield++: инструмент для моделирования отклика газоразрядных детекторов	10
3.1.2 Моделирование сигналов в LTSpice	11
3.1.3 Параметры моделирования straw-трубок для эксперимента SPD	11
3.1.4 Влияние параметров считывающей электроники на идентификацию частиц	12
3.1.5 Методика анализа	12
3.1.6 Формирование сигнала в straw-трубке	13
3.1.7 Влияние времени интегрирования	13
3.1.8 Пространственная зависимость регистрации сигнала	13
3.1.9 Флуктуации сигнала	14
3.1.10 Влияние на точность идентификации частиц	14
3.2 Сравнение сигналов при фиксированных dE для частиц разными импульсами	15
3.3 Кластерный анализ	16
3.3.1 Влияние на сигнал	17
3.4 Двумерное распределение амплитуды сигнала и энергетических потерь	17
3.5 Вероятность насыщения предусилителя	18
3.5.1 Зависимость от времени формирования сигнала	19
3.5.2 Зависимость от расстояния до анодной проволоки	19
3.6 Параметризация сигнала в SPDroot	19
3.6.1 Связь между E_{loss} и амплитудой	20
3.6.2 Флуктуации сигнала	20

Заключение	22
Литература	22

Благодарности

Выражаю благодарность научному руководителю Е. В. Кузнецовой и научным консультантам Т.Л. Енику и С. А. Булановой за руководство работой и ценные замечания.

Особую благодарность хочу выразить 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]. Также при работе детектора SPD в начальной конфигурации, так называемой Stage 1, straw tracker будет использоваться для идентификации заряженных частиц с малыми импульсами, $p < 1$ ГэВ/с

Импульс частицы восстанавливается по радиусу кривизны трека частицы в магнитном поле, для идентификации частиц используется величина ионизационных потерь, dE , в straw трубках, 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 straw трубки 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, проведённой 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. В случае измерения ионизационных потерь такой величиной является амплитуда сигнала, соответствующая заряду, индуцированному на электродах трубки.

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. Решению этой задачи были посвящены предыдущие отчёты. В представленной работе описывается параметризация амплитуды сигнала в рамках изучения влияния электроники на точность идентификации частиц.

Цели

- Изучение принципа работы газовых детекторов на основе Straw Tube Trackers.

- Моделирование сигналов отклика Straw трубок с использованием программ Garfield++ и LTSpice.
- Создать цепочку для реалистичного моделирования сигналов детектора: Garfield++ для газа, LTSpice для электроники.
- Сравнить формы сигнала для различных импульсов частиц при фиксированных ионизационных потерях (dE).
- Оценить вероятность насыщения считывающей электроники в зависимости от угла, расстояния до проволоки и времени формирования.
- Определить, какие параметры критичны для параметризации
- На основе результатов моделирования способствовать параметризации 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 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 [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, пересекающей дрейфовую трубку, 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, при движении электронов и ионов 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.

Так как трубка работает в пропорциональном режиме, полная величина заряда, индуцированного на электрода, Q_{tot} , пропорциональна величине заряда в кластерах ионизации, N_i , которые, в свою очередь, пропорциональны ионизационным потерям энергии частицы:

$$dE \sim dN_i \sim Q_{tot} \quad (2.1)$$

Считывающая электроника интегрирует заряд в течение ограниченного времени, *peaking time*, являющегося свойством конкретной модели предусилителя и формирователя.

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 Влияние параметров считывающей электроники на точность измерений Straw Tracker SPD

3.1 Актуальность и недостатки стандартной параметризации в SPDroot

Программный пакет SPDroot используется для изучения точности измерения физических процессов в эксперименте SPD. SPDroot интегрирует моделирование процессов, происходящих при соударениях частиц пучка (например, протонов), а также моделирование взаимодействия образовавшихся при соударениях частиц с веществом детектора. Например, при моделировании процессов рождения пионов отклик трубки, через которую проходит пион, будет характеризоваться координатами и величиной ионизационных потерь энергии E_{loss} .

Ионизационные потери E_{loss} (в ГэВ) преобразуются в отклик детектора $Resp$ простым размытием по гауссу с постоянной относительной шириной 20%.

$$Resp = E_{loss} \cdot (1 + G), \quad (3.1)$$

где G — гауссовская флуктуация с $\sigma = 0.2 \cdot E_{loss}$.

Этот подход использовался в Technical Design Report (TDR) для оценки эффективности идентификации частиц (PID) с 35%-ным усечённым средним.

Почему этого недостаточно?

1. **Форма сигнала не учитывается.** Амплитуда усиленного сигнала зависит не только от амплитуды входного сигнала, но и от соотношения его длительности и времени интегрирования заряда электроникой (peaking time). При коротком peaking time часть заряда теряется, и, собственно, увеличиваются флуктуации.
2. **Насыщение предусилителя.** При больших локальных плотностях ионизации (например, от плотного кластера или при малом расстоянии до анода) амплитуда может превысить динамический диапазон электроники. Это приводит к обрезанию сигнала и нелинейности.
3. **Угловая зависимость.** Длина трека внутри трубки меняется с углом, что влияет на величину заряда.

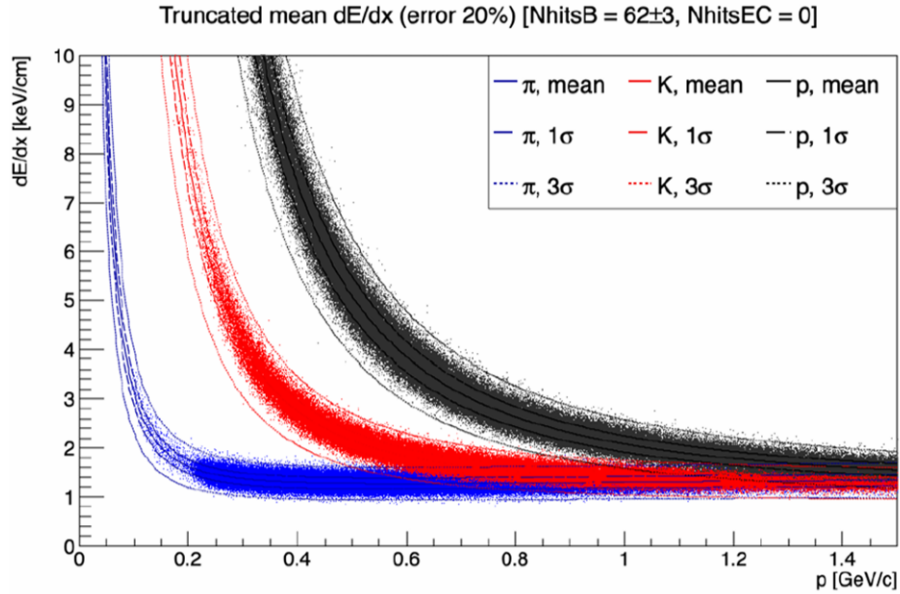


Рис. 3.1: Зависимость ионизационных потерь от импульса частицы

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.

3.1.2 Моделирование сигналов 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).

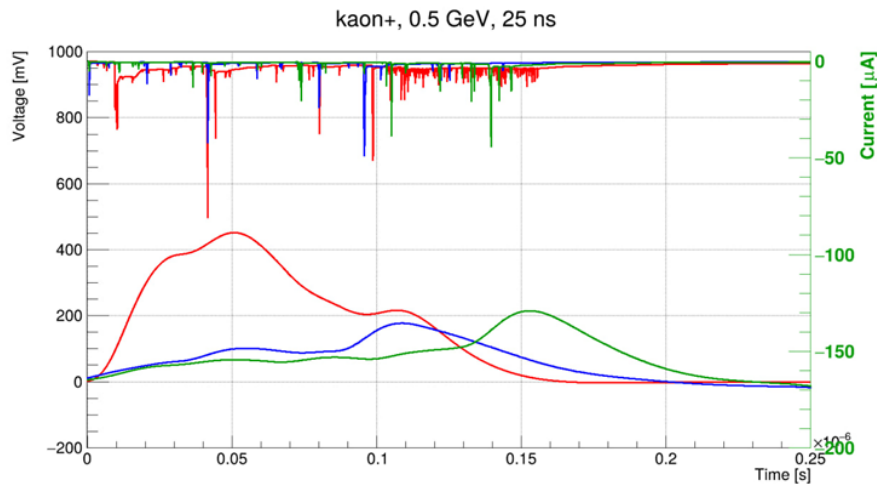


Рис. 3.2: Пример работы Garfield++ (верхние графики, измеряемые в микроамперах) и LTSpice (нижние графики, измеряемые в милливольтгах)

3.1.3 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
- **Заряженные частицы:** каоны, протоны
- **Импульсы частиц:** 0,3, 0,5, 1 ГэВ

Необходимость новой параметризации

Таким образом, необходима параметризованная модель, которая для заданных:

- E_{loss} (ионизационные потери),
- расстояния R от трека до анода,
- угла θ влёта частицы,
- времени формирования (peaking time)

выдаёт реалистичную амплитуду и её флуктуации. Для общей оценки возможности PID также полезно знать вероятность выхода предусилителя в режим насыщения.

3.1.4 Влияние параметров считывающей электроники на идентификацию частиц

В данной работе проводится моделирование сигнала в straw-трубке и отклика считывающей электроники с использованием программных пакетов `Garfield++` и `LTSpice`. Моделирование выполняется на уровне одной трубки, что позволяет детально исследовать вклад различных физических процессов и параметров электроники в формирование измеряемого сигнала.

Основной целью данного этапа является анализ влияния параметров считывающей электроники на точность измерения энергетических потерь заряженных частиц и, как следствие, на качество их идентификации (PID).

3.1.5 Методика анализа

В качестве количественной характеристики точности измерения используется отношение ширины распределения сигнала к наиболее вероятному значению (σ/MPV). Данная величина рассматривается как для распределения ионизационных потерь, так и для распределения амплитуд сигналов, формируемых электроникой.

Моделирование включает два этапа:

- расчет процессов ионизации, дрейфа и лавинного умножения в газе с помощью `Garfield++`;
- моделирование отклика считывающей электроники с использованием `LTSpice`.

3.1.6 Формирование сигнала в straw-трубке

При прохождении заряженной частицы через газовую смесь происходит ионизация, приводящая к образованию первичных электронов. Соответствующий заряд называется *primary charge* и определяется потерями энергии частицы в веществе.

Далее электроны дрейфуют к анодной проволоке, где в сильном электрическом поле происходит лавинное умножение. В результате формируется *total charge* – полный заряд, индуцирующий сигнал на электродах.

Индукированный сигнал состоит из двух компонент:

электронной, формируемой движением электронов (характерные времена – единицы наносекунд);

ионной, обусловленной медленным движением положительных ионов (характерные времена – сотни наносекунд и более).

3.1.7 Влияние времени интегрирования

Считывающая электроника регистрирует сигнал в течение конечного времени интегрирования. Данный параметр существенно влияет на величину измеряемого заряда.

На рис. 3.3 показано, что:

при больших временах интегрирования (порядка 10 мкс) регистрируются как электронная, так и ионная компоненты сигнала, и измеренный заряд приближается к *total charge*;

На рис. 3.4 видно, что:

при уменьшении времени интегрирования (например, до 250 нс) ионная компонента собирается не полностью.

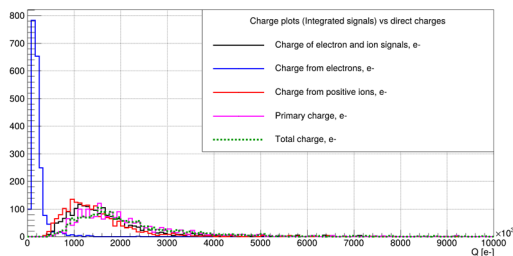


Рис. 3.3: Время интегрирования 10 мкс.

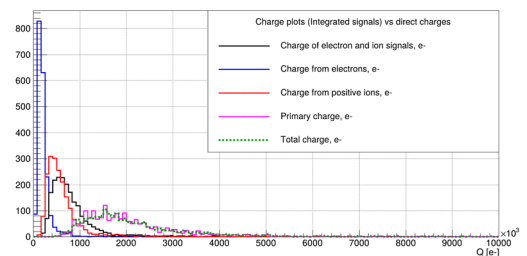


Рис. 3.4: Время интегрирования 250 нс.

В результате при малом времени интегрирования измеряемый сигнал существенно занижен по сравнению с полным зарядом.

3.1.8 Пространственная зависимость регистрации сигнала

Дополнительный эффект связан с пространственным распределением кластеров ионизации вдоль трека частицы.

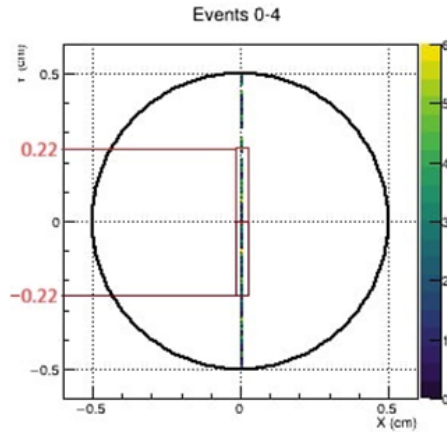


Рис. 3.5: Пространственное распределение кластеров

На рис. 3.5 показано распределение кластеров. Сигнал начинает развиваться, когда электроны первого кластера достигнут анодной проволоки. При малом времени формирования сигнала (например, 25 нс) электроника успевает зарегистрировать сигнал только от части кластеров, соответствующей расстоянию порядка 2.2 мм от анода. Вклад более удалённых кластеров не учитывается, поскольку электроны от них не успевают достигнуть анода за время интегрирования.

Таким образом, измеряемый сигнал зависит не только от общей величины dE , но и от времени формирования.

3.1.9 Флуктуации сигнала

При уменьшении времени формирования сигнала наблюдается увеличение флуктуаций. Это связано с тем, что при коротком временном окне вклад отдельных кластеров начинает играть доминирующую роль, и сигнал становится чувствительным к случайным вариациям их положения и времени прихода электронов.

В частности, если время формирования оказывается меньше характерного времени дрейфа электронов, то это приводит к существенному росту относительной ширины распределения сигнала (σ/MPV).

3.1.10 Влияние на точность идентификации частиц

Увеличение флуктуаций сигнала при малых временах интегрирования приводит к росту ширины распределений амплитуд и, как следствие, к ухудшению точности измерения энергетических потерь.

Поскольку идентификация частиц (PID) в straw-трекере основана на различиях в dE/dx , увеличение σ/MPV приводит к ухудшению разделения частиц.

Таким образом, параметры считывающей электроники, в частности время интегрирования и время формирования сигнала, оказывают существенное влияние на эффективность PID.

Полученные результаты показывают, что измеряемый сигнал зависит не только от энергетических потерь, но и от параметров электроники и временной структуры сигнала.

В связи с этим возникает вопрос: достаточно ли знания только величины dE для описания отклика детектора, или необходимо учитывать более детальную структуру процесса ионизации.

Для ответа на этот вопрос в дальнейшем проводится сравнение формы сигналов для частиц с различными импульсами при фиксированных значениях энергетических потерь.

3.2 Сравнение сигналов при фиксированных dE для частиц разными импульсами

Были смоделированы протоны с импульсами 500 МэВ/с и 1000 МэВ/с. На рис. 3.6 показаны распределения ионизационных потерь. Выбран узкий интервал потерь 5.0–5.5 кэВ. Для событий, в которых ионизационные потери попадают в этот интервал, построена амплитуда сигналов на выходе считывающей электроники, показанная на рис. 3.7.

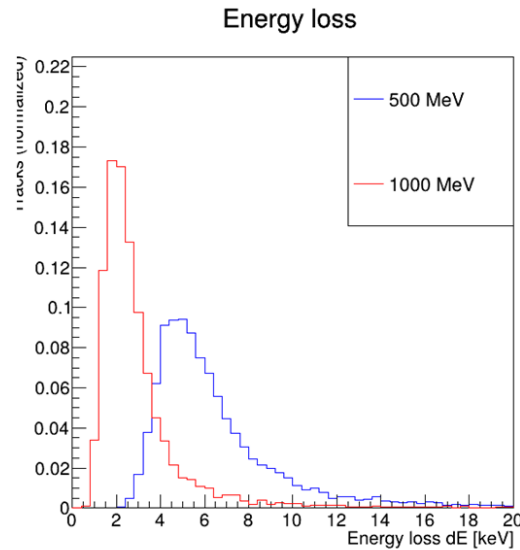


Рис. 3.6: Ионизационные потери протонов.

Оказалось, что распределения амплитуд сигналов различается для 500 МэВ и 1000 МэВ, хотя dE одинаковы.

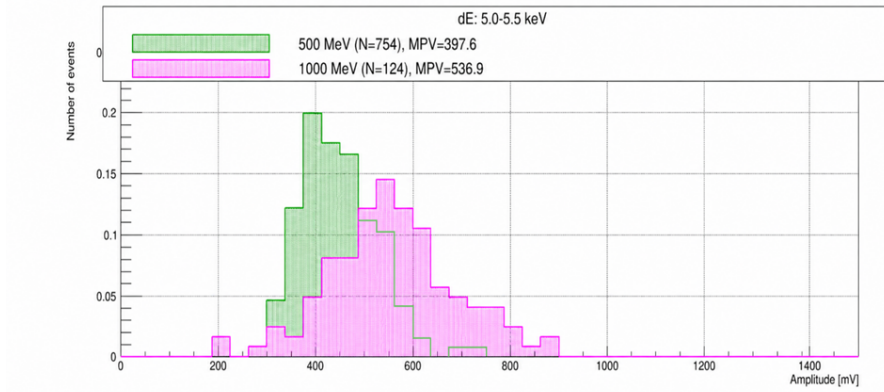


Рис. 3.7: Распределения амплитуд сигналов при фиксированных ионизационных потерях

Протон с меньшим импульсом (500 МэВ) имеет большую линейную плотность ионизации. Однако в заданном узком окне потерь полная энергия, переданная газу, одинакова. Разница может быть связана с пространственным распределением ионизации вдоль трека (кластерная структура), а не с суммарной энергией.

3.3 Кластерный анализ

Кластер — это группа первичных электронов, при единичном акте ионизации первичной частицы. При большой энергии образовавшегося электрона он может ионизовать ещё один атом аргона на небольшом расстоянии от первого.

Три параметра кластерной структуры:

1. Среднее число кластеров на трек
2. Средний размер кластера — среднее число первичных электронов в одном кластере.
3. Суммарное число первичных электронов на трек — произведение первых двух.

Распределения этих величин показаны на рис. 3.8.

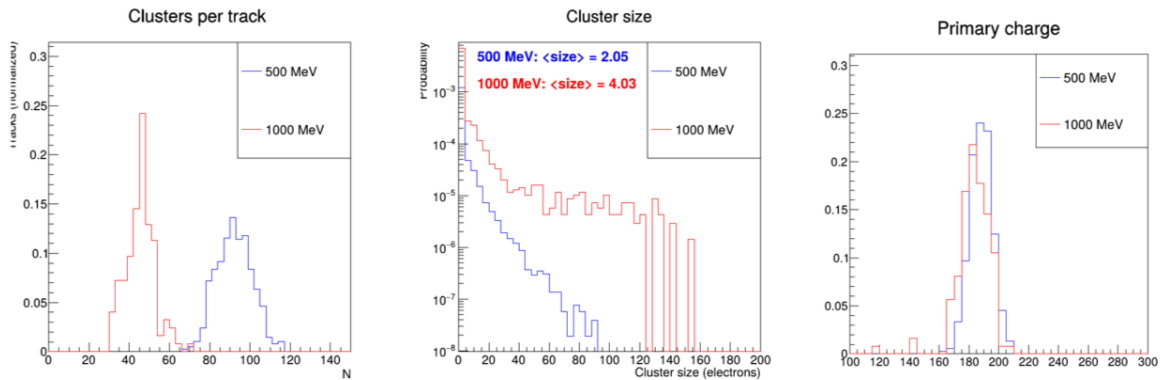


Рис. 3.8: Распределение кластеров (слева), размеры кластеров (посередине), первичный заряд (справа).

На табл. 3.1 показано сравнение кластерных параметров.

Таблица 3.1: Сравнение кластерных параметров для протонов с разными импульсами при одинаковых dE (5.0–5.5 кэВ)

Параметр	500 МэВ	1000 МэВ
Число событий (после отбора по dE)	754	124
Среднее число кластеров	91.7	45.1
Средний размер кластера	2.05	4.03
Среднее число первичных электронов	187.6	181.6

Ключевое наблюдение: полный первичный заряд почти одинаков (187.6 против 181.6) — это соответствует фиксированным dE (разница в пределах статистики). Но кластерная структура кардинально разная:

- При 500 МэВ — много мелких кластеров (частота ионизации высока, но в каждом акте рождается мало электронов).
- При 1000 МэВ — мало крупных кластеров.

3.3.1 Влияние на сигнал

Электроны из одного кластера стартуют почти вместе, дрейфуют и создают лавину, сконцентрированную в пространстве и времени. Это приводит к короткому пику тока большой амплитуды.

Много мелких кластеров дают распределённые во времени и пространстве лавины — сигнал более растянут и имеет меньшую пиковую амплитуду (при одинаковом полном заряде).

Для электроники с ограниченным динамическим диапазоном крупные кластеры с большей вероятностью вызывают насыщение, даже если полная потеря энергии такая же, как у случая с мелкими кластерами.

Фиксированные потери энергии не определяют однозначно форму сигнала и амплитуду. В идеале параметризация должна включать не только dE , однако такой подход предполагает учёт таких параметров, как тип частицы, её импульс, ожидаемые ионизационные потери и другие. Для упрощения на данном этапе была использована только зависимость от dE .

3.4 Двумерное распределение амплитуды сигнала и энергетических потерь

Для анализа отклика детектора было построено двумерное распределение зависимости амплитуды сигнала A от энергетических потерь dE :

$$A = f(dE). \quad (3.2)$$

Исследование проводилось для каонов с импульсом 1 ГэВ при различных временах формирования сигнала (peaking time) рис. 3.9.

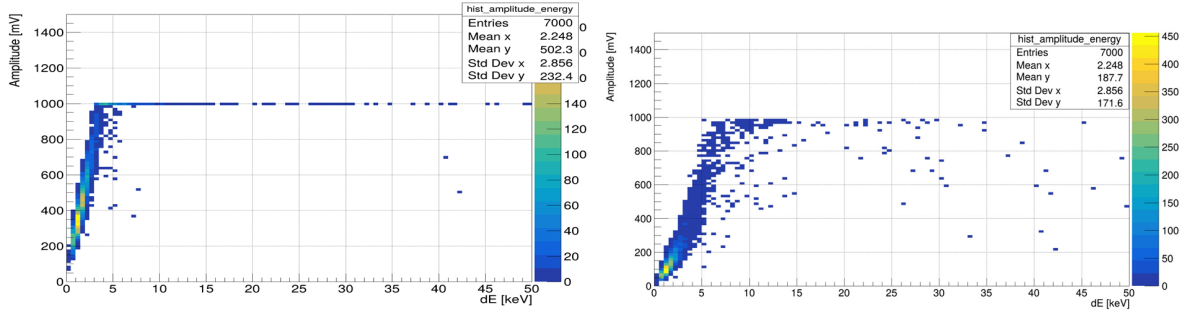


Рис. 3.9: Двумерное распределение амплитуды сигнала от dE для каонов при различных временах формирования сигнала: слева — 200 нс, справа — 25 нс.

Анализ полученных распределений показывает, что зависимость между амплитудой сигнала и энергетическими потерями носит нелинейный характер.

При уменьшении времени формирования сигнала наблюдаются следующие эффекты:

- уменьшается средняя амплитуда сигнала, поскольку не успевает собраться ионная компонента;
- увеличивается разброс значений амплитуды при фиксированном dE ;
- ухудшается энергетическое разрешение детектора.

Таким образом, выбор времени формирования сигнала является критическим параметром, напрямую влияющим на точность измерений.

3.5 Вероятность насыщения предусилителя

Под насыщением понимается режим работы электроники, при котором выходной сигнал превышает динамический диапазон предусилителя:

$$A > A_{sat}. \quad (3.3)$$

В этом случае информация о реальной величине сигнала теряется.

В данной работе рассматривается порог в 800 мВ.

Вероятность насыщения описывается сигмоидой (логистической функцией):

$$P_{overflow}(dE) = p_0 + \frac{p_1 - p_0}{1 + e^{-p_2 \cdot (dE - p_3)}}, \quad (3.4)$$

где параметры имеют следующий смысл:

p_0 — минимальная эффективность (нижняя асимптота),

p_1 — максимальная эффективность (верхняя асимптота),

p_2 — крутизна перехода (slope),

p_3 — значение dE , при котором достигается 50%-ная вероятность насыщения (середина перехода).

3.5.1 Зависимость от времени формирования сигнала

На рис. 3.10 показана зависимость вероятности насыщения от времени формирования сигнала.

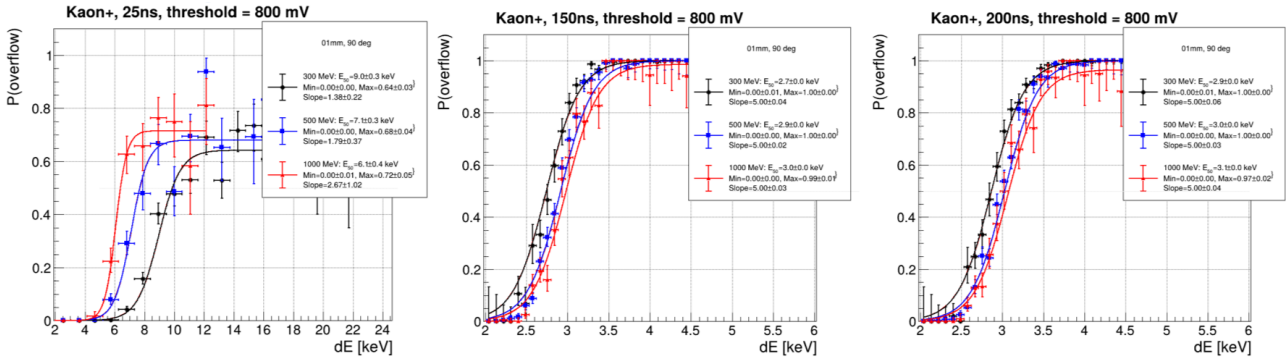


Рис. 3.10: Зависимость вероятности насыщения от времени формирования сигнала.

3.5.2 Зависимость от расстояния до анодной проволоки

Для изучения влияния расстояния от анода до трека на вероятность получения сигнала, приводящего к насыщению предусилителя, были получены значения ионизационных потерь, приводящих к пятидесяти процентам вероятности сигнала, превышающего 800 милливольт. Эти данные предоставлены на рис. 3.11. На рисунке видно, что для 25 нс порог насыщения наступает позже, при этом для 150 нс и 200 нс существенная разница отсутствует.

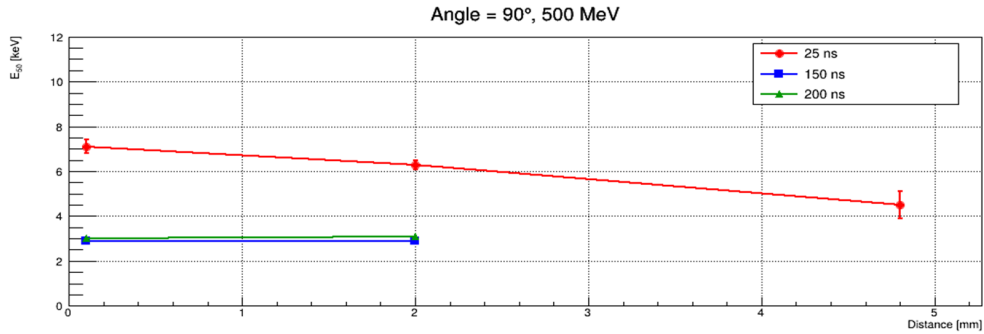


Рис. 3.11: Зависимость вероятности насыщения на 50 % от расстояния до анодной проволоки.

3.6 Параметризация сигнала в SPDroot

С учётом результатов, полученных при изучении вышеприведённых зависимостей, была получена параметризация амплитуд сигналов и их флуктуаций как функции потери энергии и расстояния между анодом и треком. Описание процесса параметризации и моделирование в SPDroot приведены в Physics & MC [8]. Представленная параметризация получена для peaking time 25 наносекунд.

3.6.1 Связь между E_{loss} и амплитудой

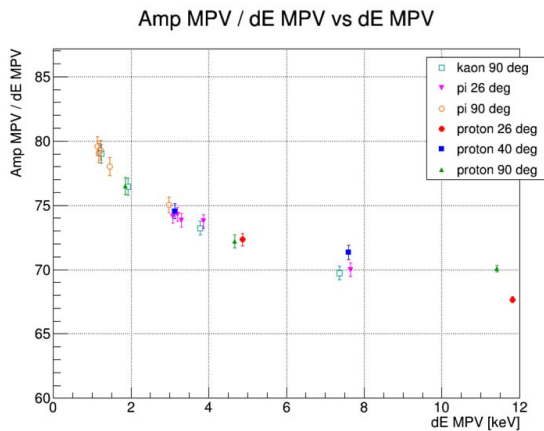


Рис. 3.12: Зависимость отношения MPV амплитуды к MPV ионизационных потерь от MPV dE для трех типов частиц с разными углами при расстоянии от анодной проволоки 0.1 мм [8]

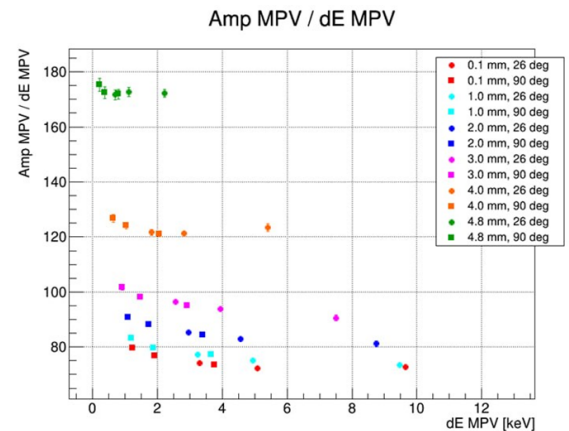


Рис. 3.13: Зависимость отношения MPV амплитуды к MPV ионизационных потерь от MPV dE для каонов [8]

Коэффициент перехода от энергетических потерь к амплитуде сигнала был получен при обработке всего набора сигналов для частиц определённого типа, импульса и угла наклона трека. Полученная зависимость показана на рис. 3.12 и рис. 3.13.

Коэффициент перехода обладает следующими свойствами:

- является нелинейным;
- не зависит от типа частицы;
- не зависит от угла пролёта;
- зависит от расстояния до анода.

3.6.2 Флуктуации сигнала

Рис. 3.14 и рис. 3.15. показывают зависимость отношения относительной ширины распределения амплитуды к относительной ширине распределения ионизационных потерь от MPV dE.

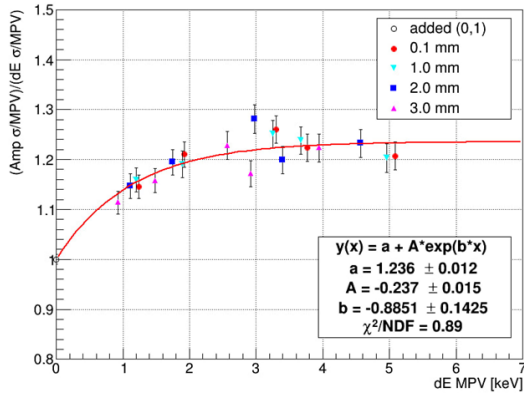


Рис. 3.14: Зависимость отношения относительной ширины распределения амплитуды к относительной ширине распределения ионизационных потерь от MPV dE при различных расстояниях от анода [8]

Установлено, что:

разброс увеличивается с ростом dE ;

зависимость от расстояния, типа частицы и угла является слабой.

Это позволяет упростить параметризацию при моделировании.

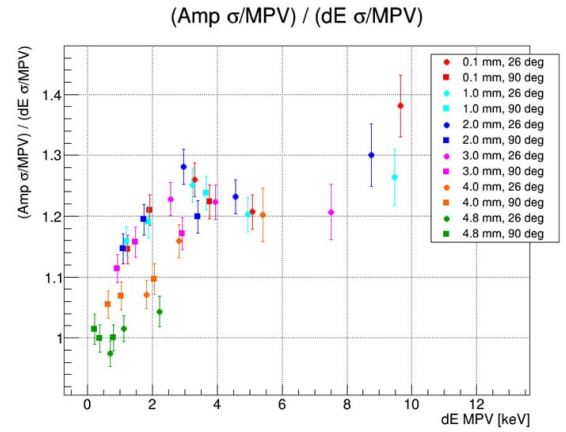


Рис. 3.15: Зависимость отношения относительной ширины распределения амплитуды к относительной ширине распределения ионизационных потерь от MPV dE для каонов [8]

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*.

Полученные количественные данные о зависимостях амплитуды и вероятности насыщения предусилителя от dE , R и *peaking time* предоставляют основу для построения параметризованной модели отклика трубки. Эта модель, после внедрения в *SPDroot*, позволит корректно моделировать PID в *Straw* трекере при реальных параметрах считывающей электроники. 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.
- [8] <https://indico.jinr.ru/event/6148/>