

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 531.3, 539.1.05

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

Студент	_____ А. И. Гурова
Научный руководитель, доктор PhD	_____ Е. С. Мухамеджанов
Научный соруководитель, к.ф.-м.н.	_____ Е. В. Кузнецова
Научный соруководитель, к.ф.-м.н.	_____ Т. Л. Еник
Научный консультант, м.н.с. НИЦ КИ ПИЯФ	_____ С. А. Буланова

Москва 2026

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

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

Студент	_____ А. И. Гурова
Научный руководитель, доктор PhD	_____ Е. С. Мухамеджанов
Научный соруководитель, к.ф.-м.н.	_____ Е. В. Кузнецова
Научный соруководитель, к.ф.-м.н.	_____ Т. Л. Еник
Научный консультант, м.н.с. НИЦ КИ ПИЯФ	_____ С. А. Буланова
Рецензент, к.ф.-м.н., доц.	_____ И. О. Фамилия
Секретарь ГЭК, к.ф.-м.н.	_____ А. А. Кириллов
Зав. каф. №40, д.ф.-м.н., проф.	_____ М. Д. Скорохватов

ОГЛАВЛЕНИЕ

1	Введение	4
2	Физические принципы работы straw-трубок и их применение в современных экспериментах	6
2.1	Прохождение заряженных частиц через вещество газового детектора	6
2.2	Дрейф и подвижность ионных компонентов	7
2.3	Критерии подбора рабочего газа	7
2.4	Принцип работы straw-трубок	8
2.5	Технология производства straw-трубок	9
2.5.1	Устройство и принцип работы сварочной установки	10
2.5.2	Оценка эффективности технологии	11
2.6	Применение straw-трубок в различных экспериментах	12
2.6.1	Эксперимент SPD (NICA)	12
2.6.2	Эксперимент NA62	14
2.6.3	Эксперимент DUNE	14
2.6.4	Вывод о востребованности straw-детекторов	15
3	Методология и инструменты моделирования	16
3.1	Стандартная параметризация отклика в SPDroot и её ограничения	16
3.2	Моделирование физических процессов в газе: Garfield++	17
3.2.1	Возможности Garfield++	18
3.3	Моделирование электронного тракта: архитектура и SPICE	18
3.3.1	Архитектура канала считывания	18
3.3.2	Компромисс параметров для трекинга и PID	19
3.3.3	Моделирование в LTSpice	19

4	Моделирование сигналов straw-трубки	21
4.1	Параметры моделирования straw-трубок	21
4.2	Изучение временного разрешения straw-трубки	21
4.3	Исследование зарядового разрешения	23
4.3.1	Измерение ионизационных потерь для идентификации частиц (PID)	23
4.3.2	Исследование влияния параметров электроники на измерение ионизационных потерь	24
4.3.3	Влияние на точность идентификации частиц	28
4.4	Сравнение сигналов при фиксированных dE для разных импульсов	28
4.5	Двумерное распределение амплитуды и dE	30
4.6	Вероятность насыщения предусилителя	31
4.6.1	Зависимость от времени формирования сигнала	32
4.6.2	Зависимость от расстояния до анодной проволоки	32
5	Влияние параметров считывающей электроники на PID и параметризация	34
5.1	Параметризация сигнала в SPDroot	34
5.1.1	Связь между E_{loss} и амплитудой	35
5.1.2	Флуктуации сигнала	35
	Заключение	37
	Литература	40

1 ВВЕДЕНИЕ

В эксперименте SPD (Spin Physics Detector) на коллайдере NICA в ОИЯИ для регистрации траекторий заряженных частиц применяются тонкостенные дрейфовые трубки (straw-трубки). На их основе создан трекер, который служит ключевым средством для определения 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

По радиусу кривизны трека частицы в магнитном поле восстанавливается импульс частицы, для идентификации частиц используется величина ионизационных потерь, dE , в straw-трубках. Для корректного восстановления dE по амплитуде сигнала необходимо детально понимать, как ионизационные потери преобразуются в регистрируемый отклик. Полная симуляция этого процесса включает расчёт образования первичных электрон-ионных пар вдоль трека, их дрейфа к анодной проволоке, лавинного умножения и индукции заряда на электродах с последующей обработкой сигнала в считывающей электронике. Ключевая проблема при создании реалистичного программного обеспечения для SPD связана с большим количеством каналов регистрации — трекер включает порядка 20 000 straw-элементов. Учёт процесса лавинного умножения заряда для каждого такого канала делает детальную симуляцию чрезвычайно затратной по времени. В качестве эффективной альтернативы выступает метод параметризации, где свойства выходного сигнала привязываются к пространственным координатам пролетевшей частицы, что позволяет имитировать поведение детектора без тяжёлых вычислений.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является создание параметризации, адекватно описывающей сигнал straw-трубки. Для достижения цели используется комплексный подход. Сначала в пакете Garfield++ [1] по методу Монте-Карло рассчитываются ионизационные процессы и процессы лавинного усиления, после чего полученный токовый сигнал обрабатывается в виртуальной электронной схеме LTSpice [2]. На выходе этой связки мы получаем два различных типа данных, каждый из которых важен для своей физической задачи.

В случае трекинга, где координата частицы находится по времени дрейфа электронов, информативным параметром является момент регистрации сигнала дискриминатором. А когда целью является идентификация типа частицы, такой величиной является амплитуда сигнала, соответствующая заряду, индуцированному на электродах трубки.

Следовательно, построение достоверной параметризации для straw-трекера предполагает детальный анализ совокупности времени регистрации сигналов в straw-трубках. При этом необходимо учитывать широкий круг факторов, включая тип и импульс частицы, угловую ориентацию её трека, конфигурацию магнитного поля, схемотехнические решения и настройки считывающей электроники.

2 ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ STRAW-ТРУБОК И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СОВРЕМЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Газоразрядные детекторы — это устройства, внутри которых находятся электроды, а рабочий объём заполнен газом. На практике часто применяют смеси на основе аргона с небольшой добавкой другого газа (например, CO_2 или CH_4). Когда через рабочее вещество пролетает заряженная частица, она вызывает ионизацию газа. Образовавшиеся свободные электроны и ионы создают сигнал на электродах, который затем преобразуется, оцифровывается и сохраняется для последующей обработки. В ряде конструкций детекторов количество первичного заряда может дополнительно возрастать за счёт эффекта газового умножения. [3]

2.1 ПРОХОЖДЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО ГАЗОВОГО ДЕТЕКТОРА

При взаимодействии налетающей заряженной частицы с атомами газа возможны два типа электромагнитных явлений: ионизация и возбуждение. Рассмотрим атом газа X , с которым сталкивается частица p . Если переданная энергия превышает потенциал ионизации атома X , то электрон покидает атом, превращая его в положительный ион. Так возникает электрон-ионная пара.

Вероятность ионизации (сечение) определяется типом газа и энергией частицы; для аргона её типичное значение составляет $O(10^{-16})$ см². Пары «ион–электрон», родившиеся непосредственно в результате прямого удара частицы об атом, называют первичными.

2.2 ДРЕЙФ И ПОДВИЖНОСТЬ ИОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

При наложении электрического поля освобожденные носители заряда начинают упорядоченно перемещаться вдоль силовых линий: лёгкие электроны дрейфуют к положительно заряженному аноду, а тяжёлые положительные ионы — к отрицательному катоду. На своём пути они испытывают соударения с молекулами рабочего газа, что ограничивает их среднюю скорость дрейфа.

2.3 КРИТЕРИИ ПОДБОРА РАБОЧЕГО ГАЗА

Выбор состава газовой смеси для ионизационного детектора диктуется несколькими требованиями:

- 1) Относительно низкое значение рабочего напряжения,
- 2) Способность обеспечивать высокий коэффициент газового усиления,
- 3) Хорошая пропорциональность отклика и малое время нарастания сигнала,
- 4) Стабильность характеристик во времени и низкая склонность к образованию стримеров и искр.

Для выполнения этих условий обычно применяют не чистые газы, а их смеси. Наиболее низким рабочим напряжением, при котором стартует лавина, обладают инертные газы. Аргон широко распространён и характеризуется высокой удельной ионизацией (числом ионизаций на единицу пробега частицы). Однако использование чистого аргона при относительно высоких коэффициентах усиления (порядка $10^3 - 10^4$) невозможно из-за высокой вероятности искровых пробоев. Причина — относительно высокая энергия возбуждения аргона: возбуждённые атомы создают фотоны высокой энергии, которые выбивают электроны из катода, порождая вторичные лавины.

Добавление многоатомного газа (метана, паров этанола, CO_2 или CH_4) позволяет подавить эти нежелательные эффекты. Сложные молекулы эффективно поглощают фотоны, рассеивая полученную энергию в упругих

столкновениях. Даже небольшая примесь многоатомного газа кардинально меняет поведение: самопроизвольные разряды исчезают даже при газовом усилении до 10^6 . В качестве гасящих добавок (квенчеров) также популярны изобутан и углекислый газ [4].

2.4 ПРИНЦИП РАБОТЫ STRAW-ТРУБОК

В физике высоких энергий нашли широкое применение straw-трубки — цилиндрические газовые детекторы, функционирующие в пропорциональном режиме. Внутренняя поверхность тонкой полиэтилентерефталатной (ПЭТ) трубки покрыта тончайшим слоем золота или алюминия и служит катодом. Толщина стенок обычно составляет несколько десятков микрон. Вдоль оси трубки натянута тонкая (20–35 мкм) проволока, которая является анодом. Такая конструкция обеспечивает высокое быстродействие благодаря малому диаметру и подходит для создания трекеров большой площади. Ультратонкие стенки минимизируют эффекты многократного рассеяния пролетающих частиц.

Координата частицы, пересекающей дрейфовую трубку, определяется путём измерения времени дрейфа электронов, рожденных при ионизации газа. Пролетевшая заряженная частица ионизирует газовую смесь, оставляя за собой трек, состоящий из положительных ионов и электронов. Электроны дрейфуют к центральной проволоке и в зоне сильного поля у её поверхности инициируют лавину. Положительные ионы движутся к стенкам трубки. В процессе движения носителей на электродах возникает индуцированный сигнал. Как правило, сигнал снимают с анода. После усиления предусилителем сигнал сравнивается с заданным порогом. Момент превышения порога фиксируется время-цифровым преобразователем (Time Digital Converter, TDC), и результат передаётся в систему сбора данных [5].

Поскольку трубка эксплуатируется в пропорциональном режиме, полный заряд Q_{tot} , индуцированный на электроде, пропорционален числу ионизационных кластеров N_i , которые, в свою очередь, пропорциональны по-

терям энергии налетающей частицы:

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

Считывающая электроника интегрирует заряд в течение конечного временного интервала, называемого *peaking time*. Эта величина определяется конкретной моделью предусилителя и формирователя.

К материалам, геометрии трубок и считывающей электронике предъявляется ряд жёстких требований. Это обусловлено как необходимостью радиационной стойкости, так и особенностями формирования сигнала. В частности, критически важна симметрия: проволока должна быть натянута строго по оси, иначе калибровочная зависимость времени дрейфа от координаты трека нарушится.

2.5 ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА STRAW-ТРУБОК

Длительное время доминирующей технологией производства straw-трубок являлась технология намотки с использованием клеевого соединения. Данный метод заключается в формировании трубки из двух полосок тонкой полимерной плёнки (например, каптон или майлар), одна из которых имеет проводящий слой, а другая — клеевой слой. Две полоски наматываются и склеиваются между собой.

В процессе эксплуатации был выявлен ряд фундаментальных недостатков клеевых трубок: поглощение влаги из воздуха клеевым швом и материалом плёнки, приводящее к деформации геометрии трубки; снижение диапазона упругой деформации из-за наличия клея, что требует введения дополнительных усиливающих элементов; сложность обеспечения долговременной герметичности клеевого шва.

Для устранения указанных ограничений была разработана технология ультразвуковой сварки (УЗС) straw-трубок. В отличие от намотки, данная технология позволяет формировать трубку из одной полоски металлизированной полимерной плёнки (как правило, майлар) с продольным сварным швом, получаемым без использования клея.

2.5.1 УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ СВАРОЧНОЙ УСТАНОВКИ

Сварочная система создана на базе промышленного ультразвукового аппарата, который был существенно доработан. Ключевые узлы собственной разработки включают специализированный **соноотрод** и **прецизионные механизмы формирования ленты** [6]. Схема установки представлена на рисунке 2.1.

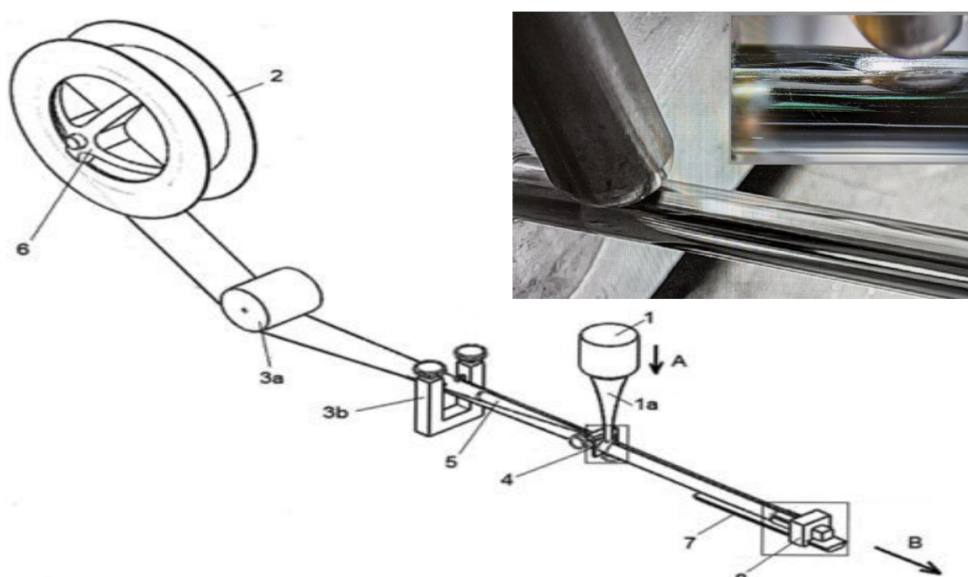


Рисунок 2.1 — Схема установки ультразвуковой сварки стримерных трубок [6]

Основными элементами установки являются (нумерация соответствует рисунку 2.1):

- 1) **Ультразвуковой преобразователь** (1) — генерирует механические колебания на ультразвуковой частоте.
- 2) **Соноотрод со сферической рабочей поверхностью** (1а) — передаёт колебания в зону сварки.
- 3) **Катушка с лентой** (2) — служит для подачи исходного материала.
- 4) **Ролик** (3а) и **регулируемый U-образный регулятор** (3б) — приподнимают края ленты для формирования стабильного нахлёста.
- 5) **Кольцевая фильера** (4) — формирует плоскую ленту в трубку.
- 6) **Цилиндрическая оправка** (5) — вокруг неё формируется трубка.
- 7) **Регулируемый натяжитель** (6) — обеспечивает контролируемое

натяжение ленты.

- 8) **Направляющая** (7) — служит для перемещения каретки.
- 9) **Вытяжная каретка** (8) — фиксирует конец готовой трубки.
- 10) **Сопло** (9) — служит для подачи газа внутрь формируемой трубки к месту сварки.

Принцип работы установки. Катушка подачи ленты (2), регулируемый натяжитель (6), U-образный регулятор (3b), оправка (5), фильера (4) и сонотрод (1a) выровнены с помощью лазера вдоль оси вытягивания ленты. Фильера (4) точно отрегулирована относительно оправки (5) таким образом, что лента касается оправки только в точке сварки, в то время как сжатый газ подаётся в сваренную часть трубки.

Натянутая лента, протягиваемая натяжителем и вытяжной кареткой (8), проходит между оправкой (5) и сонотродом (1a). В месте, где лента формируется в трубку, происходит ультразвуковая сварка: механические колебания ультразвуковой частоты передаются через сонотрод на перекрывающиеся края ленты, вызывая локальный нагрев и расплавление материала с последующим образованием прочного сварного соединения. Подача газа через сопло (9) в готовую часть трубки предотвращает её схлопывание в процессе сварки и обеспечивает продувку зоны сварки.

2.5.2 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ

Таким образом, технология ультразвуковой сварки straw-трубок обладает следующими ключевыми преимуществами:

- отсутствие клеевого соединения и связанных с ним недостатков (гигроскопичность, снижение упругости, нестабильность со временем);
- возможность использования одной полосы плёнки вместо двух;
- высокая механическая прочность и герметичность сварного шва;
- минимальная ширина шва, обеспечивающая гладкость внутренней поверхности;
- пригодность для массового производства длинномерных трубок (более 2 м);
- возможность изготовления трубок из сверхтонких плёнок (до 20 мкм)

как с односторонней, так и с двусторонней металлизацией (при использовании лазерной предобработки);

- комплексный многоступенчатый контроль качества (визуальный, механические испытания, кратковременные и долговременные испытания давлением), гарантирующий длительный срок службы.

Разработанная технология представляет собой промышленно реализуемый метод производства straw-трубок, пригодный для создания крупномасштабных трекерных систем.

2.6 ПРИМЕНЕНИЕ STRAW-ТРУБОК В РАЗЛИЧНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Технология straw-трубок является универсальным инструментом, применяемым в разнообразных экспериментах — от компактного вакуумного спектрометра в NA62 до центрального трекера в коллайдерном детекторе SPD (NICA) и мегамасштабной системы SAND для нейтринного эксперимента DUNE.

2.6.1 ЭКСПЕРИМЕНТ SPD (NICA)

Трекер на основе straw-трубок является центральной подсистемой детектора SPD, предназначенного для изучения спиновой структуры нуклонов и поляризационных явлений в столкновениях протонов и дейтронов [7]. Задача straw-трубок — измерение импульсов и идентификация частиц (PID). В настоящее время установка находится на стадии активной разработки и будет введена в эксплуатацию в два этапа.

SPD представляет собой универсальный детектор, объединяющий множество подсистем. Это позволяет регистрировать полный набор характеристик частиц, рождающихся при столкновении пучков. Структурные схемы конфигурации детектора для каждого из двух этапов представлены на рисунках 2.2 и 2.3.

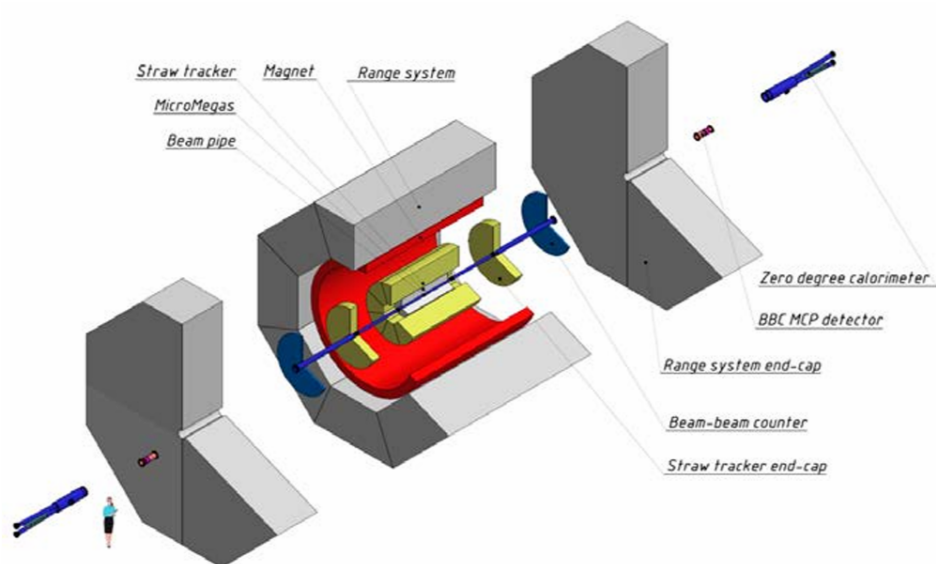


Рисунок 2.2 — Схематическое изображение установки эксперимента SPD Stage 1.

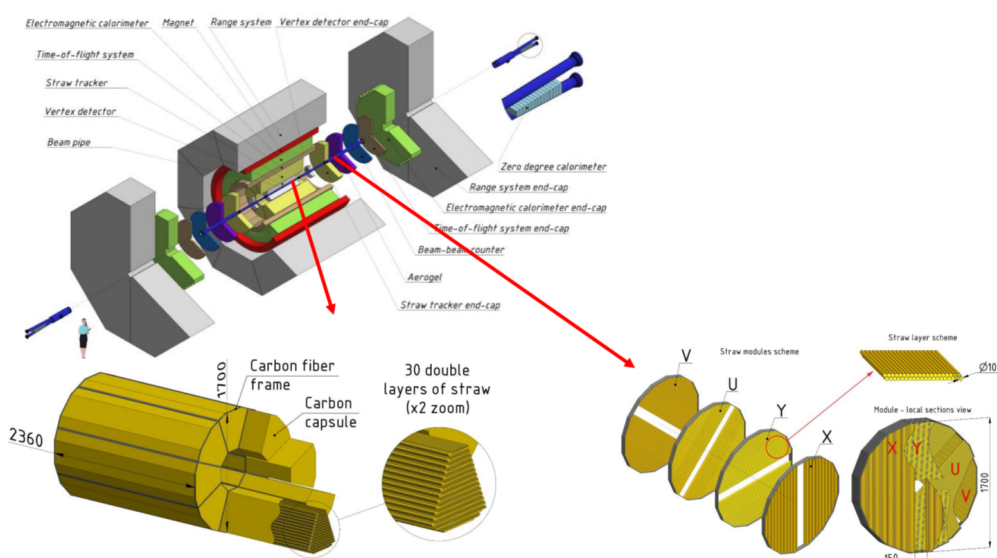


Рисунок 2.3 — Схематическое изображение установки эксперимента SPD Stage 2.

Ключевые особенности straw-трекера SPD — это масштабная система из порядка двадцати тысяч straw-трубок, баррельная часть (8 модулей, до 30 двойных слоёв с ориентацией Z, U, V) и торцевые части (12 двойных слоёв X, Y, U, V), которые обеспечивают трёхмерную реконструкцию треков в большом телесном угле. Диаметр трубки 10 мм, ожидаемое пространственное разрешение около 150 мкм, и при этом трекер работает в сложных условиях: магнитное поле, широкий диапазон углов входа частиц, высокая нагрузка ($\gtrsim 100$ кГц на трубку для Stage 2) [8]. Для моделирования фи-

зических процессов эксперимента SPD необходима реалистичная параметризация, учитывающая все эти факторы, чтобы заменить вычислительно неподъёмное детальное моделирование каждой частицы в каждой трубке методом Монте-Карло.

2.6.2 ЭКСПЕРИМЕНТ NA62

Эксперимент NA62 (ЦЕРН) предназначен для изучения ультраредких распадов заряженных каонов, в частности канала $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$. Для реконструкции импульсов вторичных частиц с высочайшей точностью в условиях интенсивного пучка используется спектрометр на основе straw-трубок, работающий непосредственно в вакуумной области распада [9].

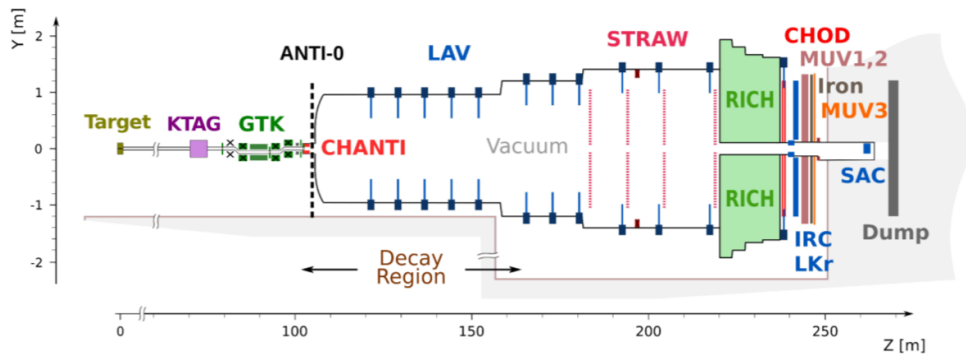


Рисунок 2.4 — Схематическое изображение установки эксперимента NA62.

Ключевые особенности straw-спектрометра NA62 (рисунок 2.4) : система состоит из 4 камер, содержащих в сумме 7168 straw-трубок диаметром 9.8 мм, изготовленных из тонкой (36 мкм) ПЭТ-плёнки с двухслойным металлическим покрытием (50 нм Cu + 20 нм Au). Анод — вольфрамовая проволока 30 мкм, рабочая смесь — Ar/CO (70:30) [8]. Спектрометр оптимизирован для работы в вакууме с минимальным материальным бюджетом. Каждая частица оставляет в среднем около 30 хитов. Максимальное время дрейфа 150 нс, временное разрешение по переднему фронту достигает 3–4 нс, что обеспечивает высокое пространственное разрешение.

2.6.3 ЭКСПЕРИМЕНТ DUNE

В рамках нейтринного эксперимента DUNE (Фермилаб) технология straw-трубок используется в системе SAND (System for on-Axis Neutrino

Detection). Ключевой компонент SAND (рисунок 2.5) — мощный трекер на straw-трубках (STT), который станет одним из самых масштабных проектов в области газовых детекторов [10].

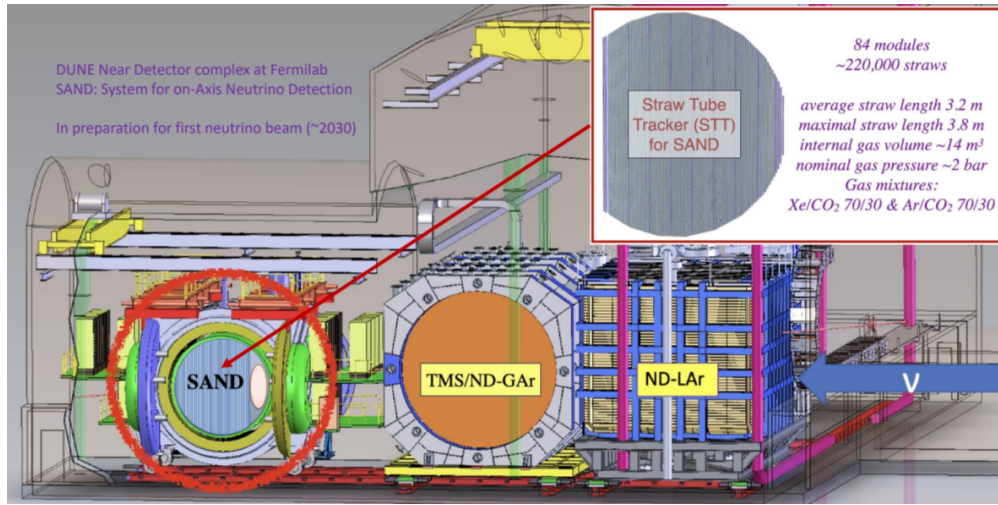


Рисунок 2.5 — Схематическое изображение установки эксперимента DUNE (система SAND).

Система будет состоять из 84 модулей, содержащих около 220 000 straw-трубок длиной до 3.8 м, работающих при избыточном давлении 2 бар. Планируется использование газовых смесей Xe/CO₂ (70/30) или Ar/CO₂ (70/30) [8]. STT обеспечит прецизионную реконструкцию треков вторичных частиц от взаимодействий нейтрино, что необходимо для измерения энергетического спектра и флаворного состава нейтринного пучка.

2.6.4 ВЫВОД О ВОСТРЕБОВАННОСТИ STRAW-ДЕТЕКТОРОВ

Представленный обзор демонстрирует эволюцию и востребованность технологии straw-детекторов: от прецизионного спектрометра в вакууме (NA62) и центрального трекера в коллайдерном эксперименте (SPD) до мегамасштабных инженерных систем в нейтринных проектах (DUNE). Данная технология привлекательна благодаря уникальному сочетанию малого материального бюджета, высокого быстродействия и возможности создания крупномасштабных трекерных систем с большим количеством каналов.

3 МЕТОДОЛОГИЯ И ИНСТРУМЕНТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1 СТАНДАРТНАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ОТКЛИКА В SPDROOT И ЕЁ ОГРАНИЧЕНИЯ

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} .

В программном пакете SPDroot ионизационные потери E_{loss} преобразуются в отклик детектора простым гауссовским размытием с постоянной относительной шириной 20%:

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

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

Этот подход использовался в Technical Design Report (TDR) [5] для первичной оценки эффективности идентификации частиц (PID). Однако он имеет ряд ограничений, которые будут продемонстрированы в Главе 4 на основе детального моделирования в Garfield++/LTSpice:

- 1) Не учитывается зависимость сигнала от расстояния трека до анода R .
- 2) Не учитывается влияние времени интегрирования τ_p (peaking time).
- 3) Не моделируется насыщение предусилителя при больших амплитуд-

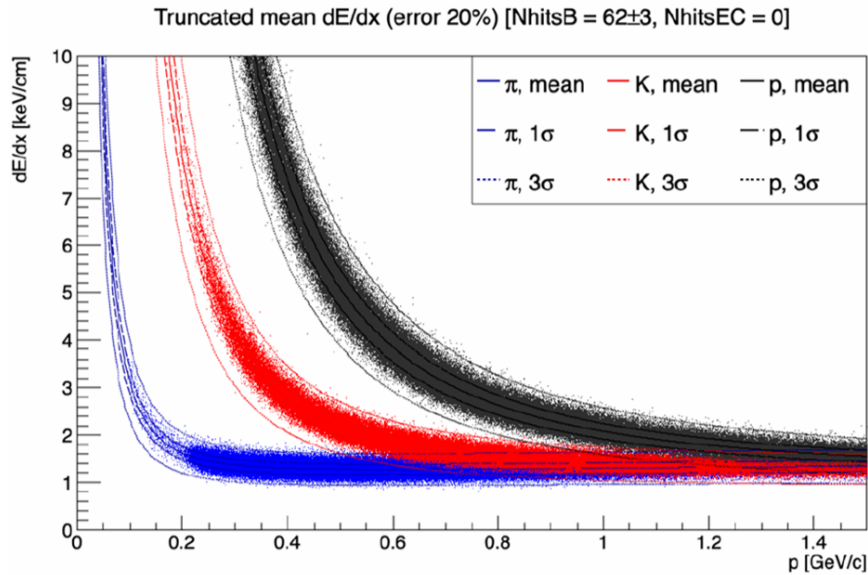


Рисунок 3.1 — Зависимость ионизационных потерь от импульса частицы, полученная с использованием стандартной параметризации.

дах.

4) Игнорируется кластерная структура ионизации.

В Главе 4 будет показано, как эти факторы влияют на реальный отклик straw-трубки, а в Главе 5 на основе полученных результатов предлагается новая параметризация, устраняющая указанные недостатки.

Однако прямое детальное моделирование процессов ионизации, дрейфа, усиления и формирования сигнала для сотен тысяч трубок и миллиардов частиц является вычислительно невозможной задачей. Это создаёт острую необходимость в «интеллектуальном» сокращении вычислительной сложности.

3.2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗЕ: GARFIELD++

Garfield++ — объектно-ориентированная программа для симуляции 2D и 3D газоразрядных детекторов [1]. Изначально программа была написана на FORTRAN для дрейфовых камер и многопроволочных счётчиков. Для 3D-конфигураций Garfield++ взаимодействует с программой *neBEM* или использует карты полей из ANSYS, Maxwell, QuickField.

В Garfield++ встроен пакет *Magboltz* для расчёта переноса электро-

нов в газовых смесях и интерфейс с *Heed* для моделирования ионизации.

3.2.1 ВОЗМОЖНОСТИ GARFIELD++

- Расчёт карт полей, провисание анодной проволоки, оптимальные потенциалы.
- Визуализация дрейфовых линий и треков электронов.
- Таблицы времени дрейфа и распределения времени развития сигнала.
- Расчёт сигналов, индуцированных заряженными частицами, с учётом электронной и ионной компонент.

Все классы визуализации интегрированы с фреймворком ROOT (CERN).

3.3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАКТА: АРХИТЕКТУРА И SPICE

Сигнал с анода необходимо усилить, сформировать и оцифровать. Эти функции выполняет считывающая электроника на базе специализированных интегральных схем (ASIC). Для анализа работы электроники применяется моделирование в среде LTSpice [2]. Совместное использование Garfield++ и LTSpice позволяет воспроизвести полную цепочку: от ионизации газа до оцифрованной амплитуды и временной метки.

3.3.1 АРХИТЕКТУРА КАНАЛА СЧИТЫВАНИЯ

Типовая блок-схема канала включает (рисунок 3.2):

- 1) **Зарядо-чувствительный усилитель:** Сигнал усиливается с коэффициентом усиления k , размерность которого — [мВ/фКл]. То есть ЗЧУ преобразует заряд (фемтокулоны) в напряжение (милливольты).
- 2) **Формирователь (shaper):** полосовой фильтр, улучшающий отношение сигнал/шум. Ключевой параметр — peaking time τ_p (время от начала сигнала до максимума амплитуды). Амплитуда пропорциональна току, проинтегрированному за τ_p . Величина τ_p обратно пропорциональна полосе пропускания.

- 3) **Пиковый детектор и АЦП:** измеряют максимальную амплитуду.
- 4) **Дискриминатор и TDC:** при превышении порога формируют цифровой импульс; TDC измеряет временной интервал.

В реальной ASIC содержатся десятки или сотни таких каналов.

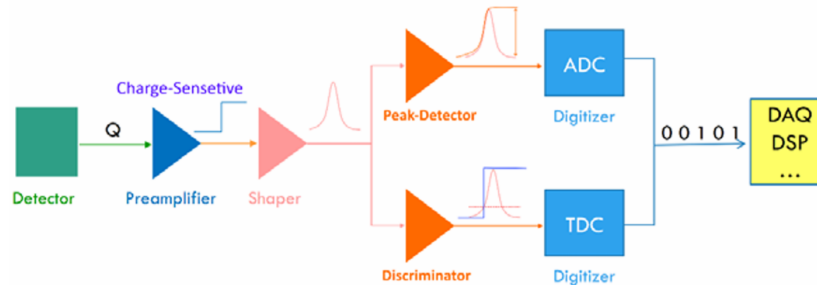


Рисунок 3.2 — Блок-схема классической архитектуры одного канала считывания

3.3.2 КОМПРОМИСС ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ТРЕКИНГА И PID

Задачи трекинга и PID предъявляют противоположные требования:

- **Трекинг:** малое τ_p , широкая полоса, высокое усиление (~ 12 мВ/фКл).
- **PID:** большое τ_p (~ 100 нс), узкая полоса, низкое усиление (~ 0.5 мВ/фКл), динамический диапазон до 2000 фКл.

Оптимальным решением является ASIC с двумя формирователями в одном канале. Такой чип будет создан для эксперимента SPD, но в настоящее время еще находится в разработке. В качестве запасного варианта в данной работе рассматривается ASIC VMM3a [11] с различными параметрами.

3.3.3 МОДЕЛИРОВАНИЕ В LTSPICE

LTSpice — программа для симуляции аналоговых схем [2]. На вход подаётся токовый сигнал $i(t)$ из Garfield++. Строится схема с параметрами VMM3a, на выходе получается напряжение $u(t)$. Пример совместной работы изображен на рисунке 3.3.

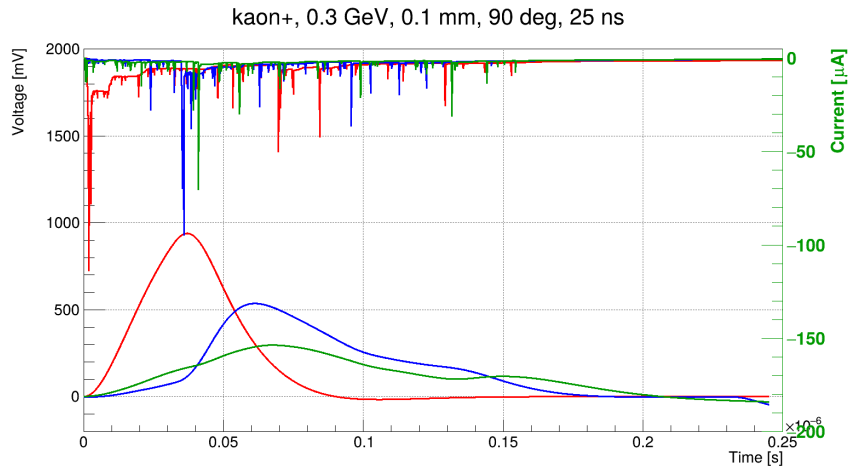


Рисунок 3.3 — Пример работы Garfield++ (верхние графики, измеряемые в микроамперах) и LTSpice (нижние графики, измеряемые в милливольтгах)

Далее показана зависимость от времени формирования: на рисунках 3.4- 3.6 изображены сигналы, которые были смоделированы с помощью Garfield++ и LTSpice с импульсами равными 300 МэВ/с, под углом $\theta = 90^\circ$, на расстоянии $R = 0.1$ мм от анода. С коэффициентом усиления равным 3 мВ/фКл и различными временами формирования: 25 нс, 150 нс и 200 нс. Наблюдаем, что при больших временах формирования (150 нс и 200 нс) существенной разницы между рисунками 3.5 и 3.6 нет.

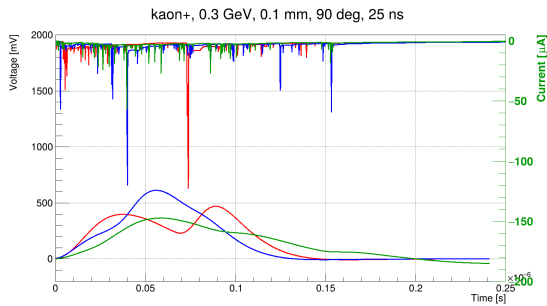


Рисунок 3.4 — 25 нс

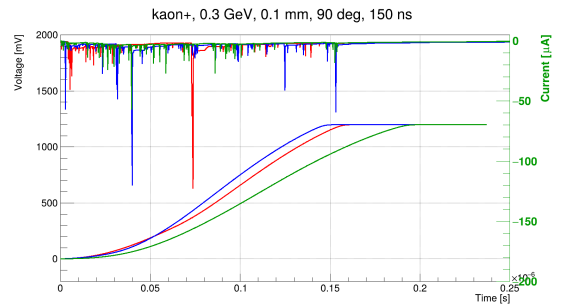


Рисунок 3.5 — 150 нс

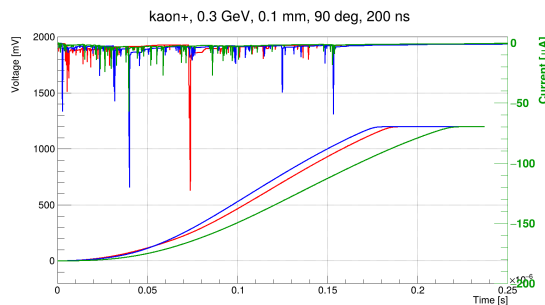


Рисунок 3.6 — 200 нс

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ STRAW-ТРУБКИ

4.1 ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ STRAW-ТРУБОК

Для моделирования 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 °С
- Давление газовой смеси: 1 атм

4.2 ИЗУЧЕНИЕ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ STRAW-ТРУБКИ

С помощью Garfield++ построены дрейфовые линии электронов при $B = 0$ и $B = 2$ Тл, как показано на рисунке 4.1). Видно, что магнитное поле искривляет траектории. Необходимость учета этого эффекта исследовалось ранее [12]. Влияние магнитного поля было определено как эффект второго порядка, и в данной работе магнитное поле не учитывалось.

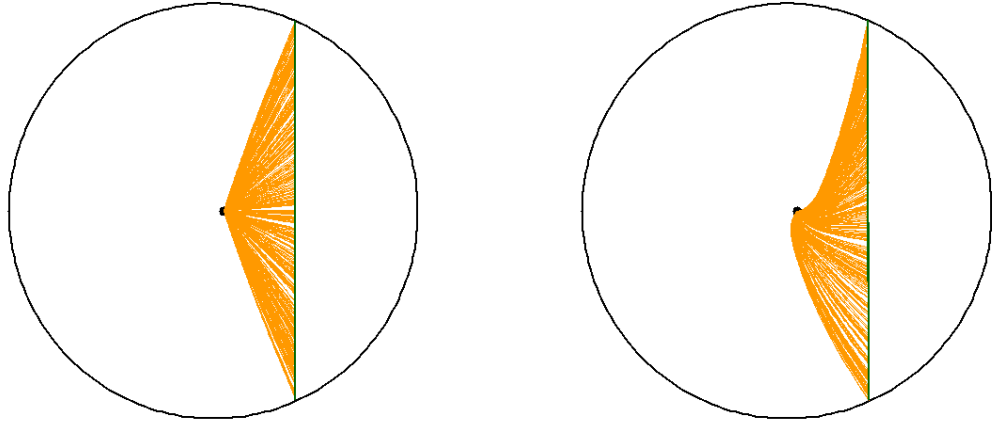


Рисунок 4.1 — Дрейфовые линии электронов: $B = 0$ (слева) и $B = 2$ Тл (справа).

Промоделированы сигналы для мюонов, пересекающих трубку на расстояниях 0.1 мм, 2.0 мм и 4.8 мм от анода (рисунки 4.2- 4.4). С ростом расстояния увеличивается время дрейфа и снижается пиковая амплитуда.

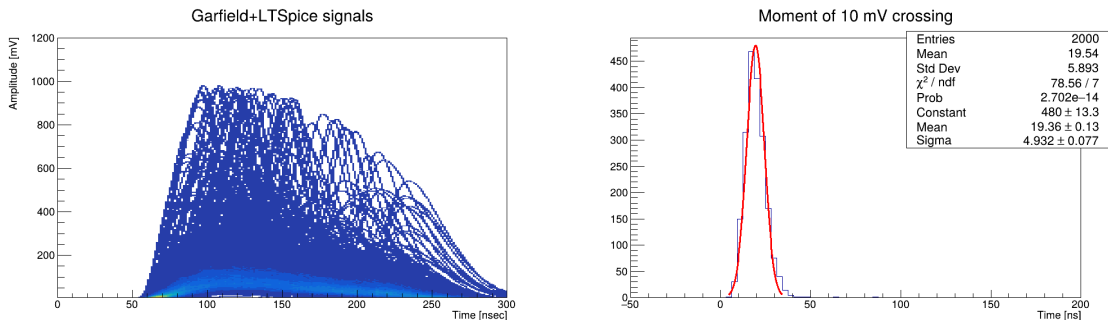


Рисунок 4.2 — Сигналы и распределение времён пересечения порога, $R = 0.1$ мм.

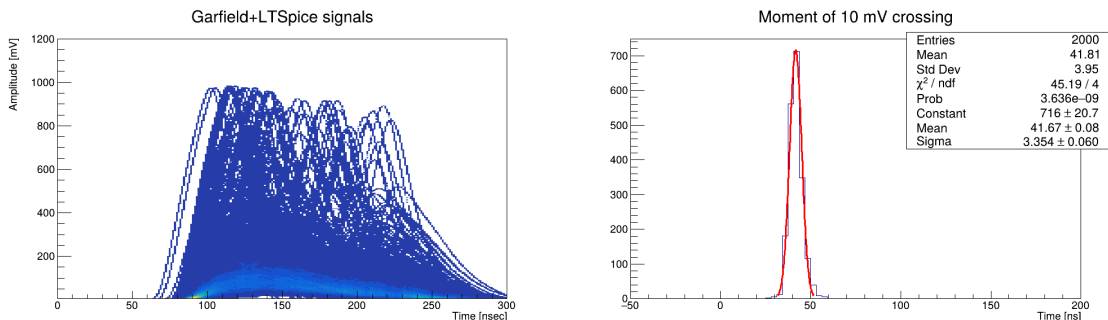


Рисунок 4.3 — Сигналы и распределение времён пересечения порога, $R = 2.0$ мм.

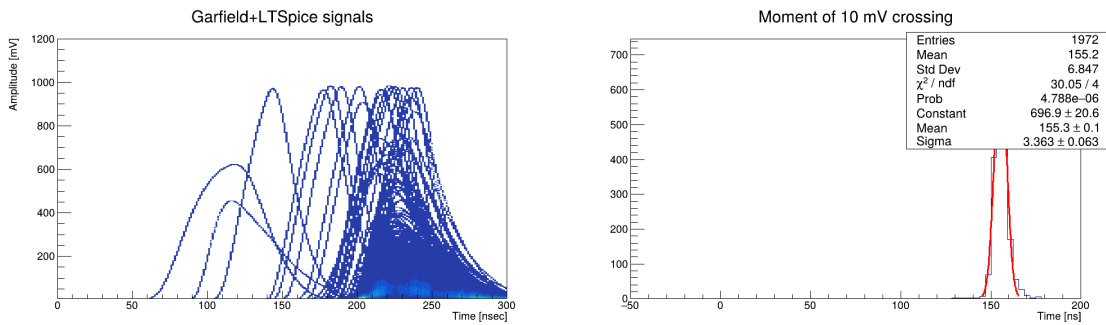


Рисунок 4.4 — Сигналы и распределение времён пересечения порога, $R = 4.8$ мм.

Полученные результаты находятся в согласии с работой, проделанной ранее [12], что говорит о правильной методике выполнения работы.

4.3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРЯДОВОГО РАЗРЕШЕНИЯ

4.3.1 ИЗМЕРЕНИЕ ИОНИЗАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТИЦ (PID)

Измерение ионизационных потерь является основой идентификации частиц (PID). В Garfield++ были построены распределения ионизационных потерь, отфитированные Ландау. Оттуда были получены наиболее вероятные значения (MPV) ионизационных потерь и построен рисунок 4.5. Рисунок 4.5 показывает наиболее вероятные значения ионизационных потерь в единичной трубке в зависимости от импульса для протонов, пионов, мюонов и позитронов (На расстоянии $R = 0.1$ мм от анода, под углом $\theta = 90^\circ$). Из изображения видно, что для малых импульсов можно различать частицы разных типов.

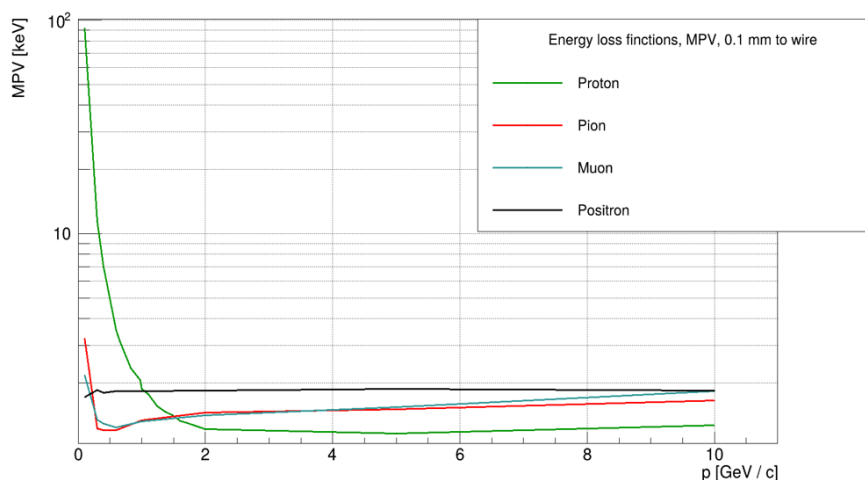


Рисунок 4.5 — Зависимость MPV ионизационных потерь от импульса [13].

4.3.2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОНИКИ НА ИЗМЕРЕНИЕ ИОНИЗАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ

Длительность сигнала

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 лавинного усиления с газовым усилением G образуется *total charge*, среднее значение которого:

$$\langle Q_{\text{tot}} \rangle = \langle Q_{\text{prim}} \rangle \cdot G \quad (4.1)$$

где G - среднее значение газового усиления.

Индукцированный сигнал состоит из двух компонент:

электронной, формируемой движением электронов (характерные времена – десятки-сотни наносекунд);

ионной, обусловленной медленным движением положительных ионов (характерные времена – десятки микросекунды и более).

Чтобы изучить влияние времени интегрирования были получены распре-

деления primary charge и total charge при длительных и малых временах. На рисунке 4.6 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 рисунке 4.7 видно, что:

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

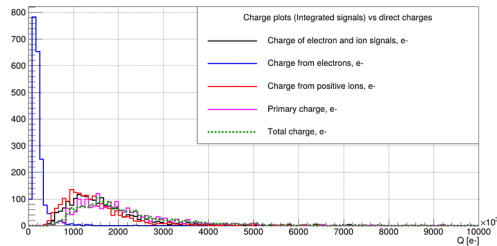


Рисунок 4.6 — Время интегрирования 10 мкс.

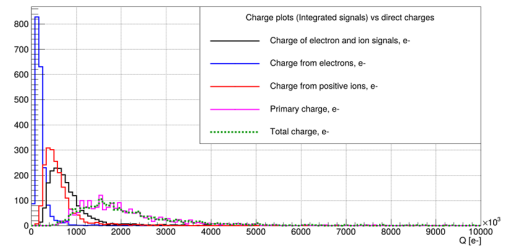


Рисунок 4.7 — Время интегрирования 250 нс.

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

Влияние времени формирования На рисунке 4.8 показаны распределения заряда для пионов с импульсами 1 и 2 ГэВ и для позитронов с импульсом 2 ГэВ, интегрированного в течение 12 наносекунд. Каждое распределение отфитировано Ландау, откуда были получены наиболее вероятное значение (MPV) и ширина распределения (σ).

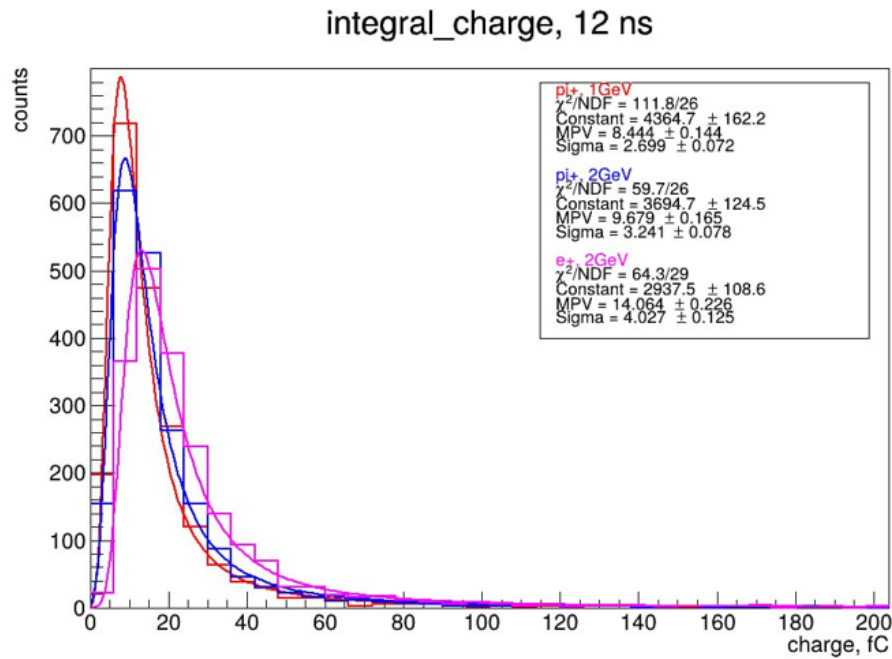


Рисунок 4.8 — Распределения собранного заряда за время интегрирования - 12 нс.

Аналогичные распределения были сделаны при временах интегрирования 25, 50, 220 нс и при бесконечном времени (полный заряд). Далее, из результатов фитирования, были построены относительные ширины распределения (σ/MPV) собранного заряда. Это показано на рисунке 4.9. С уменьшением времени интегрирования относительная ширина распределения σ/MPV увеличивается, что является неприятным последствием для идентификации частиц.

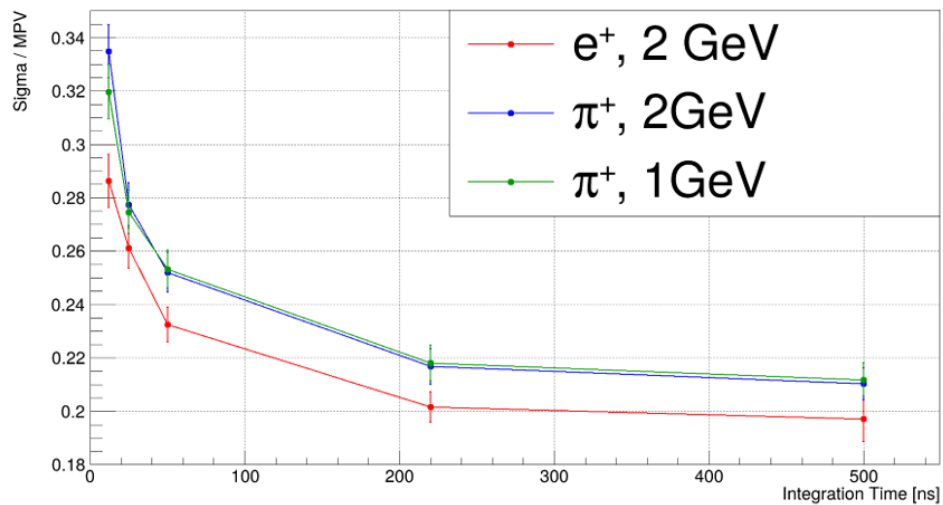


Рисунок 4.9 — Зависимость σ/MPV от времени интегрирования (на 500 нс указан полный заряд) [13].

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

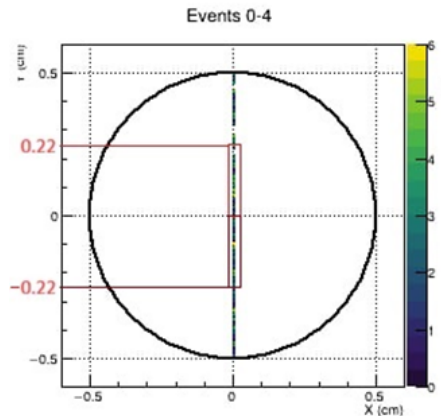


Рисунок 4.10 — Пространственное распределение кластеров

На рис. 4.10 показано распределение кластеров. Для трека, проходящего трубку на расстоянии 0.1 мм от анода (практически центр трубки), 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 это время интегрирования.

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

Вывод о влиянии времени формирования

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).

4.3.3 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 идентификации частиц.

Таким образом, параметры считывающей электроники, в частности 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.

4.4 СРАВНЕНИЕ СИГНАЛОВ ПРИ ФИКСИРОВАННЫХ dE ДЛЯ РАЗНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В Garfield++ были смоделированы протоны с импульсами 500 МэВ/с и 1000 МэВ/с. Выбран узкий интервал потерь 5.0–5.5 кэВ (рисунок 4.11). Для событий из этого интервала в программе LTSpice (с чипом ASIC VMM3a со следующими параметрами: коэффициент усиления – 3 мВ/фКл, peaking time – 25 нс) были построены амплитуды сигналов, как видно из рисунка 4.12. Они различаются, хотя dE одинаковы. Причина — разная кластерная структура событий.

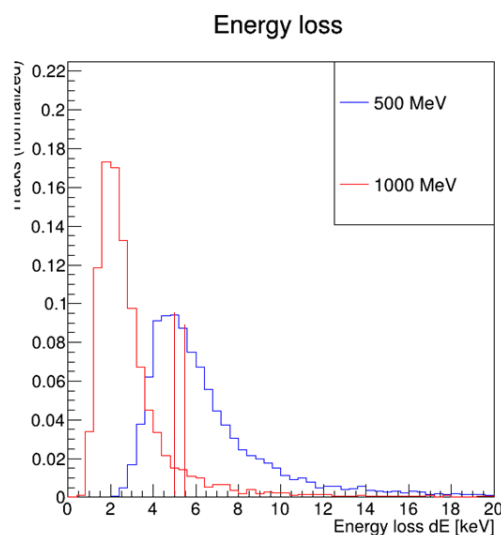


Рисунок 4.11 — Ионизационные потери протонов, выделен интервал 5.0–5.5 кэВ.

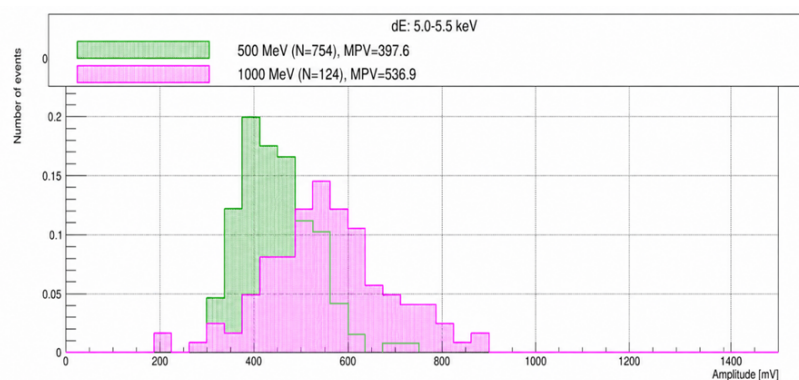


Рисунок 4.12 — Распределения амплитуд при фиксированных dE .

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ

Для изучения влияния кластерной структуры на ионизационные потери в Garfield++ были построены кластерные параметры. Кластер — группа первичных электронов от одного акта ионизации. Построены следующие распределения: среднее число кластеров, средний размер кластера, суммарное число первичных электронов. Эти распределения показаны на рисунке 4.13.

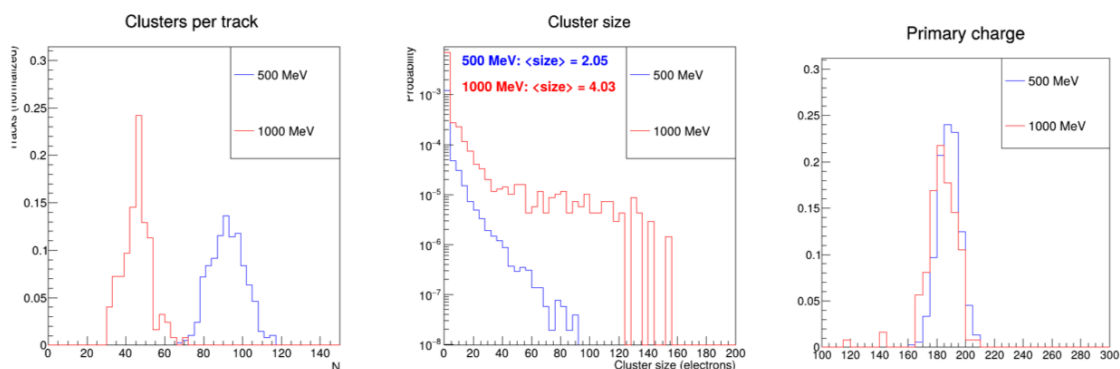


Рисунок 4.13 — Распределения: число кластеров (слева), размер кластера (центр), первичный заряд (справа).

В таблице 4.1 приведено сравнение для протонов с разными импульсами при одинаковых dE .

Таблица 4.1 — Кластерные параметры для протонов при $dE = 5.0\text{--}5.5$ кэВ

Параметр	500 МэВ	1000 МэВ
Число событий	754	124
Среднее число кластеров	91.7	45.1
Средний размер кластера	2.05	4.03
Среднее число первичных электронов	187.6	181.6

Полный первичный заряд почти одинаков (разница в пределах статистики), но кластерная структура разная: при 500 МэВ — много мелких кластеров, при 1000 МэВ — мало крупных. Крупные кластеры дают лавину, сконцентрированную во времени, что приводит к большему числу насыщений при одинаковом полном заряде. Это и объясняет различие отклика электроники для сигналов с одинаковыми ионизационными потерями. Возможно, это следует учитывать, но, поскольку эта величина является эффектом второго порядка, далее в работе при параметризации она не учитывается.

4.5 ДВУМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ И dE

Для каонов с импульсом 1 ГэВ построены 2D-распределения ионизационных потерь с помощью Garfield++ и соответствующих амплитуд сиг-

налов с помощью LTSpice для чипа ASIC VMM3a с коэффициентом усиления 3 мВ/фКл и временами формирования τ_p 200 нс и 25 нс $A = f(dE)$ (рисунок 4.14). Наблюдается насыщение при 1000 мВ, но далее в работе рассматривается порог насыщения в 800 мВ, чтобы учитывать самый неблагоприятный вариант. Зависимость нелинейна. При уменьшении τ_p средняя амплитуда падает, разброс растёт, это связано с тем, что уменьшении τ_p ионная компонента сигнала собирается не полностью, как было показано в секции 4.3.

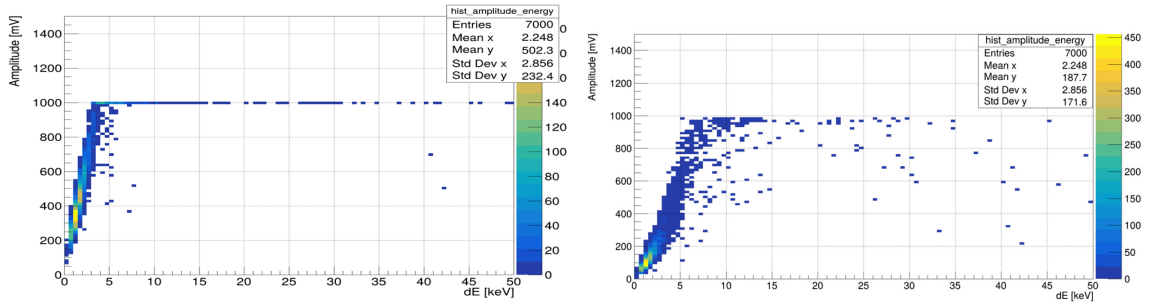


Рисунок 4.14 — $A(dE)$ для каонов: $\tau_p = 200$ нс (слева) и 25 нс (справа).

4.6 ВЕРОЯТНОСТЬ НАСЫЩЕНИЯ ПРЕДУСИЛИТЕЛЯ

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

$$A > A_{\text{sat}}. \quad (4.2)$$

В этом случае информация о реальной величине сигнала теряется.

В данной работе рассматривается порог в 800 мВ.

Вероятность насыщения описывается сигмоидой (логистической функцией):

$$P_{\text{sat}}(dE) = p_0 + \frac{p_1 - p_0}{1 + e^{-p_2 \cdot (dE - p_3)}}, \quad (4.3)$$

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).

4.6.1 ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ВРЕМЕНИ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА

На рисунке 4.15 показана зависимость вероятности насыщения от времени формирования сигнала (25, 150, 200 нс) для каонов с импульсами 300, 500 и 1000 МэВ/с. Видно, что для 25 нс не наступает 100%-ая вероятность насыщения. Это может быть связано с тем, что за малое время формирования информация о сигнале собирается не полностью и вклад больших кластеров, которые и вызывают насыщение, учитывается не полностью.

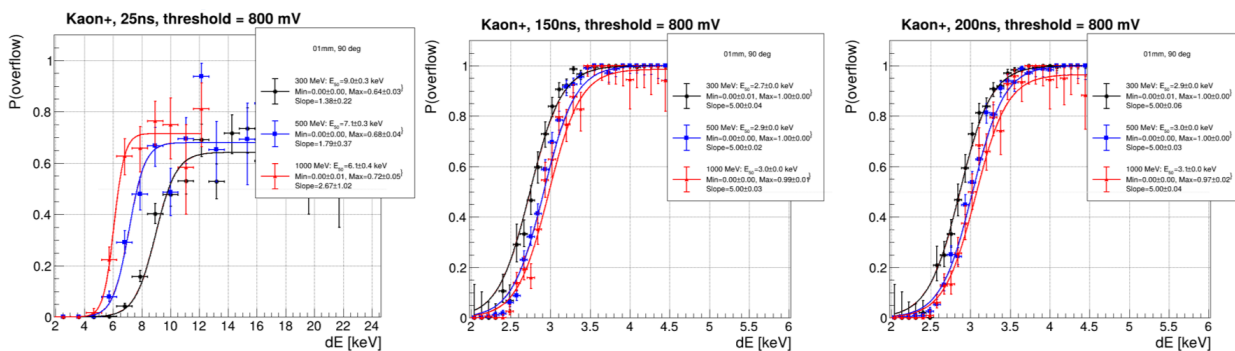


Рисунок 4.15 — Зависимость вероятности насыщения от времени формирования сигнала.

4.6.2 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 рисунке 4.16. Видно, что для 25 нс порог насыщения наступает позже, при этом для 150 нс и 200 нс существенная разница отсутствует.

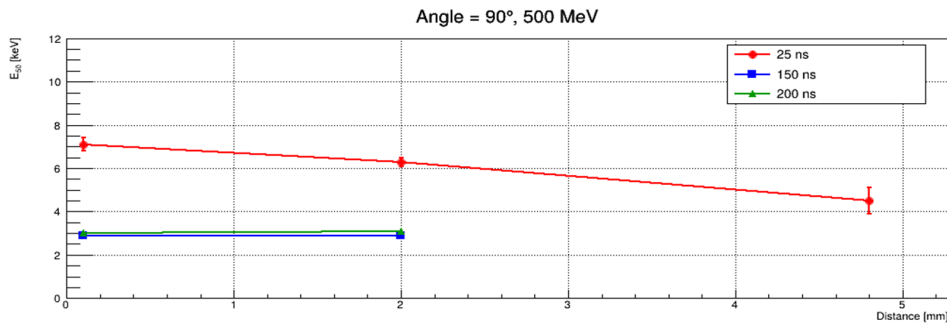


Рисунок 4.16 — Зависимость вероятности насыщения на 50 % от расстояния до анодной проволоки.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

Проведённое моделирование выявило следующие ключевые закономерности:

- 1) Сигнал straw-трубки существенно зависит от расстояния трека до анода R и времени интегрирования τ_p .
- 2) Зарядовое разрешение (σ/MPV) ухудшается при уменьшении τ_p , что является платой за высокое временное разрешение.
- 3) При одинаковых ионизационных потерях dE форма сигнала и амплитуда могут различаться из-за разной кластерной структуры.
- 4) Зависимость амплитуды от dE нелинейна, что делает линейную параметризацию неприменимой.

Эти результаты показывают, что простая модель отклика, используемая в SPDRoot по умолчанию, не способна адекватно описать реальное поведение детектора. Следовательно, необходима новая параметризация, учитывающая выявленные эффекты.

5 ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЧИТЫВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА PID И ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ

Как было показано в разделе 3.1, стандартная параметризация SPDroot имеет ряд ограничений: она не учитывает зависимость от расстояния до анода, времени интегрирования и насыщение.

В данной главе на основе результатов главы 4 предлагается новая параметризация амплитуды сигнала и её флуктуаций.

5.1 ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ СИГНАЛА В SPDR00T

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 дипломной работе А.Нартова [14]. Для создания представленной параметризации была выбрана модель ASIC VMM3a с параметрами усиление 3 мВ/фКл и peaking time 25 нс.

Многочисленными были предоставлены токовые сигналы с помощью Garfield++ и амплитуды напряжений этих сигналов с помощью LTSpice. Информация получена для каонов, пионов, протонов при различных расстояниях от анодной нити (0.1 мм, 1 мм, 2 мм, 3 мм, 4 мм и 4.8 мм), для углов наклона трека, составляющих 26°, 40°, 90°. Далее были построены гистограммы распределений ионизационных потерь и амплитуд сигналов. После чего в работе [14] гистограммы были отфитированы Ландау и получены наиболее вероятные значения и ширины распределений. Далее эти параметры используются в параметризации, как показано в разделах 5.1.1 и 5.1.2.

5.1.1 СВЯЗЬ МЕЖДУ E_{loss} И АМПЛИТУДОЙ

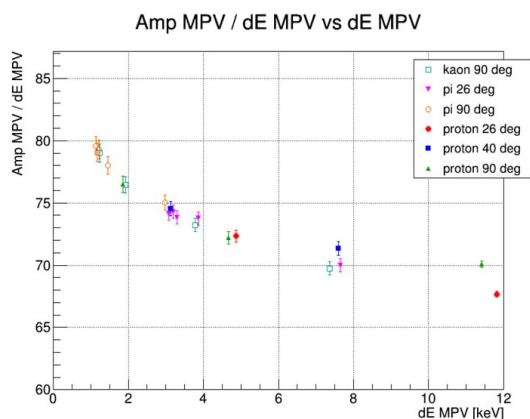


Рисунок 5.1 — Зависимость отношения MPV амплитуды к MPV ионизационных потерь от MPV dE для трех типов частиц с разными углами при расстоянии от анодной проволоки 0.1 мм [14]

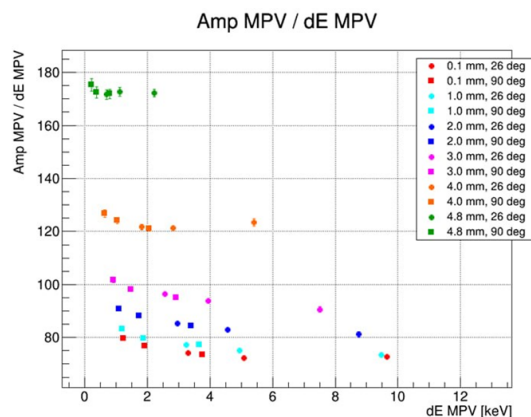


Рисунок 5.2 — Зависимость отношения MPV амплитуды к MPV ионизационных потерь от MPV dE для каонов [14]

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 рисунках 5.1 и 5.2.

Коэффициент перехода обладает следующими свойствами:

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

5.1.2 ФЛУКТУАЦИИ СИГНАЛА

Рисунки 5.3 и 5.4 показывают зависимость отношения относительной ширины распределения амплитуды к относительной ширине распределения ионизационных потерь от MPV dE.

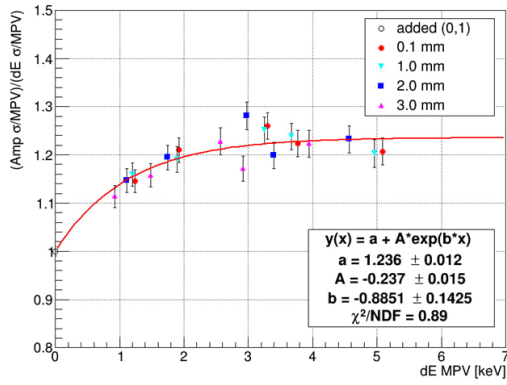


Рисунок 5.3 — Зависимость отношения относительной ширины распределения амплитуды к относительной ширине распределения ионизационных потерь от MPV dE при различных расстояниях от анода [14]

Установлено, что:

разброс увеличивается с ростом dE ;

зависимость от расстояния, типа частицы и угла является слабой.

Это позволяет упростить параметризацию при моделировании.

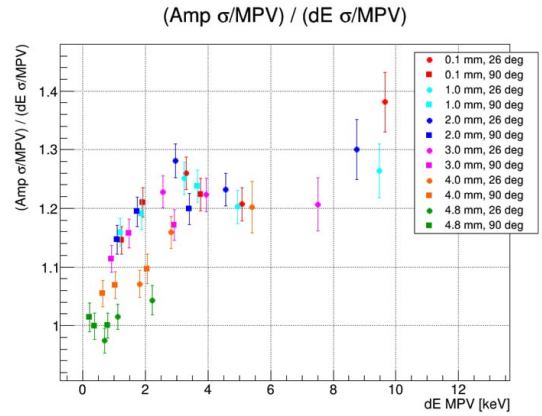


Рисунок 5.4 — Зависимость отношения относительной ширины распределения амплитуды к относительной ширине распределения ионизационных потерь от MPV dE для каонов [14]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена созданию реалистичной параметризации сигналов straw-трубок для двух ключевых задач эксперимента SPD: трекинга (измерение координаты по времени дрейфа) и идентификации частиц (PID) по ионизационным потерям. Эти задачи предъявляют к считывающей электронике противоречивые требования, поэтому в параметризации рассматривался компромиссный сценарий: использование ASIC VMM3a с параметрами усиление 3 мВ/фКл и peaking time 25 нс.

С помощью моделирования в Garfield++ и LTSpice получены количественные данные о зависимостях амплитуды сигнала и вероятности насыщения предусилителя от ионизационных потерь dE , расстояния от трека до анода R и peaking time. Основные результаты:

- 1) Показано, что стандартная параметризация SPDroot (гауссово размытие на 20%) не учитывает зависимость от R и τ_p , а также не моделирует насыщение.
- 2) Обнаружено, что при одинаковых dE сигналы от частиц с разными импульсами могут различаться из-за разной кластерной структуры ионизации.
- 3) С помощью данных полученных в этой работе разработана параметризация амплитуды и флуктуаций для peaking time 25 нс, учитывающая нелинейность и насыщение (порог 800 мВ) [14].

Разработанная параметризация позволяет корректно моделировать отклик straw-трекера при выбранных параметрах считывающей электроники. Это даёт возможность оценивать эффективность PID в реальных условиях эксперимента и сравнивать разные конфигурации электроники. После внедрения в SPDroot параметризация будет использоваться для моделирования PID в Straw Tracker на этапе Stage 1 эксперимента SPD.

Результаты данной работы, наряду с другими исследованиями [12], [14] и [15] формируют комплексную параметризацию отклика straw-трекера,

охватывающую как временные (для трекинга), так и амплитудные (для PID) характеристики сигнала. Это позволяет моделировать Straw Tracker в SPDroot с высокой степенью реализма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schindler H.* Garfield++ User Guide. — —. — Electronic resource.
2. *Brocard G.* The LTspice IV Simulator: Manual, Methods and Applications. — Würth Elektronik, 2013. — С. 744. — ISBN —.
3. *Hilke H. J., Riegler W.* Gaseous Detectors // Particle Physics Reference Library: Volume 2: Detectors for Particles and Radiation. — Springer, 2020. — С. 91—136. — ISBN 978-3-030-35317-9.
4. *Leo W. R.* Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994.
5. *The SPD Collaboration.* Technical Design Report of the Spin Physics Detector : тех. отч. / Joint Institute for Nuclear Research. — 2023. — С. 288—290.
6. Ultrasonic welding technology for straw trackers: from development to application / N. Azorsky [и др.] // Advances in Nuclear Science and Applications. — 2025. — Т. 1, № 3. — С. 179—185.
7. *JINR.* SPDROOT. — Accessed: 2026-05-28. <https://git.jinr.ru/nica/spdroot>.
8. *CERN Indico.* Straw tracker presentation. — Accessed: 2026-05-28.
9. *CERN.* NA62 Experiment. — Accessed: 2026-05-28. <https://home.cern/science/experiments/na62>.
10. *DUNE Collaboration.* Deep Underground Neutrino Experiment. — Accessed: 2026-05-28. <https://www.dunescience.org/>.
11. VMM3 ASIC as a potential front end electronics solution for future Straw Trackers / V. Bautin [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2023. — Т. 1047. — С. 167864.

12. Буланова С. А. Параметризация отклика трековой системы эксперимента SPD на коллайдере NICA: выпускная квалификационная работа магистра: направление 03.04. 02 «Физика»; образовательная программа 03.04. 02_03 «Физика ядра и элементарных частиц в фундаментальных и медицинских исследованиях». — 2023.
13. *Bulanova S.* Charge resolution with straw tubes - simulation studies and testbeam measurements. — 2025. — Indico: jinr.ru/event/5532/contributions/3373
Доклад на X SPD collaboration meeting (22 октября 2025 г., ОИЯИ, Дубна).
14. *Нартов А. Н.* Влияние параметров считывающей электроники на эффективность идентификации частиц детектором Straw Tracker в эксперименте SPD на коллайдере NICA : дис. ... маг. / Нартов А. Н. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2026.
15. *Лазарев А. А.* Реконструкция событий с малым поперечным импульсом в стро-трекере установки Spin Physics Detector на коллайдере NICA : дис. ... маг. / Лазарев А. А. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2026.