

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 539.1.07

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ
ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ КАСКАДНОЙ СИСТЕМЫ
STRAW-ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И АНАЛИЗ ПЕРВЫХ
РЕЗУЛЬТАТОВ**

Студент _____ А. В. Тишков

Научный руководитель,
доктор PhD (ядерная физика),
заместитель генерального
директора по научной работе
РГП Института Ядерной
Физики МЭ РК

_____ Н. О. Садуев

Научные консультанты:
к.ф. - м.н., ОИЯИ
старший инженер ОИЯИ

_____ Т. Л. Еник

_____ В. В. Баутин

Алматы 2026

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ КАСКАДНОЙ СИСТЕМЫ
STRAW-ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ
ЛУЧЕЙ И АНАЛИЗ ПЕРВЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Студент _____ А. В. Тишков

Научный руководитель,
доктор PhD (ядерная физика),
заместитель генерального
директора по научной работе
РГП Института Ядерной
Физики МЭ РК _____ Н. О. Садуев

Научные консультанты:
к.ф. - м.н., ОИЯИ _____ Т. Л. Еник
старший инженер ОИЯИ _____ В. В. Баутин

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

РЕФЕРАТ

На 52 с., 21 рисунок, 16 источников.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ ДЕТЕКТОР, КОСМИЧЕСКИЕ МЮОНЫ, STRAW-ДЕТЕКТОР, VMM3A, STM-VMM, СИНХРОНИЗАЦИЯ СОБЫТИЙ, СИСТЕМА СЧИТЫВАНИЯ ДАННЫХ.

Тема выпускной квалификационной работы: ввод в эксплуатацию каскадной системы straw-детекторов для исследования космических лучей и анализ первых результатов.

Данная работа посвящена вводу в эксплуатацию каскадной системы straw детекторов, проверке работоспособности детекторов как по отдельности, так и в виде системы, разработке реализации и проверки методов синхронизации событий между детекторами в каскаде. Задачи, которые решались в ходе исследования:

- Изучение физических процессов в газоразрядных детекторах.
- Ввод в эксплуатацию газового straw детектора с новой электроникой (STM-VMM). Анализ набора данных с космическими мюонами и проверка работоспособности детектора на его основе.
- Анализ методов синхронизации событий в нескольких straw детекторах. Изучение способов их реализации с данной электроникой.
- Ввод в эксплуатацию каскадной системы straw детекторов. Реализация систем синхронизации событий и проверка их работоспособности. Решение проблем, возникших при реализации и проверке.

Работа произведена на базе лаборатории физики фэсоких энергий ОИ-ЯИ, город Дубна и КазНУ имени Аль-Фараби, город Алматы. На территории данных предприятий производилась сборка установок, введение их в эксплуатацию и реализация методов синхронизации событий.

В ходе данной работы выявлены необходимые условия и параметры для введения в эксплуатацию данных straw детекторов, реализован способ синхронизации двух и более straw детекторов в каскаде, проведена его проверка на основе анализа данных, полученных при наборе космических мюонов.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	6
1 Физические процессы в газоразрядном детекторе	7
1.1 Конструкция и принцип работы straw-детекторов	9
1.2 Область применения и актуальность straw детекторов в физике элементарных частиц	10
1.3 Взаимодействие заряженных частиц с веществом	11
1.4 Основные процессы в газоразрядном детекторе	12
1.4.1 Дрейф электронов и ионов	12
1.4.2 Газовое усиление	13
2 STM-VMM	15
2.1 VMM3A	15
2.1.1 Аналоговый тракт	16
2.1.2 Цифровой тракт	17
2.1.3 Схемотехника	18
2.2 Устройство и схемотехника STM-VMM	19
2.3 Питание, шумы и экранирование	20
2.4 Программа конфигуратор и обмен данными с ПК	21
2.5 Структура данных	22
3 Ввод straw-детектора в эксплуатацию	24
3.1 Конструкция установки из straw трубок	24
3.2 Продув, отжиг и напряжение питания	26
3.3 Распределение событий по каналам	28
3.4 Распределение космических мюонов по потерям энергии в детекторе	29
4 Ввод каскадной системы из нескольких straw детекторов в эксплуатацию	31
4.1 Анализ методов синхронизации событий в нескольких straw детекторах	31
4.1.1 Программная синхронизация событий	31
4.1.2 Синхронизация по внешнему триггеру	33
4.1.3 Синхронизация по внутреннему триггеру	33
4.2 Попытка реализации программного метода синхронизации	34
4.2.1 Установка #1	34

4.2.2	Алгоритм синхронизации	35
4.2.3	Анализ данных	36
4.3	Реализация метода синхронизации по внешнему триггеру . .	38
4.3.1	Установка #2	38
4.3.2	Алгоритм синхронизации	39
4.3.3	Анализ работоспособности метода по перемещению сцинтиллятора	41
4.3.4	Анализ эффективности	42
4.4	Реализация метода синхронизации по внутреннему триггеру .	43
4.4.1	Установка #3	43
4.4.2	Алгоритм синхронизации	44
4.4.3	Программная стыковка данных на ПК	45
4.4.4	Анализ данных	47
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	49
	ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	50

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе будет рассмотрено три установки на основе straw детекторов; реализованы различные способы синхронизации детекторов в установках; произведены попытки проверки работоспособности методов синхронизации на основе анализа данных, полученных набором космических мюонов.

Straw-детекторы — это тип трековых детекторов, состоящих из проводящих трубок (обычно диаметром 4–20 мм), заполненных газовой смесью (например, Ar/CO₂)[7]. При пролёте заряженной частицы происходит ионизация газа, и дрейфующие электроны регистрируются анодной проволокой, что позволяет реконструировать траекторию частицы с высоким пространственным разрешением (вплоть до 100–200 мкм)[7]. Точность в основном определяется параметрами электроники детектора.

К преимуществам такого типа детекторов стоит отнести гибкость, при изготовлении трубок различной длины не возникает сложных технических проблем, что позволяет собирать из них детекторы совершенно разных форм и габаритов, что несомненно удобно. Кроме того straw детекторы, изготовленные из полиимидных пленок (майлар, каптон), слабо чувствительны к радиации.[6].

Первые прототипы straw-детекторов появились в начале 1980-х годов как альтернатива традиционным дрейфовым камерам. Ключевым преимуществом новой технологии стала модульность конструкции - отдельные трубки могли заменяться независимо, что значительно повысило ремонтпригодность детекторных систем[1]

Особенность электроники, рассмотренной в данной работе, заключается в модульности. Это обеспечивает гибкость в способах ее эксплуатации: становится возможным использование разных видов детекторов, разных конфигураций эксперимента. Кроме того, становится возможным изменять конфигурацию эксперимента в полевых условиях. Для реализации данного потенциала необходимо разработать способ синхронизации событий между детекторами, участвующими в эксперименте.

Актуальность данной работы заключается в тестировании электроники на основе VMM3A[5] и разработке методов ее применения в виде систем из нескольких детекторов.

1 Физические процессы в газоразрядном детекторе

Газоразрядные детекторы это устройства, состоящие из оболочки, заполненной газом. Внутри оболочки введены электроды. Проходящие сквозь толщу газа, внутри оболочки детектора, заряженные частицы ионизируют его, образуя электрон ионные пары. Под действием электрического поля в рабочем объеме детектора, возникающего вследствие подачи напряжения на электроды, происходит движение электронов и ионов к электродам. В результате этого движения в цепи питания детектора формируется токовый сигнал, регистрируемый электроникой детектора[9]. Сигнал проходит ряд преобразований, после которых оцифровывается и записывается на ПК для дальнейшего анализа и обработки.

Сигнал на электродах детектора, индуцируемый движением электронов и ионов, возникающих парами в ходе прохождения толщи газа заряженной частицей, достаточно слаб. Он состоит из вкладов от движения электронов и ионов по отдельности. Поскольку масса электронов в разы меньше массы ионов, их подвижность значительно выше. Это позволяет развивать электронам больших скоростей, что приводит к высокой амплитуде и малой продолжительности токового сигнала, вызываемого ими. Ионный вклад в сигнал представляет собой малый, но продолжительный токовый сигнал. Как следствие, зачастую используется только электронная компонента сигнала, ее проще обнаружить за счет большей амплитуды, кроме того снижается вероятность наложения событий при большом потоке заряженных частиц через детектор. Кроме того, используя специальную конструкцию детекторов и подобрав параметры становится возможным добиться газового усиления - вторичной ионизации газа внутри детектора электронами, возникшими в результате прохождения детектора заряженными частицами и разогнанными электрическим полем. Газовое усиление позволяет значительно повысить амплитуду электронного сигнала в детекторе. В качестве рабочего газа используют инертный газ как основу смеси, как правило аргон, и малую добавку многоатомного газа, например такого как метан или углекислый газ. Использование чистого инертного газа вызывало бы лавинные разряды, внутри рабочего объема. Как следствие в качестве добавки используются многоатомный газ, который, благодаря большому количеству степеней свободы, хорошо поглощает энергию, останавливая лавинообразную ионизацию. Регулируя пропорцию инертного и многоатомного газов возможно добиваться различных значений газового

усиления[15].

Регулируя величину электрического поля внутри детектора, становится

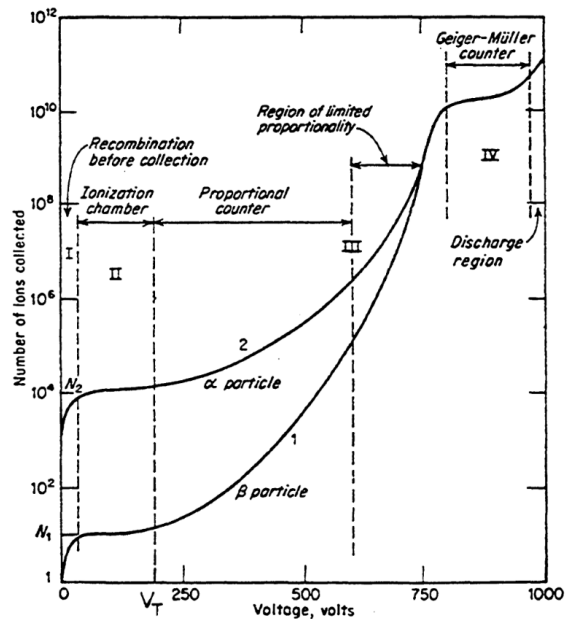


Рис. 1: Пример зависимости индуцированного на электродах заряда, от приложенного к ним напряжения

возможным добиться различных режимов работы детектора. Область I и V для регистрации частиц не применяется. В первой области, из-за слишком малой величины электрического поля внутри рабочего объема детектора, электроны и ионы рекомбинируют, не успевая достичь электродов. В области V лавинная ионизация возникает произвольно, без влияния заряженных частиц. Область II используется в ионизационных камерах для точного измерения ионизационных потерь заряженной частицей в детекторе. Благодаря низкому напряжению вторичная ионизация не возникает, как следствие собранный заряд практически не зависит от напряжения, поданного на электроды. В области III работают пропорциональные счетчики и дрейфовые камеры. Электроны успевают разогнаться до нужной энергии, чтобы вызывать вторичную ионизацию, но их энергии по-прежнему не хватает для формирования лавинообразной ионизации. Примесь многоатомных газов расширяет границы этой зоны. В области IV электроны разгоняются до такой степени, что прохождение даже одной заряженной частицы через толщу детектора вызывает лавинообразную ионизацию. Это зона работы счетчиков Гейгера-Мюллера и искровых камер[9].

1.1 Конструкция и принцип работы straw-детекторов

Straw-детекторы — это тип трековых детекторов, состоящих из проводящих цилиндрических трубок, заполненных газовой смесью. По центру каждой трубки расположена анодная проволока. Цилиндрическая геометрия создает внутри рабочего объема радиальное электрическое поле, что позволяет создавать стабильное газовое усиление вблизи анодной проволоки. Straw детекторы ранее изготавливали из бесшовных металлических трубок. Такие трубки обеспечивали хорошую проводимость и жесткость конструкции. При построении детекторов для ускорителей частиц применяют трубки, сделанные из полиимидных пленок (майлар, каптон), металлизированные с внутренней стороны. Данный тип трубок удобно изготавливать различных размеров и длин, что позволяет конструировать детекторы различных форм. К недостаткам таких трубок можно отнести низкую жесткость, что компенсируется механической конструкцией детектора и давлением газовой смеси внутри трубок; большее, по сравнению с металлическими трубками, электрическое сопротивление; ограничение на силу натяжения анодной проволоки и проблемы с ее центрированием[12].

Анодная проволока должна быть хорошо центрирована внутри трубки детектора. Как следствие, для минимизации ее провисания, она натянута внутри с некоторым усилием. В качестве материала используется титан, покрытый инертными металлами, например золотым напылением. Титан устойчив к растяжению, а золотое напыление исключает окисление поверхности анодной проволоки. В длинных полиимидных straw трубках используются центровочные проставки для анодной проволоки, не только по краям, но и между. Это необходимо для минимизации провисания проволоки, поскольку обеспечить достаточное натяжение становится сложно из-за низкой жесткости самих трубок.

На концы трубок устанавливаются заглушки из металла, как правило

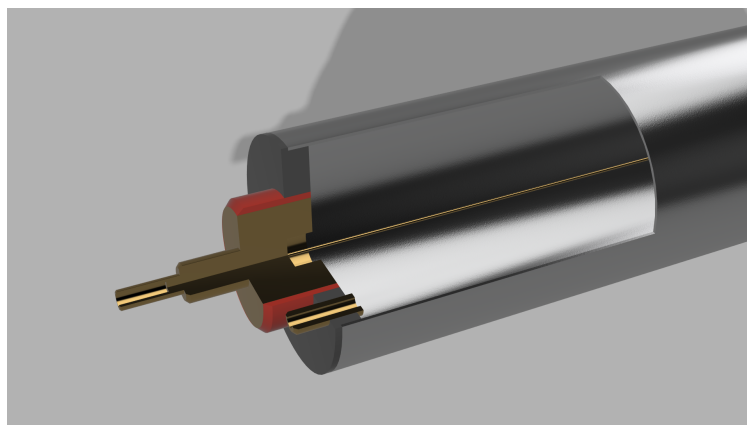


Рис. 2: Вид straw детектора из металлической трубы в разрезе

латуни, или пластика с токопроводящими контактами. Данные заглушки

выполняют функцию удержания и центрирования анодной проволоки, соединения стенок трубки и анодной проволоки с подводными проводами для подачи рабочего напряжения и съема сигнала. Кроме того, заглушки оснащены штуцерами для подачи газовой смеси внутрь трубок. Заглушки клеятся с применением специального токопроводящего клея, либо эпоксидной смолы в зависимости от конструкции детектора. Подводящие провода подключаются при помощи пайки, или посредством механического контакта.

Трубки укладываются слоями, и фиксируются при помощи рамы. Во избежание пропуска регистрируемых частиц, пролетающих между трубками и оставляющих внутри них короткий трек, трубки компонуют минимум в два слоя, как правило, гексагонально.

1.2 Область применения и актуальность straw детекторов в физике элементарных частиц

Первые прототипы straw-детекторов появились в начале 1980-х годов как альтернатива традиционным дрейфовым камерам. Ключевым преимуществом новой технологии стала модульность конструкции - отдельные трубки могли заменяться независимо, что значительно повысило ремонтнопригодность детекторных систем.

Главным преимуществом straw детекторов является возможность повышения точности регистрации трека путем анализа времени дрейфа. Благодаря этому детекторы из straw трубок позволяют достигать точности измерения трека вплоть до 100–200 мкм. Данный тип детекторов легко масштабируется, что позволяет собирать из трубок детекторы практически любых размеров.

Кроме того straw детекторы из полиимидных пленок очень слабо взаимодействуют с регистрируемыми частицами. Это позволяет вносить минимальные изменения в поток изучаемых при помощи детектора частиц. Благодаря данному преимуществу такой тип детекторов нашел широкое применение в ускорителях частиц для реконструкции трека. Кроме того данный тип детекторов обладает радиационной устойчивостью. Для изучения ШАЛ более подходящими являются трубки из тонкостенного металла. Такие трубки обеспечивают хорошую жесткость и токопроводимость, что ценнее для данного рода задач по сравнению с преимуществами полиимидных трубок[16].

1.3 Взаимодействие заряженных частиц с веществом

Заряженная частица, по мере своего движения в веществе, взаимодействует с его атомами, передавая энергию электронам. Это приводит либо к вылету электрона, то есть ионизации, либо к возбуждению атома. Образуется свободный электрон и положительно заряженный ион. Ионизационные потери заряженной частицы при прохождении через вещество $-\frac{dE}{dx}$ описываются при помощи формулы Бете-Блоха:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_e V^2} * n * Z (\ln(\frac{2m_e V^2}{I(1 - \beta^2)} - \beta^2))$$

, где e - элементарный заряд, z - заряд частицы, V - скорость частицы, n - концентрация атомов вещества, Z - заряд атомов вещества, I - средний потенциал ионизации вещества, β - релятивистская поправка.

Из формулы можно сделать некоторые выводы, такие как:

- $-\frac{dE}{dx} \approx \frac{z^2}{V^2}$.
- Ионизационные потери не зависят от массы заряженной частицы.
- $-\frac{dE}{dx} \approx nZ$.

Некоторые электроны, появившиеся в результате образования электрон ионной пары после прохождения частицы через рабочее вещество, сами обладают достаточной энергией для ионизации других атомов. Они получили название δ электроны. Такие электроны лучше ионизируют вещество, по сравнению с заряженной частицей, поскольку их энергия ниже. δ электроны за счет свободного пробега отдаляются от трека и тем самым ухудшают пространственное разрешение детектора[2].

Помимо ионизации внутри рабочего объема детектора протекает обратный процесс - рекомбинация. Электроны и ионы обладают противоположными зарядами, как следствие между ними возникают силы притяжения. При отсутствии электрического поля внутри детектора, либо при недостаточной его величине, рекомбинация будет происходить рядом с треком. Это приведет к отсутствию как такого сигнала. При рабочем напряжении рекомбинация будет происходить, но гораздо реже. Причем ее вероятность обратно пропорциональна относительной скорости движения зарядов.

Газы можно разделить на две категории, электроотрицательные и электроположительные. Первым энергетически выгодно поглощать электроны для заполнения своей внешней оболочки, что приводит к быстрому поглощению свободных электронов, дрейфующих к анодной проволоке, и, как

следствие, отсутствию сигнала. К таким газам относится кислород, водяной пар и другие. В электроположительных газах внешняя электронная оболочка атомов, в составе молекул, заполнена полностью. Образовывать следующий уровень энергетически не выгодно. Как следствие свободные электроны могут распространяться по такому газу без поглощения. Именно такие газы используют как основу газовой смеси в детекторах. К ним можно отнести все инертные газы, водород, углекислый газ, метан и другие.

1.4 Основные процессы в газоразрядном детекторе

1.4.1 Дрейф электронов и ионов

Дрейф - направленное движение зарядов к электродам под действием электрического поля в рабочем объеме детектора. Скорость дрейфа - скорость смещения заряда под действием электрического поля. Скорость дрейфа ионов можно приблизительно оценить по следующей формуле:

$$V_{др.} = a * \bar{t} = \frac{eE}{M} * \bar{t} = \mu * E$$

Где \bar{t} - среднее время между упругими столкновениями иона с молекулами газа, e - элементарный заряд, E - напряженность поля, M - масса иона, μ - подвижность иона. В отличие от ионов, масса электронов значительно ниже. Это приводит к тому что они могут рассеиваться на любые углы при упругих столкновениях, и значительно изменять свою энергию. Как следствие средняя скорость дрейфа электронов линейно зависит от величины напряженности электрического поля только при его малой величине, менее 10 В/см. После преодоления этого порога зависимость приобретает характер $V_{др.}^e \approx \sqrt{E}$ для инертных газов. Скорость дрейфа электронов можно повысить путем введения специальных молекулярных добавок.

Амплитуда и продолжительность токового сигнала детектора напрямую зависит от скорости дрейфа заряженных частиц. Для простоты регистрации сигнала электроникой детектора, как правило, добиваются наибольшего значения амплитуды токового импульса. А для отсутствия наложенных сигналов при большом потоке частиц - короткой продолжительности токового импульса. Поскольку скорость дрейфа ионов неизменна и много меньше скорости дрейфа электронов большинство straw детекторов работают именно по электронной компоненте сигнала[6].

1.4.2 Газовое усиление

Для увеличения отношения амплитуды полезного сигнала на электродах к шуму в пропорциональных счетчиках используют эффект газового усиления. При прохождении заряженной частицы образуются первичные электроны и ионы. Разгоняясь в электрическом поле первичные электроны могут набрать достаточную энергию для ионизации атомов газовой смеси. Образующиеся вторичные электроны и ионы подвержены аналогичным процессам. Это приводит к развитию лавинного умножения заряда внутри рабочей камеры детектора. Структура лавины представляет собой каплю, более подвижные электроны образуют ее тело и медленные ионы хвост. Лавина прекращает развитие и гаснет по достижению анодной проволоки всеми свободными электронами, образованными в ходе данного процесса.

Благодаря значительному увеличению количества свободных зарядов внутри рабочей области детектора при прохождении заряженной частицы, движущихся к электродам, токовый сигнал значительно возрастает по амплитуде. Это упрощает регистрацию сигнала электронике детектора. Кроме того газовое усиление позволяет получать крутой фронт сигнала, что увеличивает временное разрешение детектора. Кроме того, использование газового усиления позволяет делать детекторы малых размеров, с малым объемом рабочего вещества. В противном случае электроника не смогла бы отличить полезный сигнал от шума без достаточной длины трека заряженной частицы[6].

Если вызывать лавинную ионизацию рядом с треком заряженной частицы, в любой точке рабочего объема, это приведет к ряду негативных факторов. Газовое усиление перестает быть постоянным, поскольку в зависимости от расстояния между треком и анодной проволокой успеет родиться разное количество поколений вторичных частиц. Для straw детекторов критично измерение времени дрейфа для увеличения пространственного разрешения системы. Если газовое усиление возникнет непосредственно близко к треку заряженной частицы это приведет к проблемам в расчете скорости распространения лавины и как следствие к значительному снижению пространственного разрешения. Из-за переменного коэффициента усиления ухудшится точность временной привязки по сигналу с straw трубок. Для решения этих проблем необходимо вызывать газовое усиление в малой области в непосредственной близости к анодной проволоке. Благодаря цилиндрической конструкции straw трубки с центральной анодной проволокой напряженность поля внутри рабочего объема зависит от расстояния обратно пропорционально. Это позволяет добиваться гиперболического увеличения величины напряженности электрического поля вблизи анодной проволоки. Как следствие, электроны дрейфуют в толще рабочего

объема straw трубки и начинают лавинную ионизацию только при достаточном приближении к анодной проволоке.

2 STM-VMM

STM-VMM - устройство разработанное Виталием Баутиным в марте 2025 года[5]. Построено на основе VMM3A - интегральная схема специального назначения, представляющая собой систему считывания данных. VMM3A содержит встроенный предусилитель для сигнала, с изменяемым коэффициентом усиления, а также встроенный формирователь. Один чип содержит 64 входных канала для измерений, каждый из которых оснащен пороговым дискриминатором, с системой коррекции задержек (Time Walk Correction - TWC). Для выставления порога срабатывания интегрирован ЦАП. Кроме того, обладает собственным буфером, на одно срабатывание для каждого канала, и схемой точного измерения времени (TDC).

Для считывания сигнала с VMM3A используется микроконтроллер stm32g4.

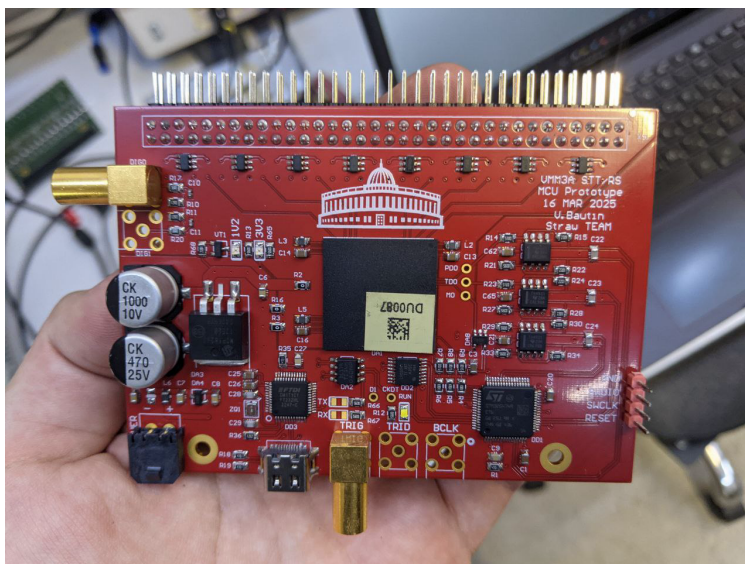


Рис. 3: STM-VMM

Основная часть данных от VMM3A передается через SPI интерфейс. После считывания stm32g4 записывает данные во временный буфер, затем отправляет через uart интерфейс на ПК.

2.1 VMM3A

Микросхема VMM3A была разработана в CERN в рамках подготовки к модернизации эксперимента ATLAS на Большом адронном коллайдере, в первую очередь для системы мюонного детектора New Small Wheel[10]. Разработка велась международной коллаборацией с участием CERN, BNL и ряда университетских групп и стала развитием серии ASIC-чипов VMM, включающей версии VMM1, VMM2 и VMM3. Версия VMM3A представляет собой доработанный и стабилизированный вариант VMM3, адаптиро-

ванный для широкого применения вне ATLAS, в том числе в более универсальных системах считывания. Проектирование чипа было завершено во второй половине 2010-х годов, а активное использование в экспериментальных установках началось примерно с 2018–2019 годов.

VMM3A предназначен для считывания сигналов с газовых микроструктурных детекторов, таких как Micromegas, а также может применяться с другими типами координатных детекторов, включая стриповые и дрейфовые. Основной задачей чипа является работа в условиях высокой загрузки по счету частиц, характерной для современных коллайдерных экспериментов, где требуется одновременное измерение координаты, времени прихода сигнала и его амплитуды.

2.1.1 Аналоговый тракт

VMM3A оснащен 64мя каналами. Схема каждого канала представлена на рисунке . Каждый канал оснащен малошумящим зарядочувствительным усилителем (CA - charge amplifier) с адаптивной обратной связью и возможностью выбора полярности сигнала для работы.

После усиления сигнал поступает на фильтр формирователь (shaper).

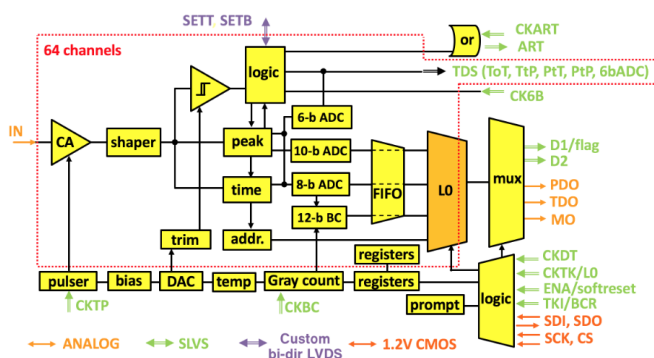


Рис. 4: Блок-схема одного из каналов VMM3A

Его задача формировать сигнал стабильной колоколообразной формы, который необходим для обеспечения максимально точной временной привязки, измерения амплитуды и фильтрации шума от полезного сигнала. Кроме того использование формирователя позволяет настраивать усиление сигнала, подгонять диапазон измеряемых значений к диапазону работы АЦП. Время нарастания сигнала на выходе формирователя настраивается и имеет 4 возможных значения: 25, 50, 100 и 200 нс. Данное значение подбирается в зависимости от загрузки детектора, 200 нс обеспечивает максимальное отношение полезный сигнал / шум, но при этом занимает в 8 раз больше времени чем режим 25 нс. Коэффициент усиления может быть установлен в одно из 8 допустимых значений, от 0.5 до 16 мВ на фКл[10].

После формирователя расположены дискриминаторы с субгистерезисной функцией, логикой активации соседних каналов и индивидуальной подстройкой порога для каждого канала. Субгистерезисная функция позволяет регистрировать сигналы, амплитуда которых меньше чем гистерезис компаратора. Порог срабатывания задается глобальным 10ти разрядным ЦАП и индивидуальным для каждого канала 5ти разрядным подстроечным ЦАП. При регистрации события на текущем канале измерения производятся и на соседних, даже если сигнал на них не превысил порог.

После дискриминации производится измерение амплитуды сигнала и его временной привязки. Амплитуда сигнала измеряется и сохраняется в аналоговой памяти для дальнейшей оцифровки. Сам сигнал, после процедуры запоминания амплитуды, используется для временной привязки. Измерение времени происходит при помощи метода преобразования времени сигнала в амплитуду, которая в дальнейшем оцифровывается. Измеряется продолжительность сигнала от момента его прихода, до ближайшего тика внешних часов. После процедур измерения производится оцифровка результатов, используя три АЦП (6ти, 8ми и 10ти разрядного), подключенных по схеме "домино". То есть каждый АЦП уточняет результат предыдущего.

VMM3A оснащена встроенным датчиком температуры. Кроме того, позволяет производить вывод аналоговых тестовых сигналов, таких как: выходы глобальных ЦАП, опорное напряжение, сигнал датчика температуры, порог срабатывания дискриминатора каждого канала, PDO (peak detector output) - напряжение амплитуды сигнала из аналоговой памяти, TDO (time detector output) - напряжение на емкости преобразования время - амплитуда, MO (monitor output) - сигнал после усиления.

2.1.2 Цифровой тракт

Оцифрованные данные могут передаваться по средствам трех различных интерфейсов:

Цифровой мультиплексированный выход DATA0/DATA1. Этот способ передачи данных из VMM3A к микроконтроллеру для дальнейшей обработки позволяет передавать такие данные как:

- Номер сработавшего канала.
- Амплитуду сигнала (PDO).
- Временную привязку (TDO).
- BCID

Данные передаются по двум цифровым линиям DATA0 и DATA1. Это основной режим обмена данными для получения подробной информации о событии[10].

ART режим (address in real time). Этот режим создан для использования VMM3A в качестве быстрого триггера. Передается только номер первого сработавшего канала. Передача производится через последовательный интерфейс.

DDO (direct data output) - прямая цифровая передача данных. Используется отдельный канал передачи данных для каждого канала VMM3A. Каждый вывод может передавать один из четырех видов данных:

- ToT (Time-over-Threshold) — время нахождения сигнала выше порога.
- TtP (Threshold-to-Peak) — время от пересечения порога до достижения пика.
- PtT (Peak-to-Threshold) — время от пика до обратного пересечения порога.
- PtP (Pulse-at-Peak) — импульс в момент достижения пика.

Используется для получения наибольшего количества информации о событии с максимально возможной скоростью.

Для конфигурации VMM3A используется четырех проводной последовательный интерфейс, схожий с SPI. Назначение контактов: SCK — тактовый сигнал, SDI — вход последовательных данных, SDO — выход последовательных данных, CS — выбор микросхемы (Chip Select).

Для проверки работоспособности каналов в VMM встроен генератор тестовых импульсов. Амплитуда задается при помощи 10ти разрядного АЦП, а частота при помощи внешнего тактового сигнала.

2.1.3 Схемотехника

VMM3A произведена по техническому процессу в 130 нм. Представляет собой чип размерами 21 на 21 мм, предназначенный для поверхностного монтажа (BGA). Шаг шаров составляет 1 мм, рекомендуемый диаметр шаров 0.6 мм. Всего чип содержит 400 контактных площадок, образующих сетку размерами 20 на 20[10].

Для уменьшения и изоляции шумов используется 4 независимые шины питания по 1.2 В: V_{ddp} - питание предусилителя, V_{dd} - питание аналогового тракта, V_{ddad} - питание АЦП, V_{add} - питание цифрового тракта.

ключен информационный светодиод белого цвета.

2.3 Питание, шумы и экранирование

Плата оснащена отдельным питанием микроконтроллера и VMM3A. Микроконтроллер питается напряжением 3.3В, формируемым из напряжения USB порта. Для питания VMM3A используется отдельный блок на печатной плате. Состоит из линейного стабилизатора напряжения, который позволяет формировать более чистое выходное напряжение по сравнению с импульсными источниками питания. Для сглаживания используются два полимерных электролитических конденсатора и многочисленные керамические конденсаторы. Напряжение на линейный стабилизатор подается с входного разъема Molex Micro-Fit 3.0. Оба источника питания оснащены информационными светодиодами зеленого цвета для 1.2 В питания VMM и оранжевого для 3.3 В питания микроконтроллера.

Схема питания VMM3A может формировать 1.2 В при диапазонах входного напряжения от 2.5 до 3.5 В. Ток потребления печатной платы по этой линии при нормальном режиме работы составляет 0.5 А. Как следствие, площадь подводящих проводов для питания данной платы должна составлять не менее 0.2 мм². Так при длине провода в 1.5 м падение напряжения составит около 0.1В, что допустимо. В качестве блока питания необходимо использовать малошумящий источник стабильного напряжения и тока, например лабораторный блок питания. Точного измерения предельного значения помех в линии питания не производилось, для работы был выбран наиболее стабильный источник из имеющихся.

VMM3A достаточно чувствительна к помехам, формирующимся на входной группе печатной платы. В ходе работы с данным устройством были установлены следующие причины помех: емкостная связь с любыми крупными проводниками на расстоянии 20 см до платы и ближе, например человеческое тело; источники электромагнитных помех в помещении, например такие, как импульсные светодиодные сетевые лампы; анодная проволока детектора, выполняющая роль антенны.

Для защиты VMM3A от емкостных наводок окружающих проводников разработан заземленный проводящий корпус, окутывающий плату и контактную группу целиком. Сам корпус изготовлен на фотополимерном 3D принтере. Для придания проводящих свойств покрыт изнутри специальной графитосодержащей краской, что обеспечивает сопротивление между наиболее удаленными точками корпуса порядка 1 КОм. Корпус соединяется винтами М3 и заземляется путем механического контакта четырьмя земляными точками с платой, а также контактом с корпусами разъемов.



Рис. 6: Экранирующий корпус STM-VMM

Для обеспечения электрического контакта торцы стыкуемых половинок покрыты этой же краской. Охлаждение VMM3A обеспечивается при помощи радиатора.

В ходе экспериментов выявлена необходимость в заземлении массовой линии детектора и платы во избежание шумов и наводок как на входной группе STM-VMM, так и на входах и выходах микроконтроллеров. В случае невозможности заземления желательное соединение корпуса детектора с проводником больших размеров, например системе центрального отопления.

2.4 Программа конфигуратор и обмен данными с ПК

Для удобства настроек VMM3A, реализации протокола обмена данными между ПК и микроконтроллером, записи данных на диск в удобном для последующей обработке формате Виталием Баутиным была разработана программа конфигуратор. Решение реализовано для операционной системы Linux на языке C++ и qt для работы с последовательным портом и графикой.

Данная программа отслеживает список доступных COM портов, позволяет установить соединение с нужным. Из-за характера работы ОС Linux наименование конкретной платы STM-VMM может изменяться при подключении новой платы, другого устройства по USB, перезагрузки компьютера. Причем изменение название может произойти даже во время активного обмена данными между программой и STM-VMM. Это не приведет к ошибкам в обмене данными и установка может продолжить работу в стандартном режиме, но вызывает путаницу. Данную проблему возможно решить используя встроенные средства ОС Linux присвоив название каждой плате вручную.

Для обмена данными между STM-VMM и программой реализован спе-

циальный протокол обмена данными. Контроль приема передачи данных осуществляется при помощи пост кодов. Программа позволяет графически изменять все настройки VMM3A и затем применять их в действие, даже во время набора данных. Для сохранения настроек генерируется JSON файл и сохраняется в удобном месте.

Программа оснащена функциями программной перезагрузки микроконтроллера и VMM3A, тестирование работоспособности каналов VMM3A при помощи встроенного в нее генератора событий, тестировании пропускной способности протокола обмена данными между микроконтроллером и ПК путем генерации ложных программных событий на микроконтроллере. Реализована функция автоматической калибровки главного порога срабатывания дискриминатора и подстройки порога для каждого канала индивидуально.

2.5 Структура данных

Данные сохраняются в виде файла ROOT. В программе указывается путь по которому производится сохранение данных. Файлы получают порядковое название формата "run_0000*.root". Программа автоматически определяет номер текущего набора. Файл содержит три дерева: adc - данные с АЦП, config - файлы с конфигурацией, которая использовалась при наборе, stm_vmm - основное дерево с событиями.

Дерево ROOT stm_vmm содержит следующие ветви:

- Vcid - хранит количество тиков аппаратного таймера 2 от запуска stm32g4 до события в каждой отдельной трубке. Тип данных UInt32_t. Таймер 2 настроен на работу с частотой в 40 МГц, в связи с этим каждые 100 секунд счетчик переполняется и начинает отсчет с нуля.
- Board - номер печатной платы для идентификации наборов данных при работе с несколькими детекторами. Тип данных UInt8_t. Задается в ПО stm32g4.
- Channel - массив значений каналов, которые сработали в одном событии. Тип данных vector<UInt8_t>.
- Pdo - массив значений измеренной амплитуды сигналов по каждому из сработавших каналов в сыром виде без преобразований. Тип данных vector<UInt16_t>.
- PdoMV - массив значений измеренной амплитуды сигналов по каждому из сработавших каналов, откалиброванный в мВ. Тип данных vector<UInt16_t>.

- Tdo - массив значений измеренного напряжения на емкости преобразования время - амплитуда в сыром виде. Тип данных `vector<UInt16_t>`.
- TdoMV - массив значений измеренного напряжения на емкости преобразования время - амплитуда, откалиброванный в мВ. Тип данных `vector<UInt16_t>`.
- Timestamp - абсолютное UNIX время ПК прихода события в мс. Может давать систематическую погрешность вплоть до 5 мс. Тип данных `UInt64_t`.

3 Ввод straw-детектора в эксплуатацию

Перед сборкой и вводом в эксплуатацию каскадной системы независимых straw детекторов необходимо добиться качественной работы всех детекторов по отдельности. Для этого произведем запуск, анализ данных, калибровку и отладку каждого детектора по отдельности. Оценку работоспособности каждого отдельного детектора произведем по двум параметрам: равномерности распределения событий по каналам детектора и наличию Ландау - пика в распределении космических мюонов по потерям энергии в детекторе. Равномерность распределения по каналам детектора характеризуется точностью калибровки порогов дискриминатора, кроме того дает точную количественную оценку работоспособных каналов в детекторе. Присутствие Ландау - пика на гистограмме распределения частиц по потерям энергии означает что все параметры, такие как напряжение питания, пропорции газовой смеси, коэффициент усиления электроники подобраны верно и диапазон работы АЦП соответствует необходимому.

3.1 Конструкция установки из straw трубок

В конструкции детекторов использованы тонкостенные алюминиевые трубки диаметром 36 мм двух видов, 1000 и 800 мм в длине соответственно. Расчетный объем трубок каждого вида без учета толщины стенок:

$$V_{1000} = \pi \frac{D^2}{4} H = 3.14 * \frac{0.36^2}{4} * 10 = 1.017 \text{ л}$$

$$V_{800} = 3.14 * \frac{0.36^2}{4} * 8 = 0.814 \text{ л}$$

Детекторы представляют собой двухслойную структуру из straw трубок. Всего детектор рассчитан на установку до 32х трубок, по 16 на каждый слой. Трубки скомпонованы гексагонально. В детекторе, данные с которого будут приведены в текущем параграфе, установлено 26 трубок, каждая длиной в 1000 мм.

Конструкция детектора устроена следующим образом: корпуса трубок соединены рамой, представляющую собой 4 пластины с углублениями под трубки. Пластины стягиваются с обеих сторон детектора винтами, обеспечивая фиксацию и общую земляную шину. Пластины с обеих сторон от детектора стягиваются алюминиевыми профилями параллельно трубкам, а далее при помощи их фиксируются друг над другом, образуя каскады.



Рис. 7: Конструкция детектора

Это позволяет жестко фиксировать их под определенными углами друг ко другу.

В электронике детектора применены фильтрующие и разделительные

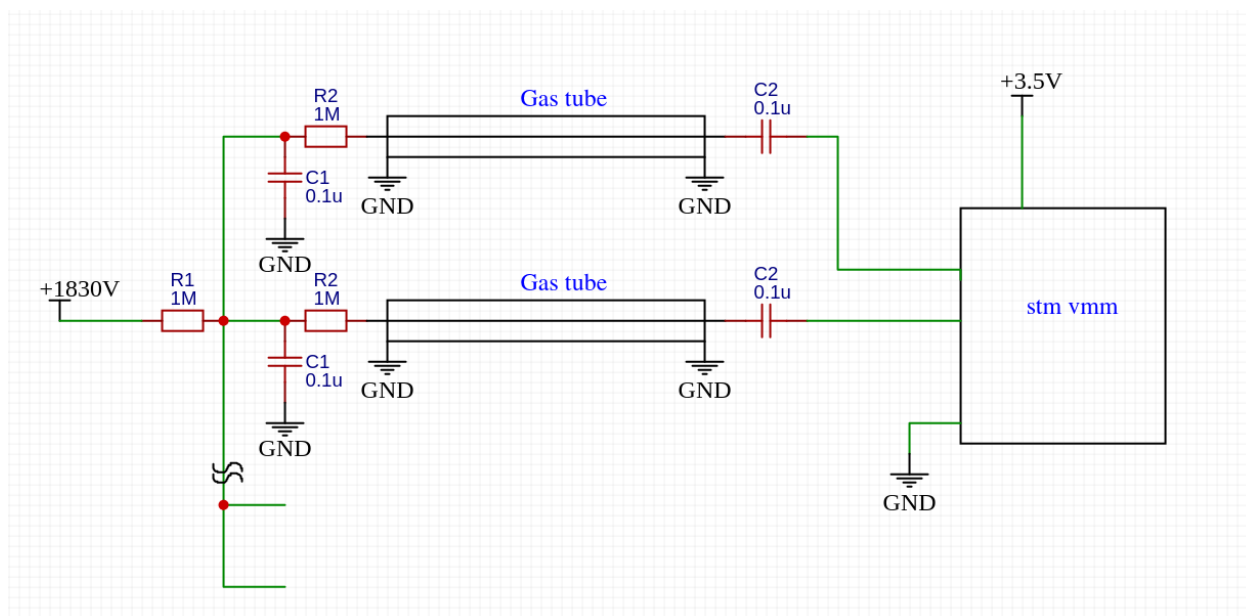


Рис. 8: Принципиальная схема электроники детектора

высоковольтные керамические дисковые конденсаторы с максимальным допустимым рабочем напряжением в 3 КВ. Емкость разделительных конденсаторов составляет 470 пФ, а фильтрующих 2200 пФ. Для разделения сигналов с каждой из трубок высокое напряжение на них подается через отдельные резисторы R2 (рисунок 8). Для обеспечения минимальных задержек и искажений сигнала STM-VMM устанавливается напрямую на детектор (рисунок 9). Это позволяет получить хорошее качество сигналов без применения предусилителей и согласованных линий.

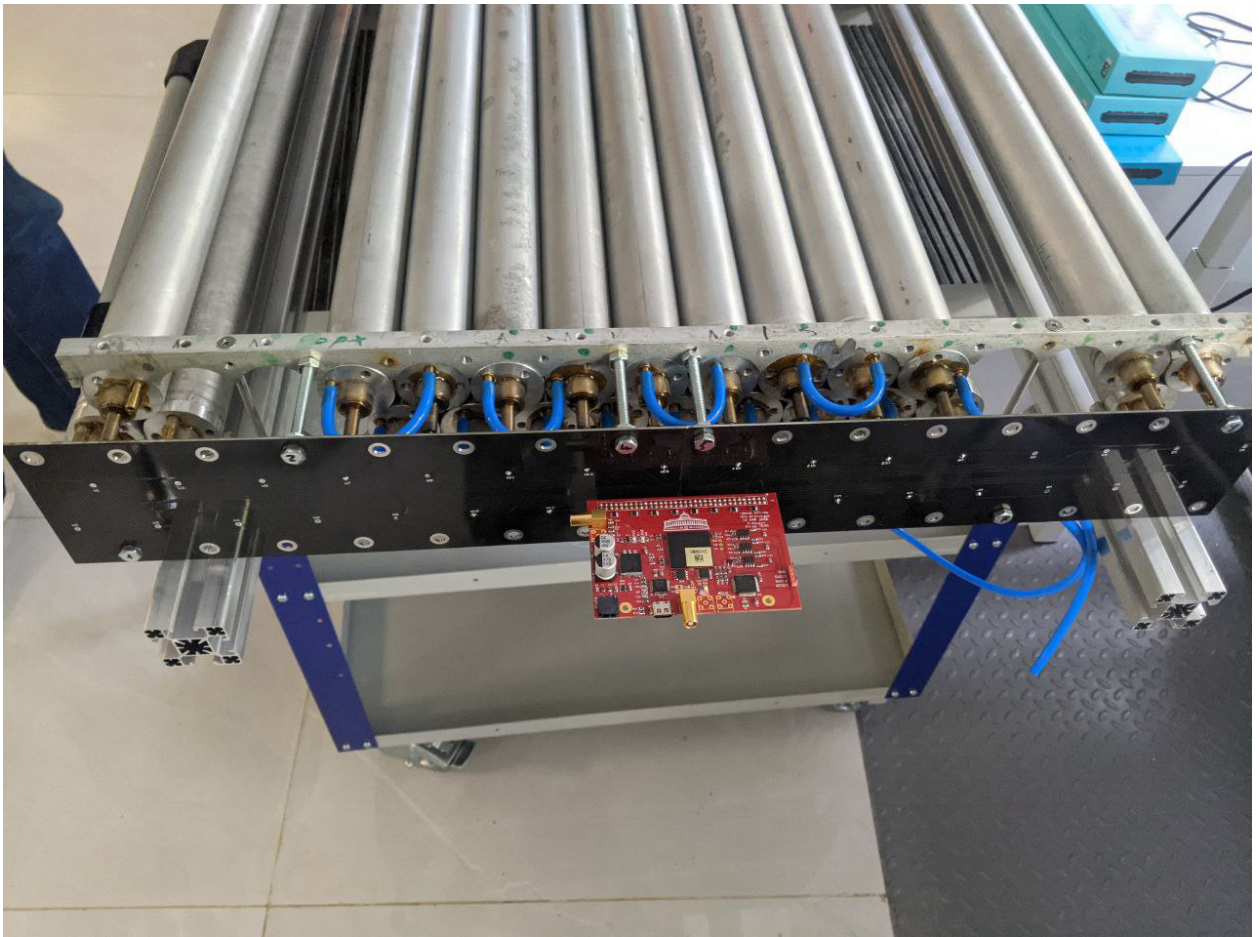


Рис. 9: Детектор в сборе, готовый к размещению в установке

Для подачи высокого напряжения на каждую из трубок используется плата распределения. Входной разъем высокого напряжения установлен прямо на нее. Для фильтрации входного питания на эту плату установлены сглаживающие конденсаторы С1 (рисунок 8). С другой стороны от детектора установлена плата для сбора сигналов с трубок, на которой распаяна колодка под подключение STM-VMM.

3.2 Продув, отжиг и напряжение питания

Перед запуском детектора необходимо заполнить его внутренний объем рабочей смесью газа. Данная процедура называется продувом детектора. Найдем суммарный объем в этой установке из 26 трубок, длиной 1000 мм каждая:

$$V = 26 * V_{1000} = 17 * 1.017\text{л} \approx 26.4\text{л}$$

По результатам наблюдений основной объем воздуха из детектора можно выгнать при объеме продуваемого газа в три раза превышающем его объем. Тогда для продува детектора в данной установке при потоке в 1

литр в час понадобится:

$$T = 3 * 26.4 / 1 \text{ч} \approx 79 \text{ч} \approx 3 \text{суток}$$

В процессе эксплуатации детектора происходит изменение состава рабочего газа. Под действием высокого напряжения и ионизации газа частицами в нем образуются свободные радикалы, кроме того, происходит выделение различных веществ из стенок трубок, клеевого слоя на месте стыка заглушек с трубками. Это приводит к быстрому изменению параметров рабочей смеси газа и некорректной работе установки. По наблюдениям полностью закупоренная система может продолжать работу в течении пары часов до критичной потери характеристик газовой смеси. Во избежание данных негативных эффектов детекторы, после основного цикла продува перед запуском, необходимо продувать малым потоком газа на постоянной основе.

При длительном простое детектора на анодную проволоку оседает различный мусор из окружающей ее среды. Данный мусор создает коронные разряды, что приводит к повышенному току в высоковольтной цепи детектора и невозможности его эксплуатации. Для очистки детектора необходимо произвести процедуру отжига - подачу высокого напряжения на детектор. Под действием коронных разрядов мусор сгорает и выводится из детектора вместе с потоком продуваемого газа. Длительность данной процедуры зависит от степени загрязнения анодной проволоки и может занимать вплоть до пары недель. Как следствие, при проведении различных работ с детектором, или его транспортировке, лучшим решением является закупоривание системы во избежание дополнительного расхода газа и времени на его последующий ввод в эксплуатацию.

В рамках данной работы измерение вольт амперной характеристики straw трубок не производилось по причине отсутствия необходимости. Для начала работы была выставлена газовая смесь, состоящая на 93% из аргона и на 7% из углекислого газа. Данные пропорции были взяты с действующих straw установок в ЛФВЭ г. Дубна. Значение напряжения, подаваемого на анодную проволоку подбиралось по принципу обнаружение четкого Ландау пика на гистограмме распределения частиц по потерям энергии в детекторе. Если напряжения было недостаточно для данной газовой смеси Ландау пик локализовался на слишком малых амплитудах сигналов, граничащих с основным порогом дискриминатора VMM3A. Для подбора напряжения производились наборы данных с фиксированным количеством событий, наращивая напряжение питания с шагом в 30 - 50 В. После четкой локализации пика полученное напряжение и устанавливалось как рабочее. Для данной пропорции газовой смеси рабочее напряжение составило 1830

В, что составляет около 60% от предельного значения напряжения на высоковольтных конденсаторах. Как следствие было принято решение продолжить работу на данной пропорции газовой смеси.

3.3 Распределение событий по каналам

После подготовительных процедур, таких как продув, отжиг и подбор рабочего напряжения необходимо выполнить калибровку порогов дискриминаторов у каждого из работающих каналов VMM3A. Поскольку каналы в VMM3A незначительно, но отличаются друг от друга, и сами straw трубки тоже калибровка позволит выровнять число событий по каждому из каналов. Данная процедура в программе конфигураторе называется `gunpreparation` и производится в течение нескольких часов автоматически. После ее завершения в программе конфигураторе выставляется подобранное напряжение главного порога, а также подстроечные значения для каждого из каналов. К сожалению автоматика программы ограничена в своих возможностях и требует ручной доработки подстроечных значений. По итогу значение главного порога дискриминации составило 270 мВ.

После набора данных, содержащих зарегистрированные детектором космические мюоны, необходимо очистить их от ложных событий. Ложные события в данных возникают из-за свободных каналов STM-VMM к которым ничего не подключено. Убрать данные с этих каналов можно как при наборе данных, выключив их в программе конфигураторе, так и при обработке. Первый способ лучше, так как меньше нагружает микроконтроллер, что критично при большом потоке частиц.

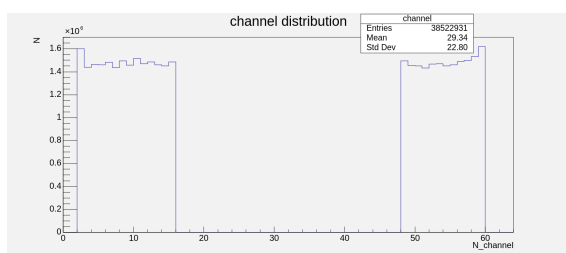


Рис. 10: Распределение по каналам для детектора (26 трубок) без удаления не подключенных каналов

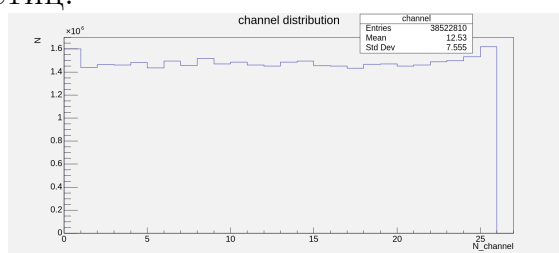


Рис. 11: Распределение после устранения лишних каналов и правильной нумерации после автоматической калибровки

Кроме того, STM-VMM передает информацию о каналах определенным образом, каналы 0 - 15 включительно физические, 16 - 47 включительно это 32 не реализованных на плате канала, 48 - 63 включительно оставшиеся 16 физических канала. После исключения не подключенных каналов получаем распределение по 26 трубкам. Как видно из графика разница в числе событий между трубками после автоматической калибровки порогов каналов

лежит в пределах 6%. Дальнейшая ручная подстройка порогов не производилась, поскольку расхождение в 6% не критично для дальнейших задач данной работы. На рисунке 11 двадцать седьмой по счету бин был специально отображен с нулевым значением для наглядного сравнения разброса в количестве событий между трубками.

3.4 Распределение космических мюонов по потерям энергии в детекторе

Получим спектр энергетических потерь заряженных частиц в детекторе. Так как рядом с детектором нет источников ионизирующего излучения, то основное большинство улавливаемых им частиц это космические мюоны, образующиеся в верхних слоях атмосферы. Для такого мюона детектор тонкий (мюон проходит его насквозь, без полной остановки), как следствие мы ожидаем получить распределение Ландау[11].

После объединения всех событий в одну гистограмму получаем сле-

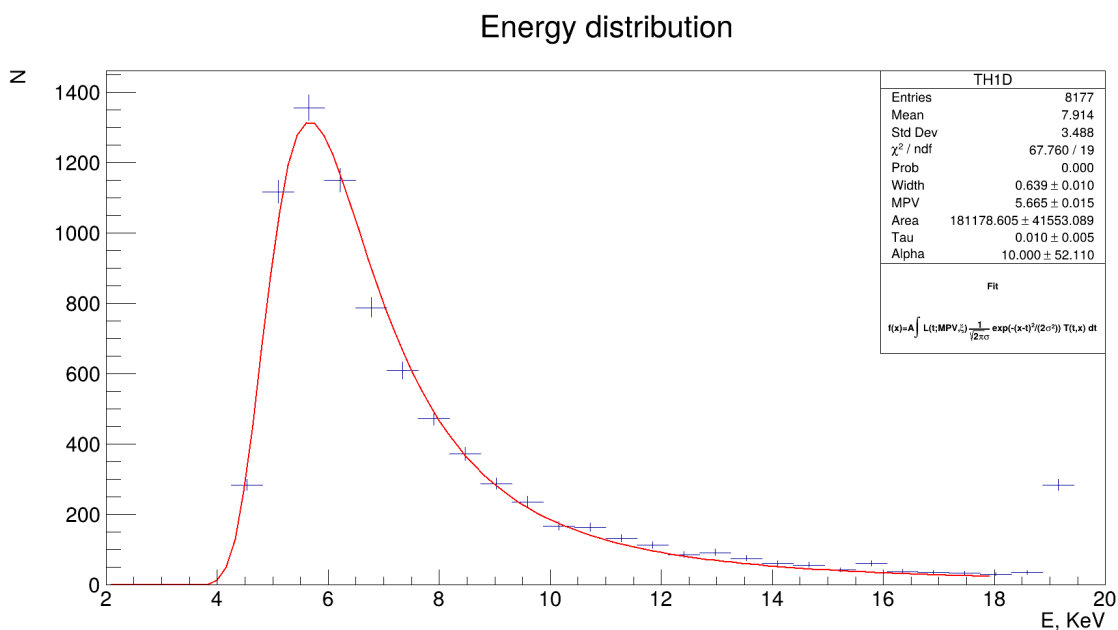


Рис. 12: Распределение энергетических потерь мюонов в детекторе

дующий результат. В правой части спектра образовалось переполнение - явление регистрации частиц с более высокими значениями потерь энергии, чем предел измерения электроники детектора, что приводит к записи этих событий в один и тот же крайний бин.

В реальности же распределение Ландау на данном детекторе не получается из-за ряда эффектов, таких как: отсутствие контроля частиц по углу, что является причиной большого числа длинных треков и очень сильно вытягивает хвост; порог дискриминатора близкий к началу формирования

пика; нелинейность электроники; низкого разрешения самого детектора и прочих[13]. Полученное распределение отличается от Ландау более вытянутым хвостом. Для фитирования была использована свертка Ландау, полиномиального хвоста и распределения Гаусса. Полиномиальный хвост не соответствует какому-либо физическому процессу, используется скорее для точного фитирования. Для получения более полезных с точки зрения физики результатов необходимо реализовать отбор частиц по углу, в плоскости перпендикулярной трубкам. Поскольку в текущем исполнении мы наблюдаем свертку распределения Ландау с геометрией детектора, вносящей ощутимый вклад в результат. Так как физическая интерпретация измеренных потерь энергии космических мюонов в данной установке не является задачей данной работы остановимся на данном результате. Распределение Гаусса было добавлено в свертку для учета погрешности детектора. В итоге с данной сверткой получаем $\chi^2/\text{NDF} = 3.6$

По данной гистограмме можно сделать вывод, что диапазон работы АЦП соответствует необходимому, поскольку Ландау пик хорошо различим. Это говорит о корректной работе электроники, фиксирующей лавины ионизации в детекторе; газовое усиление работает и обеспечивает необходимый коэффициент усиления; коэффициент усиления в VMM3A подобран верно. Это приводит к выводу, что рабочее напряжение установки подобрано верно для данной газовой смеси.

Сам детектор хранит данные в виде амплитуды сигнала в мВ, а не в единицах энергии. Для получения распределения в эВ, как на рисунке 12, была произведена калибровка детектора. В связи с отсутствием возможности набора событий с источником ионизирующего излучения, с известной энергией, калибровка была произведена по симуляции данного детектора в программе geant 4, выполненной Маргаритой Банщиковой[14].

4 Ввод каскадной системы из нескольких straw детекторов в эксплуатацию

Для получения данных о треке космических мюонов одного детектора недостаточно. Каждый детектор дает распределение потока частиц по координате на оси, перпендикулярной трубкам, входящим в его состав. Как следствие, для восстановления проекции трека частицы на плоскость, приближенно считая ее прямой линией, необходимо минимум два детектора, расположенных каскадно параллельно друг ко другу. На этапе отладки алгоритма стыковки данных необходимо минимум три детектора, расположенных каскадно и параллельно друг ко другу для контроля корректности данных, путем оценки невязки между треком, построенным по двум детекторам и событием в третьем детекторе.

Для решения данной проблемы произведем анализ возможных способов синхронизации событий в нескольких детекторах, расположенных каскадно. Реализуем методы по мере увеличения их аппаратной сложности, произведем оценку их работоспособности.

4.1 Анализ методов синхронизации событий в нескольких straw детекторах

Для задачи синхронизации событий в конкретной установке из нескольких каскадно расположенных straw детекторов было выявлено три основных метода синхронизации: программный способ на основе статистической взаимосвязи событий по времени в каскадных детекторах; синхронизация по сигналу триггеру от дополнительного детектора в установке; синхронизация событий, формируя сигнал триггера самими straw детекторами - внутренний триггер. Дальнейшая синхронизация событий с нескольких установок не входит в рамки данной работы, предполагается решение этой проблемы путем использования единого синхронизирующего сигнала, либо используя модуль внешних часов, в роли которого может выступать GPS приемник[8].

4.1.1 Программная синхронизация событий

Идея данного метода заключается в сопоставлении событий двух и более каскадных детекторов на основе статистики. Данный метод реализуем только в том случае, если между наборами данных с детекторов есть какая-либо связь. Как следствие этот метод работоспособен только в случае каскадного размещения детекторов. Причем чем больше площадь перекрытия

детекторов, тем точнее будет этот метод.

Сопоставление событий данным методом будет производиться после набора данных со всех детекторов в каскаде, то есть на этапе анализа. Так как электроника независима, запустить набор нужно по отдельности, обеспечивая минимальный начальный временной сдвиг между детекторами.

Реализация заключается в создании алгоритма, выявляющего статистическую взаимосвязь между событиями по времени, что позволит вычислить временной сдвиг между детекторами. После определения этого сдвига, с необходимой точностью, станет возможным сопоставить события из нескольких наборов. Для отслеживания времени событий на необходимом уровне точности будет задействован параметр `bcid`, содержащий количество тиков второго аппаратного таймера `stm` с момента ее запуска. Для калибровки скорости счета аппаратного кварца и компенсации переполнений `bcid` будет задействовано `unix` время ПК каждого события, сохраненное в параметре `timestamp`. Использование только `unix` времени сделает метод невозможным, из-за низкого разрешения (миллисекунды) и погрешности (вплоть до 5 мс).

К недостаткам данного способа можно отнести:

- Необходимость в большом наборе данных с обоих детекторов, для вычисления временного сдвига необходимой точности.
- Возможность работы только с небольшим потоком частиц, так как сопоставление событий ограничено точностью определения временного сдвига.
- Необходимостью идентичности детекторов, используемых в каскаде и как можно большей площадью их перекрытия. В противном случае определить временной сдвиг с нужной точностью будет затруднительно.
- Значительным увеличением времени и трудозатрат на обработку данных с детекторов.
- Данный метод не гарантирует корректность сопоставленных событий.

Положительная сторона данного метода заключается в отсутствии какой-либо дополнительной электроники. По этой причине было принято решение реализовать его, как минимум с целью проверки его работоспособности на практике, и использованием его в дальнейшем в качестве референса для других методов.

4.1.2 Синхронизация по внешнему триггеру

Для работы данного метода необходимо использование внешнего триггера. В его роли могут выступать любой детектор, способный выдавать кратковременный логический сигнал после регистрации частицы. Размеры и тип триггерного детектора подбираются в зависимости от целей эксперимента.

Идея данного метода заключается в подаче сигнала триггера от отдельного детектора ко всем straw детекторам в установке. Straw детекторы должны записывать данные на ПК только в случае совпадения времени прихода сигнала триггера и сигнала с трубок в некотором временном окне. Если отдельный детектор, выступающий в роли внешнего триггера, расположен далеко от установки, то сигнал от него будет идти с ощутимой задержкой. Для компенсации этого эффекта необходимо реализовать в микроконтроллере буфер быстрой памяти, для хранения нужного числа событий за время прихода сигнала триггера и последующего выбора нужного.

Преимущества данного способа:

- Минимально возможные ошибки в сопоставлении событий.
- Данный метод работает с детекторами любых конфигураций, любой компоновкой и любой площадью перекрытия.
- Наборы данных могут быть любой длины и продолжительности.
- Теоретически работоспособен с любым потоком частиц, вплоть до предела VMM3A.
- Простота сопоставления событий на этапе обработки данных.

К недостаткам данного метода следует отнести: необходимость в дополнительном триггерном детекторе; тщательной настройке алгоритма фильтрации событий из буфера, при срабатывании триггера. В противном случае возникнут проблемы с низкой эффективностью регистрации событий. Суммарная эффективность всей детекторной сборки, без учета геометрии, будет определяться как произведение эффективности каждого из каскадов.

4.1.3 Синхронизация по внутреннему триггеру

Этот метод по своей сути схож с синхронизацией по внешнему триггеру. Отличие заключается во времени дрейфа газовых straw детекторов, вносящие вклад во временную привязку сигнала триггера. Если в случае внешнего триггера задержка между сигналом триггера и сигналом с трубок

зависела только от времени дрейфа одного детектора, то в случае внутреннего триггера вклад вносит время дрейфа сразу двух детекторов.

Данный метод чрезвычайно удобен, так как реализует все плюсы триггерного способа без необходимости в дополнительной аппаратной части (за исключением соединения детекторов дополнительной линией передачи триггерного сигнала). Уступает он разве что возможностью подключения синхронизирующего сигнала от других установок.

В связи со сложностью деления сигнала триггера на несколько детекторов возникает проблема. В качестве решения можно использовать внешнюю плату с микроконтроллером, принимающую сигнал триггер и дублирующую ее на несколько выходов к каждому из детекторов. Этот способ неудобен, поскольку появляется дополнительное внешнее устройство. Кроме того микроконтроллер неминуемо внесет дополнительную задержку в сигнал. Другим же решением данной проблемы является подключение детекторов цепочкой. Каждый детектор при получении сигнала триггера может продублировать его следующему, либо сформировать свой сигнал триггер. Второй способ более удобный, поскольку не вносит дополнительных задержек в сигнал, вызванных необходимостью в его дублировании. Как следствие метод синхронизации по внутреннему триггеру удобно реализовать если планируется использовать установку отдельно, либо же комбинировать данный метод с внешним триггером для работы с несколькими установками одновременно. В этом случае первый в цепочке детектор получает внешний сигнал триггер, а последующая цепочка детекторов работает по самотриггеру.

4.2 Попытка реализации программного метода синхронизации

4.2.1 Установка #1

Для отладки и проверки работоспособности данного метода собрана установка, состоящая из двух straw детекторов, расположенных каскадно. Установка собрана в ЛФВЭ г. Дубна. Первый детектор содержал 26 трубок длиной в 1000 мм, второй 16 трубок длиной в 1000 мм. Детекторы были расположены перпендикулярно для построения карты попаданий (hit map) в случае успешной реализации метода.

Найдем суммарный объем трубок и вычислим время продува для потока газа в 1 л/час.

$$V = (26 + 16) * V_{1000} = 42 * 1.017\text{л} \approx 42.7\text{л}$$

$$T = 3 * 42.7/1\text{ч} \approx 128.1\text{ч} \approx 5\text{суток}$$

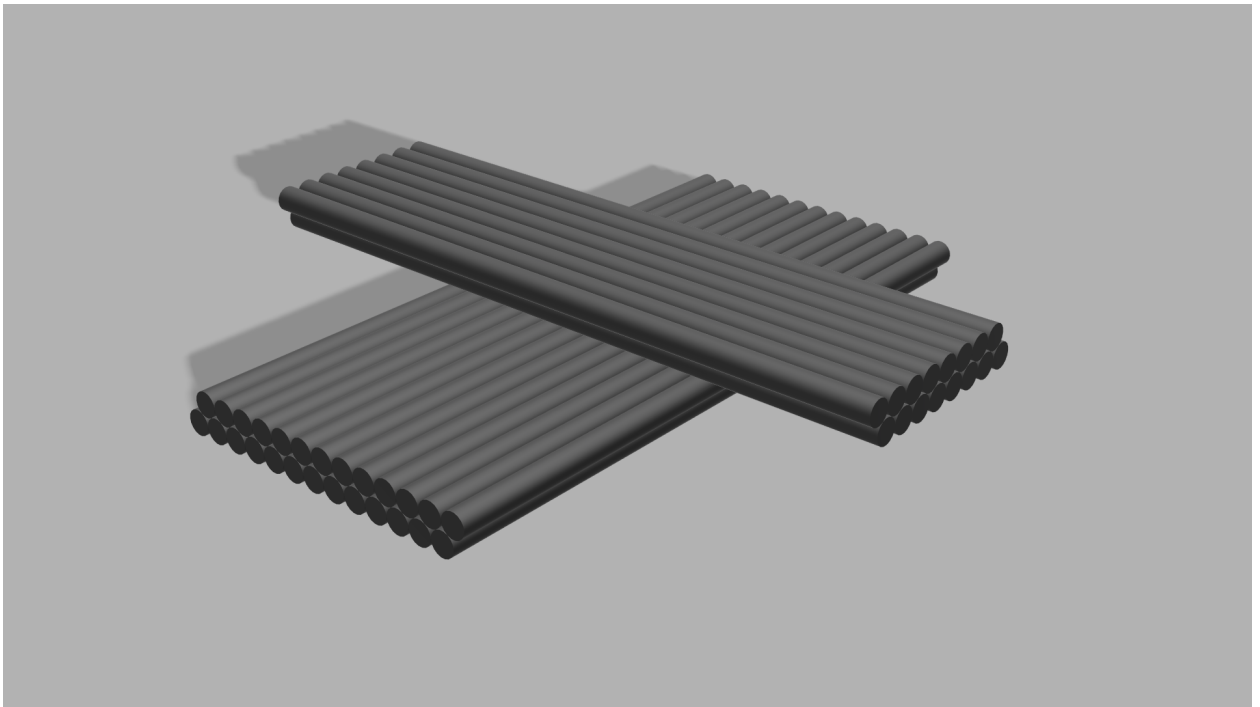


Рис. 13: Установка #1

В данной установке детекторы работают полностью независимо друг от друга. Исключением является unix время ПК, к которому они подключены. Но из-за слишком большой погрешности эти данные будут использованы только для калибровки скорости счета $bcid$ на двух платах и грубой первоначальной стыковки наборов.

4.2.2 Алгоритм синхронизации

Идея заключается в первоначальной калибровке скорости счета $bcid$ на двух платах, используя $timestamp$. Построив график зависимости абсолютных значений $bcid$ от $timestamp$ можно получить линейную функцию для обоих детекторов. Произведя фитирование данной функции возможно устранить систематическую погрешность расхождения скорости счета внутренних часов на обеих платах.

После получения откалиброванных значений $bcid$ для всех событий на двух платах необходимо применить статистический алгоритм поиска точного временного сдвига между $bcid$ для двух плат. Для этого необходимо вырезать события с двух детекторов в некотором временном окне, используя $timestamp$. После вычислить разницу по $bcid$ между каждой парой событий первого и второго детекторов в данном окне и нанести их на гистограмму. Так как между событиями есть статистическая взаимосвязь на гистограмме появится пик, центр которого соответствует расхождению по $bcid$ для обеих плат. После необходимо произвести фитирование этого пика

и сопоставить события, используя полученное значение.

Полученные данные после стыковки сохраняются в отдельное дерево ROOT для последующей обработки. Например, для грубой оценки работоспособности будет построена карта попаданий и оценена ее равномерность.

4.2.3 Анализ данных

Для проведения данного эксперимента был произведен набор данных с детекторов продолжительностью в 8 часов. Запуск набора производился с минимальной задержкой между детекторами. Из-за разного количества трубок наборы данных содержат разное количество событий. Для дальнейшей работы данные были очищены от лишних событий на неподключенных каналах.

Т. к. наборы данных имеют физически разное время запуска, то для начала необходимо их грубо синхронизировать. Для этого были построены графики зависимости времени `bcid` от абсолютного `unix` времени для событий в каждом наборе. Причем переполнение счетчика раз в 100 секунд было скомпенсировано для получения линейной зависимости.

Судя по наблюдаемым графикам становится видно, что каждая из плат

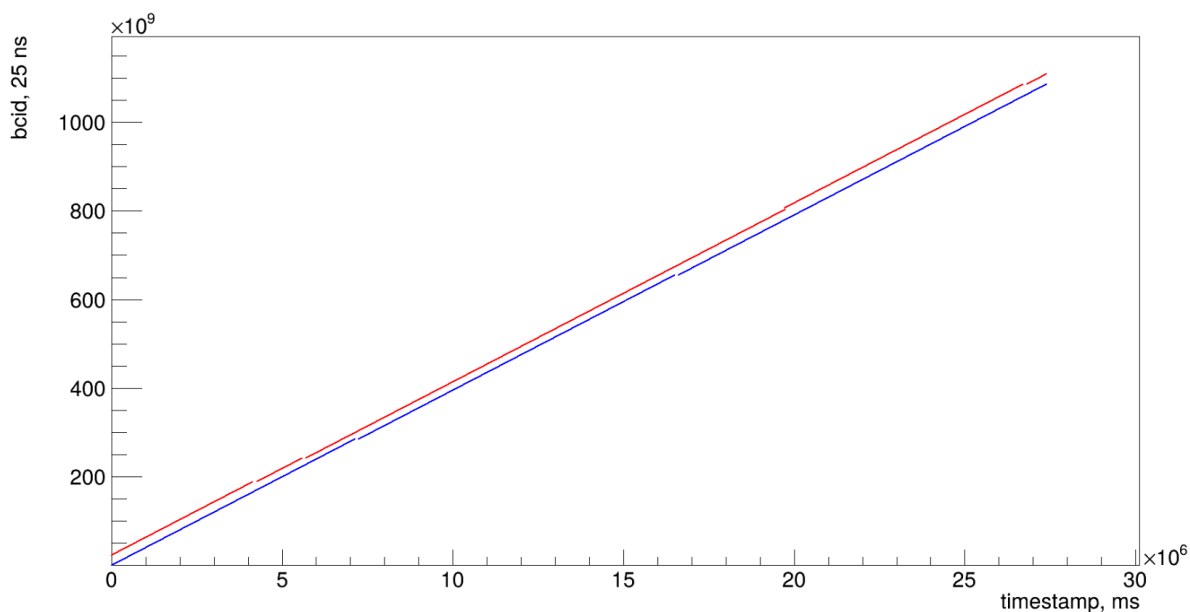


Рис. 14: Зависимость `bcid` от `timestamp` для каждого из детекторов. Синий - первый детектор, красный - второй. Каждое из событий нанесено точками.

STM-VMM прекращала свою работу на некоторое время (около 2х минут), а затем восстанавливала работу. Причиной этому служит зависание самих плат. Корреляции зависаний от качества питания платы, ее нагрева либо других факторов не выявлено. За 8 часовой набор плата первого детектора

зависала дважды, а второго четыре раза. Каждое зависание неизменно ведет к рассинхронизации плат и необходимости применения алгоритма синхронизации к каждому участку между зависаниями плат по отдельности. Для дальнейшего рассмотрения выберем и вырежем наибольший участок без зависаний обеих плат. В итоге получаем отрезок продолжительностью в 3 часа.

Необходимо учитывать что наборы изначально рассинхронизированы из-за разного по времени начала набора данных, кроме того, частота аппаратного кварца на обеих платах может незначительно различаться, что отражается на угле наклона графиков. Компенсируем это при помощи фитирования и полученных при этом параметров, тем самым добьемся тактовой частоты `bcid` в 40 МГц для обоих детекторов.

Классический алгоритм для данной задачи заключается в построении

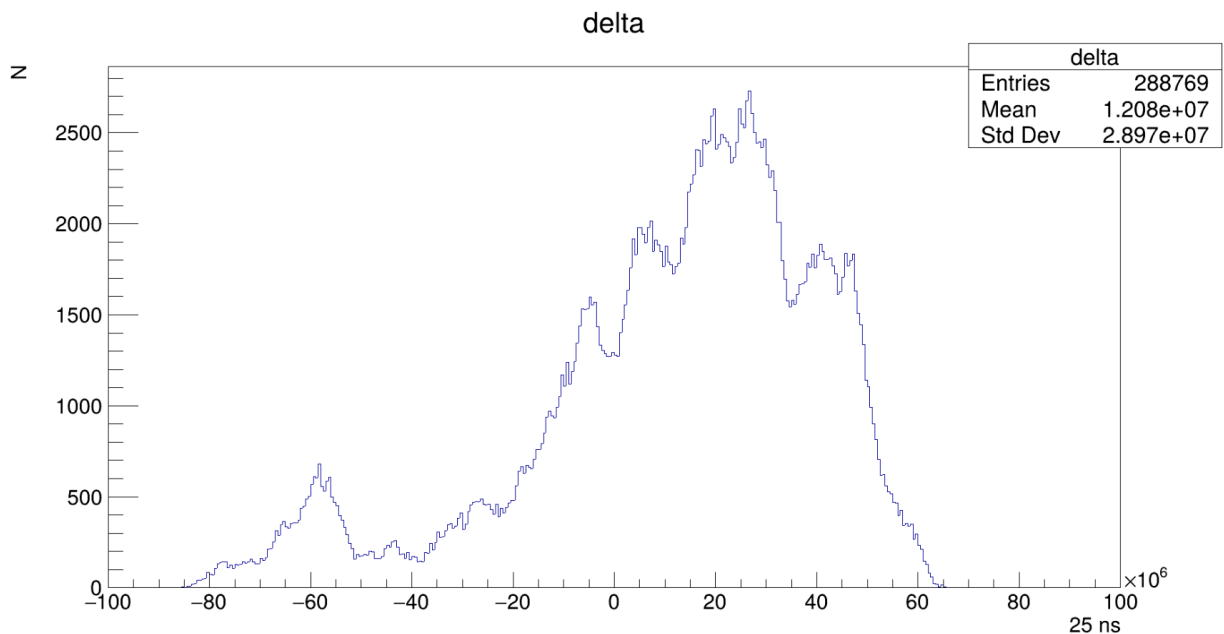


Рис. 15: Гистограмма распределения временной рассинхронизации событий двух детекторов.

гистограммы, содержащей расстояние во времени между каждой парой событий первого и второго детекторов. Так как мы предварительно синхронизировали наборы с точностью до 5 мс не имеет смысла брать пары событий, удаленных друг от друга на значительно большее значение. Поэтому написанный алгоритм ищет расстояние между парами событий в пределах 3 секунд и добавляет их в гистограмму, смещаясь затем на следующие 3 с.

При анализе полученного результата можно заметить, что полученная гистограмма обладает сразу несколькими выраженными пиками, которые накладываются друг на друга. Из этого можно сделать вывод что зависание плат во время работы происходит не только на длительное время (порядка двух минут), но и более часто на времена порядка 25 мс что и

приводит к рассинхронизации. Это делает невозможным применение метода программной синхронизации для этих плат.

4.3 Реализация метода синхронизации по внешнему триггеру

В качестве отдельного детектора, цель которого формировать сигнал триггер, желательно использовать детектор с хорошей временной привязкой. Самый простой вариант, подходящий как по качеству временной привязки, экономической целесообразности, площади для космических мюонов является сцинтилляционный детектор. Как следствие, дальнейшие эксперименты производились именно с таким типом детекторов.

Планируется реализация алгоритма синхронизации между сцинтиллятором и одним straw детектором. Используя данную реализацию возможно реализовать синхронизацию по внутреннему триггеру и использовать ее для масштабирования системы каскадных straw детекторов.

4.3.1 Установка #2

Данная установка была собрана с целью реализации метода синхронизации по внешнему триггеру. Состоит она из straw детектора, собранного из трубок длиной в 1000 мм, и сцинтилляционного детектора, выполняющего роль внешнего триггера. Площадь сцинтиллятора меньше, чем straw детектор, что позволит грубо произвести отладку реализации данного метода и убедиться в его работоспособности.

Установка #2 была собрана в г. Дубна ЛФВЭ. В качестве сцинтилляционного детектора использовался сцинтиллятор размерами 150 на 250 мм. К нему подключены два SiPm, сигналы с которых идут на схему совпадений, что необходимо для компенсации естественного шума SiPm.

Straw детектор в данной установке состоит из 17ти трубок. Суммарный объем трубок составляет:

$$V_1 = 17 * V_{1000} = 17 * 1.017\text{л} \approx 17.3\text{л}$$

По результатам наблюдений основной объем воздуха из детектора можно выгнать при объеме продуваемого газа в три раза превышающем его объем. Тогда для продува детектора в данной установке при потоке в 1 литр в час понадобится:

$$T_1 = 3 * 17.3/1\text{ч} \approx 52\text{ч} \approx 2\text{суток}$$

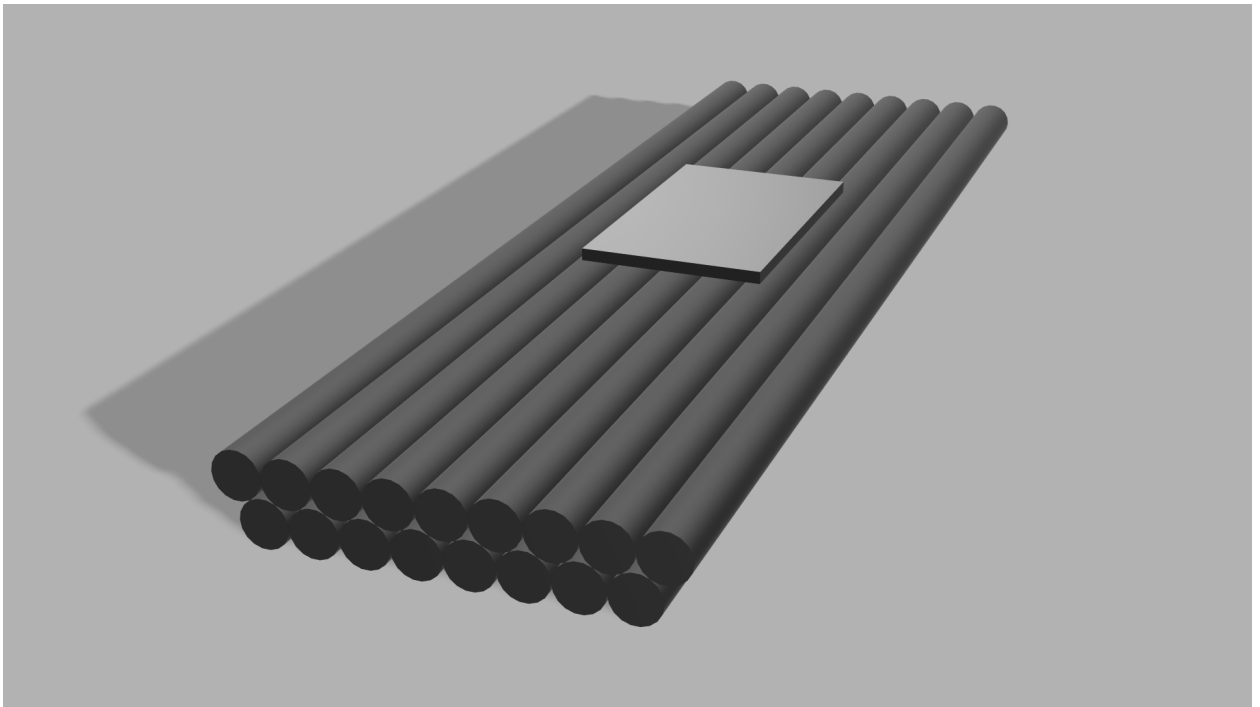


Рис. 16: Установка #2

После схемы совпадений сигнал со сцинтилляционного детектора поступает на усилитель-формирователь в роли которого использовался CAEN FERS. На выходе формируется сигнал-триггер продолжительностью в 100 нс, который поступает на вход stm32g4 на плате STM-VMM.

Сцинтиллятор лежит сверху straw детектора, что обеспечивает практически 100% геометрическую эффективность. Кроме того, его возможно перемещать, наблюдая за откликом в распределении числа событий в трубках straw детектора.

4.3.2 Алгоритм синхронизации

Время считывания информации stm32g4 из VMM занимает порядка 10 - 18 мкс (в зависимости от количества одновременно сработавших трубок). Как следствие, в зависимости от времени прихода внешнего триггера, можно выделить три возможных ситуации: сигнал триггера опережает частицу; сигнал триггера приходит во время считывания данных из VMM; сигнал триггера приходит после считывания данных с фиксированной задержкой. На практике разница во времени между сигналом триггера и приходом частицы в первом случае редко превышает предел в 5-10 микросекунд (только если для формирования триггера используется детектор с плохой временной привязкой, например очень большим временем дрейфа). Как следствие первый случай можно объединить со вторым. Третий же случай требует отдельной реализации.

Идея реализации метода для первых двух случаев заключается в следующем: на stm32g4 реализуются два прерывания, одно для сигнала триггера, другое для считывания данных с VMM. Причем приоритет прерывания у триггера выше. Это означает что прерывание триггера выполнится сразу по приходу самого сигнала, без задержек. Если сигнал триггера придет в момент считывания данных из VMM, то считывание приостановится, произойдет обработка сигнала триггера, а далее считывание продолжится. Сама обработка сигнала триггера заключается в двух вещах: записать время прихода сигнала по внутренним часам stm32g4, работающим с временным шагом в 25 нс, кроме того, поднять флаг, информирующий дальнейшие алгоритмы о приходе сигнала триггера. Как следствие, прерывание, вызванное приходом сигнала триггера очень короткое, и занимает порядка 70 - 100 нс. В конце чтения данных из VMM производится проверка флага триггера. При положительном результате сравнивается время между приходом триггера и прилетом частицы (это время записывается в начале чтения по тем же часам, что и время прихода триггерного сигнала). Если разница во времени по модулю между этими событиями меньше установленного значения, то производится отправка данных на ПК по средствам USB - UART протокола, иначе опускается флаг триггера и система продолжает работу.

Для третьего случая необходимо усложнить алгоритм. Добавляется специальный быстрый буфер - FIFO. Он циклически записывает все события из VMM. Размер этого буфера подбирается в зависимости от потока частиц и времени задержки триггера. Циклическая запись означает, что если все ячейки буфера уже записаны, перезаписывается самое старое событие. В момент прихода триггера выполняется прерывание, в котором находится разница во времени между приходом триггера и временем прихода каждого события в FIFO. Из массива задержек выбирается та, которая наиболее близка к заданному значению задержки триггера. Между этим значением и заданной задержкой находится разница во времени. Если эта разница по модулю меньше чем заданное значение погрешности событие отправляется на ПК, в противном случае система продолжает свою работу.

Задержка между приходом частицы через сцинтиллятор и фронтом сигнала триггера менее 100 нс. Данная установка соответствует первому + второму случаю, поскольку примерное время дрейфа газового straw детектора составляет около 2 мкс. Как следствие сигнал триггер может как опередить прерывание для считывания данных из VMM, так и прийти во время него.

Для оценки эффективности связки сцинтиллятор + straw детектор каждый сигнал триггера записывается совместно с данными straw детектора в

единое дерево ROOT. Если по приходу сигнала триггера straw детектор не обнаруживает частицу, то записывается пустое событие, содержащее данные о времени прихода сигнала триггера.

Третий случай программно реализован, но так и не был проверен на практике. Причиной этому послужило отсутствие возможности добраться до установки для ее модификации (увеличении задержки сигнала триггера). Все написанное ПО доступно в репозитории github[4].

4.3.3 Анализ работоспособности метода по перемещению сцинтиллятора

Основная идея проверки работоспособности метода синхронизации по внешнему триггеру в данной установке заключается в двух вещах, проверки смещения плато на распределении по каналам straw детектора вслед за смещением сцинтиллятора и сравнения эффективности всей установки с теоретически ожидаемым значением.

Поскольку детектор двухслойный, то для явного выделения плато произведем анализ данных по отдельности для каждого слоя.

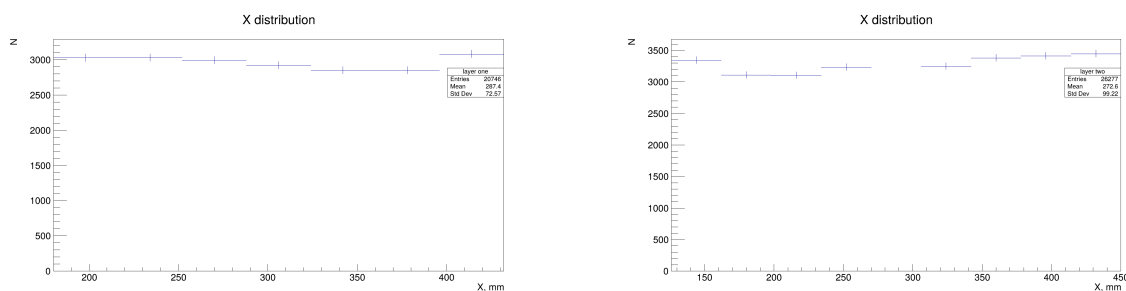


Рис. 17: Распределение по каналам каждого слоя без синхронизации

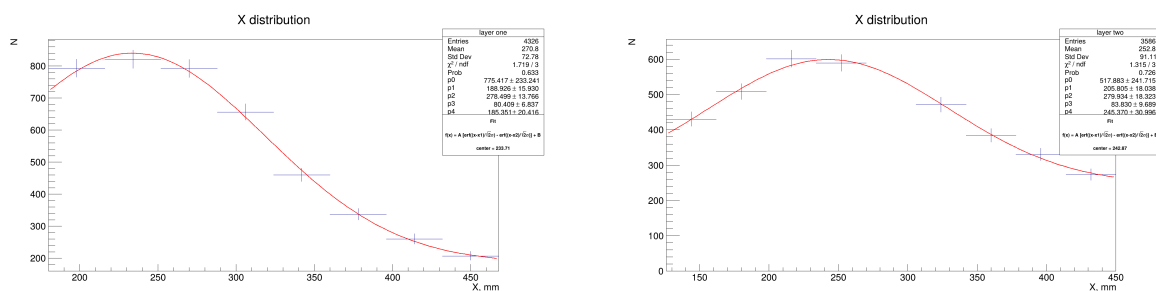


Рис. 18: Распределение по каналам каждого слоя после синхронизации, сцинтиллятор в 250 мм от края

Произведено три набора данных. Первый набор выполнен без алгоритма синхронизации (рисунок 17), второй со сцинтиллятором, расположенным в 250 мм от края детектора (рисунок 18) и третий со сцинтиллятором расположенным на краю детектора (рисунок 19).

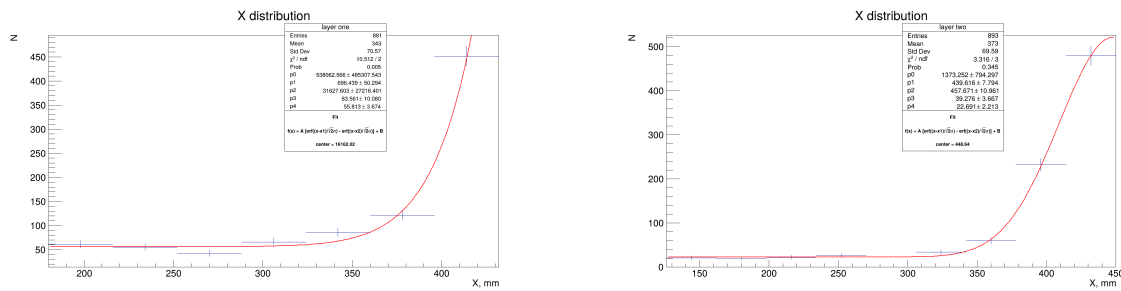


Рис. 19: Распределение по каналам каждого слоя после синхронизации, сцинтилятор на краю

Распределение в наборах со сцинтилятором представляет собой сложную свертку геометрии и распределения самих мюонов по полярному углу ($\propto \cos^2(\theta)$). Визуально оно напоминает полку с плавно спадающими краями. Полка соответствует положению сцинтилятора. Как следствие для фитирования этого распределения в упрощенном варианте была взята свертка распределения гаусса с функцией прямоугольника. Из-за малой статистики погрешность в корень из числа событий в каждом канале слишком велика, что и приводит к $\chi^2/\text{NDF} \approx 0.3$.

Определим положение сцинтилятора по положению пика функции фита. В первом случае положение пика для каждого из слоев 233.7 и 242.9 мм соответственно. Среднее значение 238.3 мм. Для второго случая в первом слое слишком мало событий в районе начала пика, в итоге функция фита получилась некорректной. Возьмем данные со второго слоя, центр пика равен 448.6 мм. Соответственно перемещение сцинтилятора согласно обработанным данным составляет 210.3 мм, что хорошо согласуется с реальным перемещением в 200 мм. Это говорит о работоспособности метода синхронизации - алгоритм сопоставляет события корректно что позволяет определять положение сцинтилятора. Следующим этапом проверки является оценка эффективности регистрации событий установкой.

4.3.4 Анализ эффективности

Для анализа эффективности в прошивку намеренно добавлен функционал записи дополнительных событий, при регистрации сигнала триггера. Это позволяет оценить суммарную эффективность регистрации данной установки по следующей формуле: $\varepsilon_{\Sigma} = \frac{N_{\text{tube events}}}{N_{\text{trigger events}}}$. В свою очередь: $\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_{\text{geometry}} * \varepsilon_{\text{tube}} * \varepsilon_{\text{firmware}}$, где под геометрической эффективностью понимается доля от всех частиц геометрически способная пролететь через оба детектора, $\varepsilon_{\text{tube}}$ - эффективность регистрации мюонов straw детектором, $\varepsilon_{\text{firmware}}$ - эффективность работы алгоритма синхронизации. Установка

специально собрана так, что при положении сцинтиллятора в центре детектора $\varepsilon_{\text{geometry}} \approx 100\%$. При этом вероятность регистрации частиц двухслойным straw детектором с гексагональной компоновкой трубок стремиться к 100%, то есть $\varepsilon_{\text{tube}} \approx 100\%$. Как следствие $\varepsilon_{\text{firmware}} \approx \varepsilon_{\Sigma}$.

Полученные следующие результаты за получасовой набор: $N_{\text{tube events}} = 2868$, $N_{\text{trigger events}} = 5690$. Эффективность работы алгоритма составляет: $\varepsilon_{\text{firmware}} \approx \frac{2868}{5690} \approx 50\%$. Полученный показатель говорит об ошибке в работе алгоритма. Данный алгоритм стыкует данные корректно, согласно предыдущей проверке, но упускает часть совпадений, что и приводит к низкой эффективности.

Данная ошибка была найдена и устранена на этапе работы с установкой #3. Заключалась она в неправильной расстановке приоритетов прерываний микроконтроллера stm32g4. Приоритет прерывания по сигналу триггеру был установлен ниже приоритета прерывания на считывание данных из VMM3A. Это приводило к тому что в случае опережения сигналом триггером прерывания для считывания данных из VMM3A алгоритм игнорировал этот сигнал. Такая ситуация возможна из-за времени дрейфа электронов в трубках straw детектора (около 1-2 мкс) и происходит в половине случаев. В оставшейся половине сигнал триггер приходил во время работы прерывания посчитываю данных из VMM3A и из-за своего низкого приоритета выполнялся после него, и как следствие регистрировался системой. Правильная реализация описана в пункте 4.1 текущей работы.

На момент исправления ошибки установка #2 была разобрана. В связи с переездом в город Алматы доступ к компонентам установки #2 отсутствовал. Из доступных компонентов была собрана установка #3, в которой невозможно было реализовать внешний триггер из-за отсутствия детекторов на эту роль. Как следствие дальнейшая проверка эффективности, так и не была произведена.

4.4 Реализация метода синхронизации по внутреннему триггеру

4.4.1 Установка #3

Данная установка была собрана с целью реализации метода синхронизации двух и более straw детекторов. Состоит она из трех straw детекторов, расположенных каскадно, параллельно друг ко другу. Такая компоновка используется специально для последующей проверки алгоритма синхронизации.

Установка #3 была собрана в г. Алматы КазНУ. Верхний детектор собран из 1000 мм трубок в количестве 26ти штук. Средний из 32х трубок

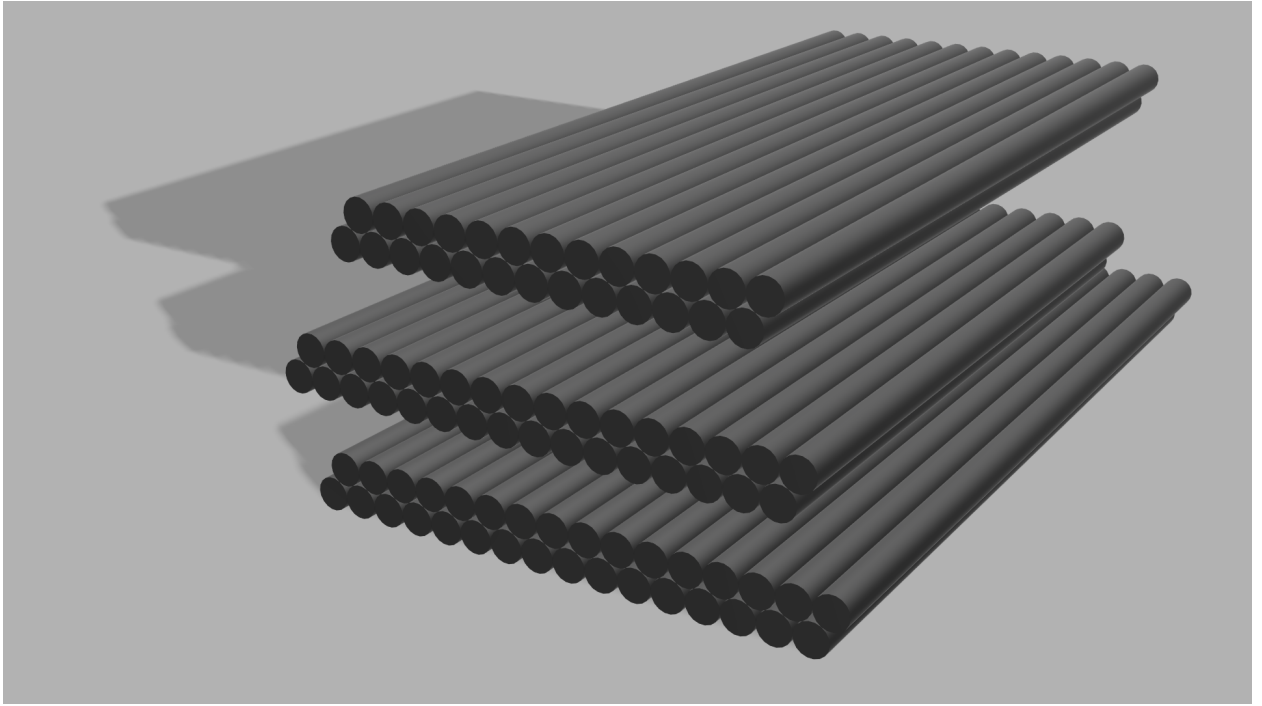


Рис. 20: Установка #3

800 мм длиной. Нижний из 32х 1000 мм длиной. Суммарный объем трубок в трех детекторах составляет:

$$V_2 = (26 + 32) * V_{1000} + 32 * V_{800} = 58 * 1.017\text{л} + 32 * 0.814\text{л} \approx 85.0\text{л}$$

85 литров составляют существенный объем. Найдем примерное время, необходимое для продува детектора после завоздушивания:

$$T_2 = 3 * 85 / 1\text{ч} \approx 255\text{ч} \approx 11\text{суток}$$

Принцип работы данной установки заключается в следующем: самый верхний детектор при обнаружении частицы сам формирует сигнал триггер, который передается среднему детектору. Тот при обнаружении одновременно и сигнала триггера и частицы отправляет данные на запись. Независимо от этого средний детектор, по аналогии с верхним, формирует сигнал триггер для нижнего при обнаружении частицы.

4.4.2 Алгоритм синхронизации

В отличие от предыдущего метода данные представляет большую сложность, так как в случае внешнего триггера случайность вносит время дрейфа электронов в трубках каждого детектора в системе по отдельности. При синхронизации только между straw-детекторами время дрейфа вносит случайную погрешность, пропорциональную числу детекторов в системе. Для

снижения этого фактора детекторы синхронизируются парами, например в случае трех детекторов в системе первый синхронизируется со вторым, второй с третьим.

При таком способе синхронизации также можно выделить три случая, причем аналогично объединить первый со вторым. Третий случай не находит практического смысла при данном методе синхронизации событий и как следствие не рассматривался.

Алгоритм синхронизации принципиально ничем не отличается от метода с внешним триггером, за исключением в необходимости формировать сигнал триггер каждым детектором самостоятельно для следующего в цепочке. Для минимизации задержки сигнала триггера в итоговой программе его формирование начинается первым действием при срабатывании прерывания на чтение данных из VMM3A. Следующий в цепочке детектор ориентируется на фронт сигнала триггера. Примерная задержка сигнала триггера в этом случае состоит из времени дрейфа детектора формирователя сигнала и задержки stm32g4 на активацию прерывания и формирование сигнала, что в конечном итоге составляет около 1-2 мкс для данных straw-трубок.

4.4.3 Программная стыковка данных на ПК

Финальным этапом синхронизации данных является их программная стыковка на ПК. Платы STM-VMM обладают неприятной особенностью в виде их случайного зависания во время работы. Данная проблема ограничивает спектр возможных методов программной стыковки данных. Рассмотрим на примере: за одинаковое время набора два детектора, подключенные к одному и тому же внешнему сигналу триггеру, в большинстве случаев запишут разное количество триггерных событий. Вызвано это тем что платы могут зависнуть в случайный момент времени, тем самым начав игнорировать сигнал триггер на время зависания. Как следствие, при последующей обработке данных состыковать события становится не возможным, поскольку вычислить точные моменты времени в которые произошло зависание каждой платы проблематично. Кроме того, вычислить число пропущенных событий зачастую не представляется возможным. Мной были приняты две попытки стыковки данных, при помощи статистики и с использованием времени прихода каждого события по unix времени ПК и внутренним часам платы. Обе попытки не принесли плодотворных результатов. В случае статистического метода погрешность стыковки превышает временные интервалы между соседними событиями, поскольку сама статистика накапливается медленнее, чем происходит расхождение внутренних

часов различных плат. Постоянная рассинхронизация часов происходит из-за большого времени дрейфа электронов в трубках, используемых в данной работе. В случае с временем прихода каждого события ситуация аналогичная, абсолютное unix время не обладает достаточной точностью, а внутренние часы плат расходятся.

Для решения проблемы с зависанием плат был произведен анализ проблемы. По мере наблюдений выявлено три вида зависаний:

- Зависание плат при большом потоке данных с VMM3A.
- Полное зависание платы с выводом только при помощи физической перезагрузки.
- Зависание плат в случайный момент времени с возможностью вывода их в работоспособное состояние путем отправки конфигурационных данных с ПК.

Первый вид зависаний возникает при большом потоке данных с VMM3A. Время чтения данных одного события из VMM3A составляет порядка 10-18 мкс. Такое большое время вызвано пределом возможностей stm32g4. Как следствие при потоке данных с VMM3A выше 55 КГц микроконтроллер не будет успевать считывать данные из VMM3A что приведет к потере событий и как следствие наложения прерываний, вызывающее зависание микроконтроллера. На практике оказывается что данный эффект наблюдается уже при потоке в 10 КГц и выше. На правильно настроенном детекторе из установки в данной работе такие потоки не достигаются, как следствие для текущей работы данные зависания не являются проблемой.

Второй вид зависаний встречается крайне редко. Точные причины ее возникновения не известны. Как правило, проявляется при начале первого набора после подключения питания к плате. Из-за редкости возникновения и проявления на старте не представляет собой проблему.

Третий вид зависаний представляет наибольшую проблему. Разработчик программы конфигуратора на ПК для данных плат предпринял попытку купирования данной проблемы путем отправки конфигурационного файла платам каждые 120 секунд. Для независимой работы детекторов данный способ приемлем, но он не способен решить проблему стыковки данных с нескольких детекторов. Причиной данных зависаний может служить впадание микроконтроллера stm32g4 в бесконечный цикл на каком-то этапе выполнения программы. Причем получение любых данных от ПК по средствам USB UART протокола способно вывести микроконтроллер из бесконечного цикла. При анализе прошивки было выявлено несколько участков кода, подозреваемых на роль возникновения данной ошибки.

Но никакие исправления, внесенные в код не помогли устранить проблему. Становится возможным сделать вывод о том, что зависание плат в бесконечном цикле находится где-то в другой части программы, или же ее библиотек. Так как решить проблему этого вида зависаний не вышло, необходимо ее купировать.

Для купирования проблемы принято решение стыковать данные на этапе их получения персональным компьютером. На установке #3 поток тройных совпадений не превышает 100 Гц, как следствие, становится возможным, стыковка по фактическому времени прихода данных с каждой из плат. Произведена доработка программы конфигулятора целью которой стало вычисление временных интервалов между приходом событий с определенного числа плат, одновременно подключенных к ПК. В случае установки #3 это число равно трем. Если данные временные интервалы лежат во временном окне заданной длины, которое составило 1 мс для установки #3, программа записывает данные одновременно со всех плат как событие в дереве root. Данный подход позволяет получать уже состыкованные данные со всех straw детекторов, готовые к последующей обработке, и, кроме того, полностью купирует проблему случайного зависания плат. В случае зависания какой-либо платы данные от нее не приходят и запись событий на диск не происходит. После получения конфигурационного файла плата отвисает, установка продолжает работу. Код программы конфигулятора можно найти в репозитории[3].

4.4.4 Анализ данных

Установка #3 по началу содержала сцинтилляционный детектор. Но было выявлено, что между событиями в сцинтилляторе и straw детекторах нет никакой корреляции. То есть мюоны, которые регистрирует сцинтиллятор, невидимы для straw детекторов. Как следствие использовать его в качестве внешнего триггера, как в установке #2 не получится. Было принято решение реализовать только систему с внутренним триггером, то есть straw детекторы сами формируют сигнал триггер для следующего по цепочке детектора.

Для алгоритма валидации произведем набор тройных совпадений. По крайним детекторам построим линейную функцию - предполагаемый трек мюона в установке. Далее теоретически предскажем какой канал в среднем детекторе должен был сработать. Затем найдем расхождение между предсказанием и реальным значением.

Данный метод чувствителен как к точности работы алгоритма синхронизации, так и к точности соответствия программно выстроенной геомет-

рии детекторов реальной. К преимуществам метода относится независимость от числа рабочих каналов и их расположения в детекторе; простота реализации; точность валидации данных.

События, затронувшие более двух трубок за раз в любом из детек-

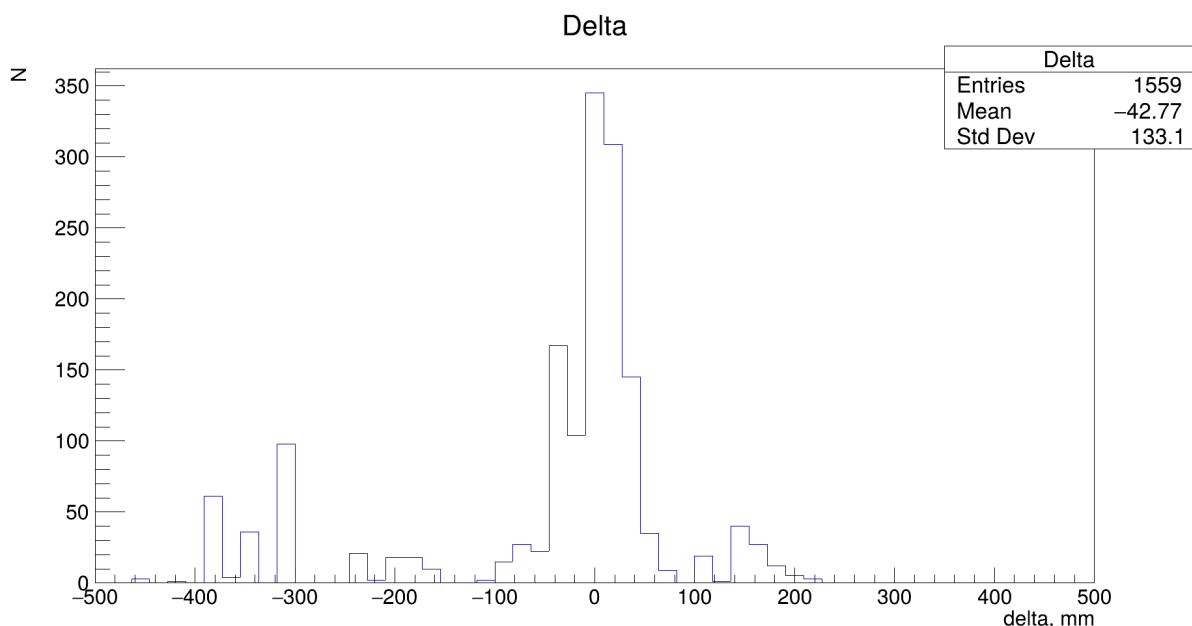


Рис. 21: Распределение невязки по координате X между измеренным и теоретически предсказанным событием в среднем детекторе

торов игнорировались. Случаи срабатывания двух трубок не по порядку отсекались аналогично. Ширина одного бина соответствует радиусу трубки. Анализируя результат можно сделать вывод, алгоритм стыкует данные верно, кроме того построенная программно геометрия близка к реальной. Но алгоритм пропускает множество ложных событий. Ложные события в купе с погрешностью геометрии увеличивают разброс пика по горизонтали.

Предположительно причиной ложных событий служит слишком большое временное окно для сопоставления событий в программе конфигураторе. Для двух из трех детекторов поток частиц ограничен алгоритмом синхронизации, в отличие от первого детектора, начинающего цепочку триггеров. В связи с этим скорость счета первого в цепочке детектора не ограничена и слишком высока для выбранного временного окна. В качестве решения рассматривается реализация закольцованного триггера - от самого последнего детектора в цепочке к самому первому. Это ограничит поток и как следствие исправит ситуацию.

Все ложные события легко отфильтровать используя этот же алгоритм. Дальнейшая модификация алгоритма синхронизации данных с детекторов может снизить разброс и тем самым увеличить эффективность. Кроме того позволит использовать менее трех детекторов для синхронизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы введено в эксплуатацию три установки на основе каскадно расположенных straw детекторов; произведена проверка работоспособности straw детекторов по отдельности; реализовано три метода синхронизации событий в детекторах; произведена модификация программы конфигурирования для стыковки данных на этапе их записи на диск; произведена проверка реализованных методов.

Установлены рекомендуемые параметры для запуска straw детекторов в установках с данной электроникой, показана работоспособность детекторов на основе распределения космических мюонов по потерям энергии в детекторе и распределения потока частиц по каналам.

Реализовать программный способ синхронизации событий на данных установках затруднительно и не целесообразно. Синхронизация по внешнему триггеру работает стабильнее и более предсказуемо, чем синхронизация по внутреннему триггеру. Причиной этому служит меньшее влияние времени дрейфа в straw детекторах на результат синхронизации.

По итогам использования, модифицированная программа конфигурирования полностью купирует проблему зависания плат, позволяя проводить длительные по времени наборы данных. Кроме того значительно упрощает обработку данных с установки.

Результаты проверки метода синхронизации с внешним триггером гарантируют работоспособность метода, при этом указывают на потери событий. Потери были вызваны ошибкой в ПО, после исправления которой произвести повторную проверку не удалось, в связи с отсутствием нужного оборудования.

Результат валидации данных в методе синхронизации по внутреннему триггеру показал работоспособность метода и возможность его применения в текущем виде с условием дополнительной фильтрации. Для дальнейшей доработки метода необходимо устранить недочет в ПО, результатом которого являются ложные события. Выдвинуты предположения с локализацией проблемы и идея по ее устранению.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ASIC (Application Specific Integrated Circuit) - интегральная схема специального назначения. Представляет собой полупроводниковый прибор изготавливаемый методом литографии для решения определенных инженерных задач.
- VMM3A - ASIC, разработанный в CERN для обновления эксперимента ATLAS. Выполняет функции обработки и измерения характеристик сигнала в многоканальных детекторах.
- STM-VMM - готовое устройство на основе ASIC VMM3A и микроконтроллера stm32g4, распаянных на одной печатной плате. Выполняет функции обвязки для данных микросхем, полного цикла обработки сигнала и оцифровки его характеристик, стыковки данных и отправки их на ПК.
- TWC (Time Walk Correction) - скользящая временная корректировка. Алгоритм коррекции задержек временной привязки, интегрированный в дискриминаторы VMM3A по каждому каналу.
- TDC (Time to Digital Converter) - преобразователь времени в амплитуду. Устройство, измеряющие временные интервалы путем преобразования их в напряжение на емкости памяти и последующей оцифровки.
- CA (Charge Amplifier) - зарядочувствительный усилитель. Устройство для усиления сигнала, хранящего информацию о собранном заряде.
- SPI (Serial Peripheral Interface) - последовательный периферийный интерфейс. Представляет собой протокол обмена данными между двумя неравноправными в сети электронными устройствами.
- UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) - универсальный асинхронный приемопередатчик. Протокол обмена данными между равноправными устройствами, реализующийся по средствам специальных микросхем, зачастую интегрированных внутри электронных устройств.
- DDO (Direct Data Output) - прямой цифровой выход. Протокол обмена данными, использующийся VMM3A для передачи данных микроконтроллеру.
- USB (Universal Serial Bus) - универсальная последовательная шина. Универсальный протокол обмена данными между периферийными устройствами и ПК.

- COM порт (сокращение от Communication port) - аппаратный интерфейс для последовательной передачи данных между компьютером и внешними устройствами.
- DAC (Digital Analog Converter) - цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Устройство преобразующее цифровой сигнал в аналоговый.
- ADC (Analog Digital Converter) - аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Устройство оцифровывающее аналоговый сигнал. Преобразует амплитуду аналогового сигнала на входе в цифровой код.
- PDO (Peak Detector Output) - выход сигнала пикового детектора. Один из аналоговых выходов VMM3A передающий информацию о собранном заряде на одном из каналов.
- TDO (Time Detector Output) - выход сигнала временной привязки. Один из аналоговых выходов VMM3A передающий информацию о временной привязки сигнала через амплитуду.
- MO (Monitor Output) - мониторный выход. Один из аналоговых выходов VMM3A передающий сигнал с детектора после усиления.
- BGA (Ball Grid Array) - сетчатый массив шаров. Один из способов поверхностного монтажа устройств, таких как интегральные микросхемы, на печатную плату.
- ROOT (сокращение от ROOT framework) - фреймворк для языка C++. Содержит комплекс инструментов для анализа, хранения, обработки данных для решения задач в сфере физики элементарных частиц.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Walenta A.H. “The Time Expansion Chamber”. В: *NIM 161* (1979).
- [2] C. Amsler и Particle Data Group. “Passage of particles through matter”. АНГЛ. В: *Physics Letters B* 667 (2008). Particle Physics Booklet.
- [3] Tishkov Artyom. *STM-VMM configurator*. 2026. URL: <https://github.com/retr0n1p1/vmmConfigurer.git>.
- [4] Tishkov Artyom. *VMM3A trigger firmware*. 2026. URL: <https://github.com/retr0n1p1/VMM3Atrig.git>.
- [5] Vitalii Bautin и др. “VMM3 ASIC as a potential front end electronics solution for future Straw Trackers”. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1047 (2023), с. 167864. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167864>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900222011561>.
- [6] TW. Blum. “HParticle Detection with Drift Chambers”. В: *Springer* (2008).
- [7] The ATLAS Collaboration. “Intermediate Conversion Stage for the Low Voltage System of the ATLAS New Small Wheel Project”. В: (2016).
- [8] W. Hennig и др. “Clock and Trigger Synchronization between Several Chassis of Digital Data Acquisition Modules”. АНГЛ. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* (2007). arXiv: [nuc1-ex/0701016](https://arxiv.org/abs/nuc1-ex/0701016).
- [9] H. J. Hilke и W. Riegler. “Gaseous Detectors”. АНГЛ. В: *Particle Physics Reference Library: Volume 2: Detectors for Particles and Radiation*. 2020, с. 91–136.
- [10] George Iakovidis. *The VMM3a User’s Guide*. АНГЛ. Тех. отч. ATL-MUON-PUB-2022-002. All figures including auxiliary figures are available at <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PUBNOTES/ATL-MUON-PUB-2022-002>. Geneva: CERN, апр. 2022, с. 21. URL: <https://cds.cern.ch/record/2807691>.
- [11] L. D. Landau. “On the energy loss of fast particles by ionization”. АНГЛ. В: *J. Phys. (USSR)* 8 (1944), с. 201.
- [12] S. H. Oh, C. H. Wang и W. L. Ebenstein. “Performance of a multinode straw tube detector”. АНГЛ. В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2015).
- [13] Fabio Sauli. “Gaseous Detectors”. АНГЛ. CERN Yellow Reports: School Proceedings. 2014.
- [14] М. А. Банщикова. “Исследование жесткой компоненты космических лучей с помощью Straw-детектора”. В: (2026).
- [15] Б. С. Ишханов, И. М. Капитонов и Э. И. Кэбин. *Частицы и ядра. Эксперимент*. МАКС Пресс, 2013.
- [16] Г. Д. Кекелидзе и В. Д. Пешехонов. “Прецизионные трековые детекторы на основе тонкопленочных дрейфовых трубок (straw)”. В: *Физика элементарных частиц и атомного ядра* 33.3 (2002).