

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И ИННОВАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

АЛМАТИНСКИЙ ФИЛИАЛ НИЯУ МИФИ

**ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

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

Студент
Научный руководитель
Научный консультант

Тишков Артем Викторович
Садуев Нуржан Орынбасарович
Баутин Виталий Викторович

Алматы - 2026 г.

Содержание

1	Введение	3
2	Цели и задачи	4
3	Устройство установок	5
3.1	Параметры трубок	5
3.2	Конструкция детектора	5
3.3	Электроника	6
3.4	Установка #1	8
3.5	Установка #2	9
4	Реализация методов синхронизации	11
4.1	Синхронизация по внешнему триггеру	11
4.2	Синхронизация двух и более straw-детекторов без внешнего триггера	12
4.3	Программная стыковка данных на ПК	13
5	Анализ данных с одного детектора	16
5.1	Структура данных с STM-VMM	16
5.2	Очистка данных	16
5.3	Получение распределения энергетических потерь космических мюонов в детекторе	17
6	Валидация синхронизации через анализ данных	18
6.1	Анализ по перемещению сцинтиллятора в установке #1	18
6.2	Анализ эффективности в установке #1	20
6.3	Анализ данных с установки #2	21
7	Заключение	22
8	Дальнейшие цели	23

1 Введение

В данной работе будет рассмотрено две 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)[6]. 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)[6]. 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.[5].

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[4] и разработке методов ее применения в виде систем из нескольких детекторов.

2 Цели и задачи

- Реализовать метод синхронизации по внешнему триггеру.
- Реализовать метод синхронизации между двумя и более straw детекторами без внешнего триггера.
- Устранить или купировать проблему с зависаниями плат.
- Проанализировать наборы данных с космическими мюонами.
- Используя результаты анализа сделать выводы о работоспособности методов синхронизации.

3 Устройство установок

3.1 Параметры 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:

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

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

Стенки трубок выделяют различный газ, который при эксплуатации детектора засоряет исходную газовую смесь внутри. В связи с этим детекторы необходимо продувать на постоянной основе. С учетом большого объема камер детекторов перед запуском необходима тщательная продувка.

В электронике детектора применены фильтрующие и разделительные конденсаторы с максимальным допустимым рабочем напряжением в 3 КВ. В связи с этим, для минимизации рисков, выбрана смесь газа из аргона и углекислого газа в пропорции 93% к 7% соответственно. Давление газовой смеси в детекторе незначительно превышает атмосферное. Оптимальное рабочее напряжение составило 1830 В. Повышение концентрации углекислого газа в смеси повлекло бы за собой необходимость в увеличении рабочего напряжения, так как для стабильной работы электроники необходимо обеспечить достаточный уровень газового усиления.

3.2 Конструкция детектора

Детекторы представляют собой двухслойную структуру из straw трубок. Всего детектор рассчитан на установку до 32х трубок, по 16 на каждый слой. Трубки скомпонованы гексагонально.

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

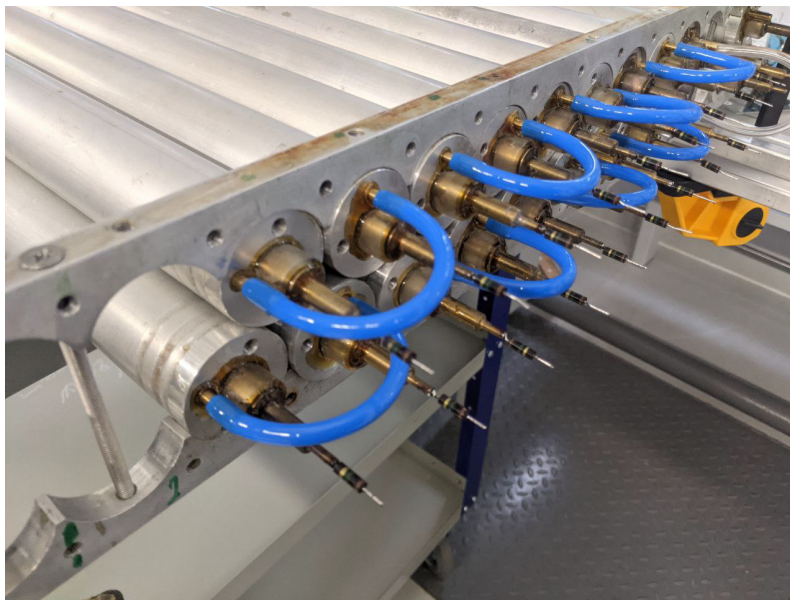


Рис. 1: Конструкция детектора

фиксируются друг над другом, образуя каскады. Это позволяет жестко фиксировать их под определенными углами друг ко другу.

3.3 Электроника

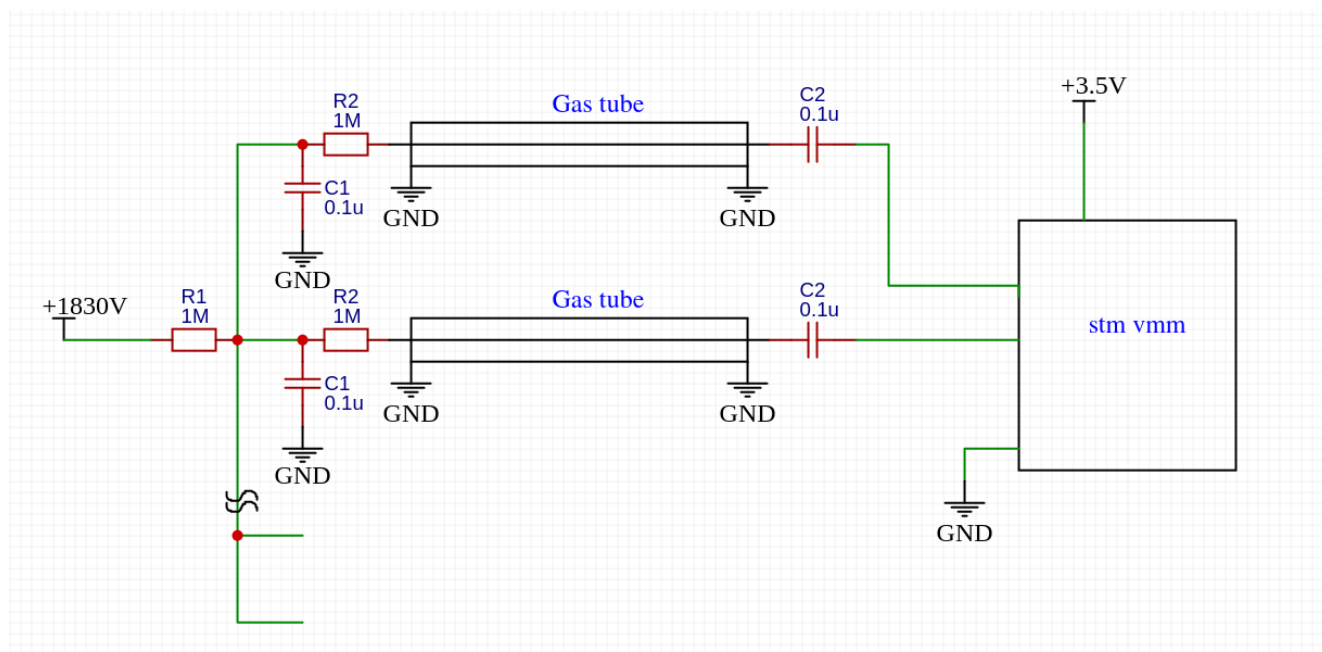


Рис. 2: Принципиальная схема электроники детектора

После подачи высокого напряжения ток в цепи каждого отдельного детектора составляет приблизительно 500 мкА и со временем снижается до 25 мкА. Причиной этому может служить засорение анодной проволоки пылью, частицами, выделяемыми стенками трубок, точечным отслаиванием покрытия анодной проволоки до начала эксплуатации детектора. Под действием высоко-

го напряжения в местах засорения образуется коронный разряд, что вызывает повышенное потребление тока детектором. Под действием коронного разряда засорение локально нагревается и выгорает со временем, сглаживая поверхность анодной проволоки. До стабилизации тока в цепи высокого напряжения данные с него некорректны. Процесс стабилизации занимает около суток при постоянной подаче высокого напряжения.

Для сбора данных с детектора используется STM-VMM. Это устройство разработано Виталием Баутиным в марте 2025 года[4]. 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 (DAC) 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. Основная часть данных от VMM3A передается через spi интерфейс. После считывания stm32g4 записывает данные во временный буфер, затем отправляет через uart интерфейс на ПК.

На STM-VMM физически реализовано 32 канала из 64. Каждый из каналов подсоединен через супрессор, обеспечивающий защиту от статического электричества. При пролете частицы импульсы тока собираются напрямую с выходов трубок через внешний разделительный конденсатор C2 (см. рис. 2) в пропорциональном режиме. Это дает возможность как измерять ионизационные потери прошедшей через детектор частицы, так и поток частиц.

На устройстве реализовано две независимые схемы питания - для VMM3A и stm32g4. Напряжение питания VMM3A составляет от 2 В до 3,5 В, ток потребления зависит только от режима работы и настроек VMM3A и может изменяться в диапазоне от 0,5 А до 1,5 А. Для избежания пульсаций напряжения на плате установлен линейный стабилизатор на 3 В. Для питания stm32g4 используется маломощный линейный стабилизатор на 3,3 В. Напряжение на него поступает напрямую с USB порта ПК.

Для управления устройством с ПК используется специальная программа, разработанная на с++ и QT. Она позволяет подключаться к COM порту, тем самым устанавливая связь с устройством посредством USB UART интерфейса, установленного на STM-VMM. В программе реализован интерфейс для гибкой настройки режимов работы VMM3A, тестирования работоспособности электроники, простая фильтрация данных по каналам. Данные сохраняются программой в виде дерева ROOT. Настройки можно сохранить в виде конфигурационного файла.

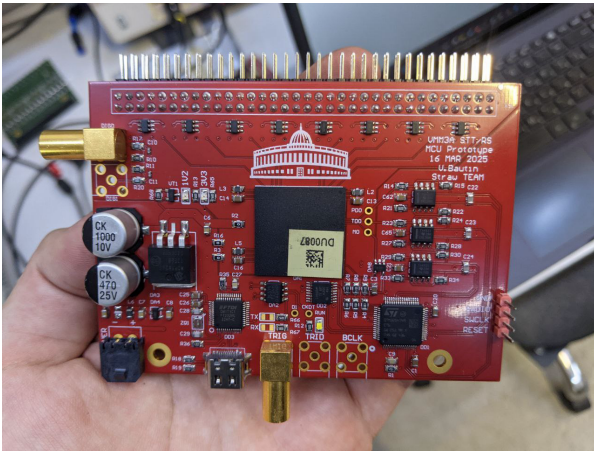


Рис. 3: Stm vmm

Для разделения сигналов с каждой из трубок высокое напряжение на них подается через отдельные резисторы R2 (см. рис. 2). Для обеспечения минимальных задержек и искажений сигнала STM-VMM устанавливается напрямую на детектор рис. 4). Это позволяет получить хорошее качество сигналов без применения предусилителей и согласованных линий. Плата монтируется при помощи 64 контактной колодки, из которых 32 контакта передают сигнал с каждой из трубок, остальные заземлены. Колодка симметрична поворотам, что позволяет устанавливать STM-VMM любой стороной.

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 C1 (см. рис. 2). С другой стороны от детектора установлена плата для сбора сигналов с трубок, на которой распаяна колодка под подключение STM-VMM.

3.4 Установка #1

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 #1 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:

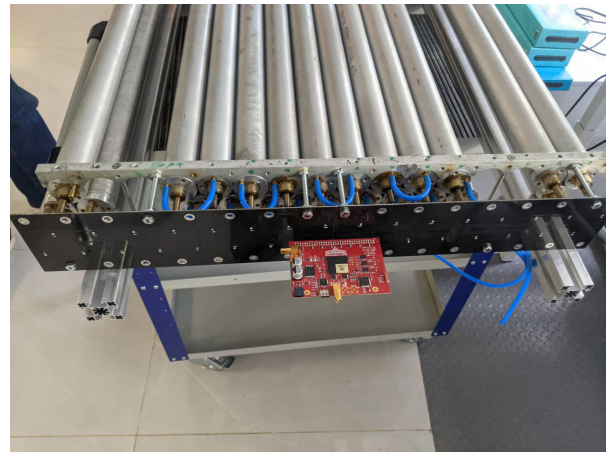


Рис. 4: Детектор в сборе, готовый к размещению в установке

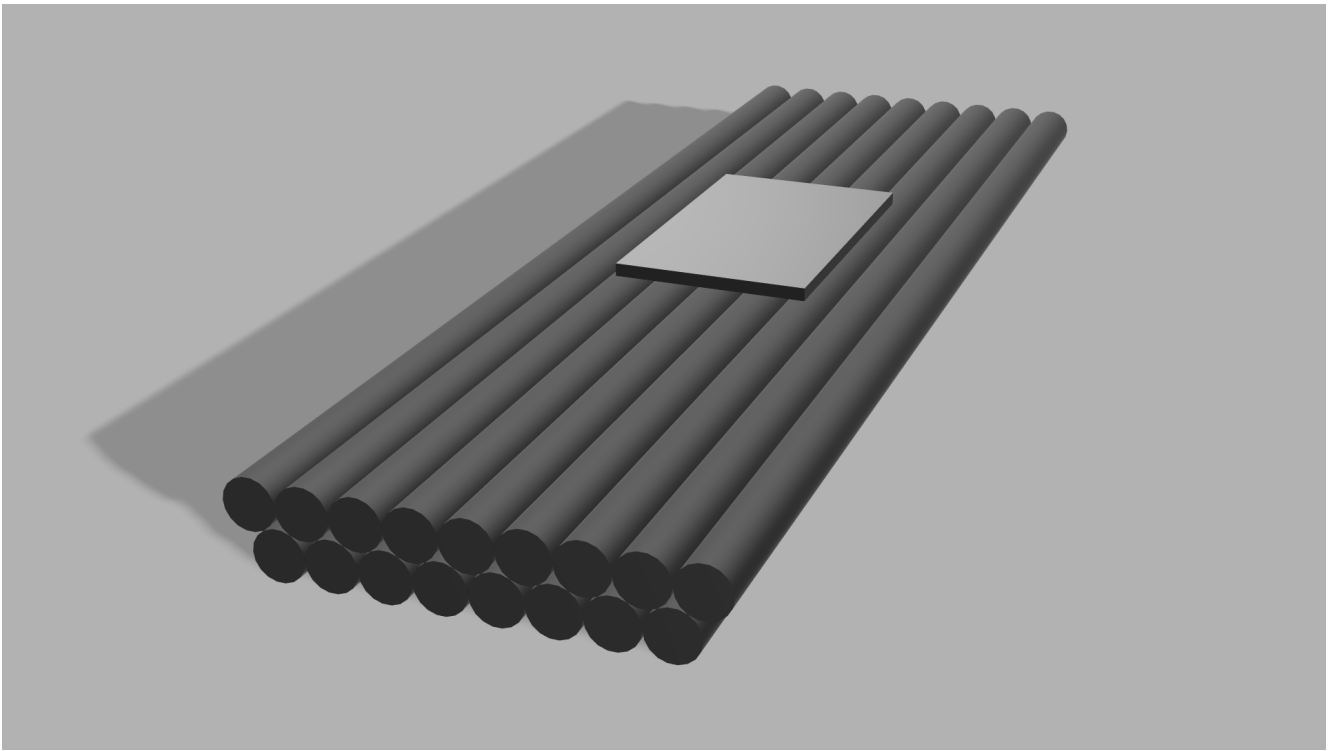


Рис. 5: Установка #1

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

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:

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

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.

3.5 Установка #2

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 #2 была собрана в г. Алматы КазНУ. Верхний детектор собран из

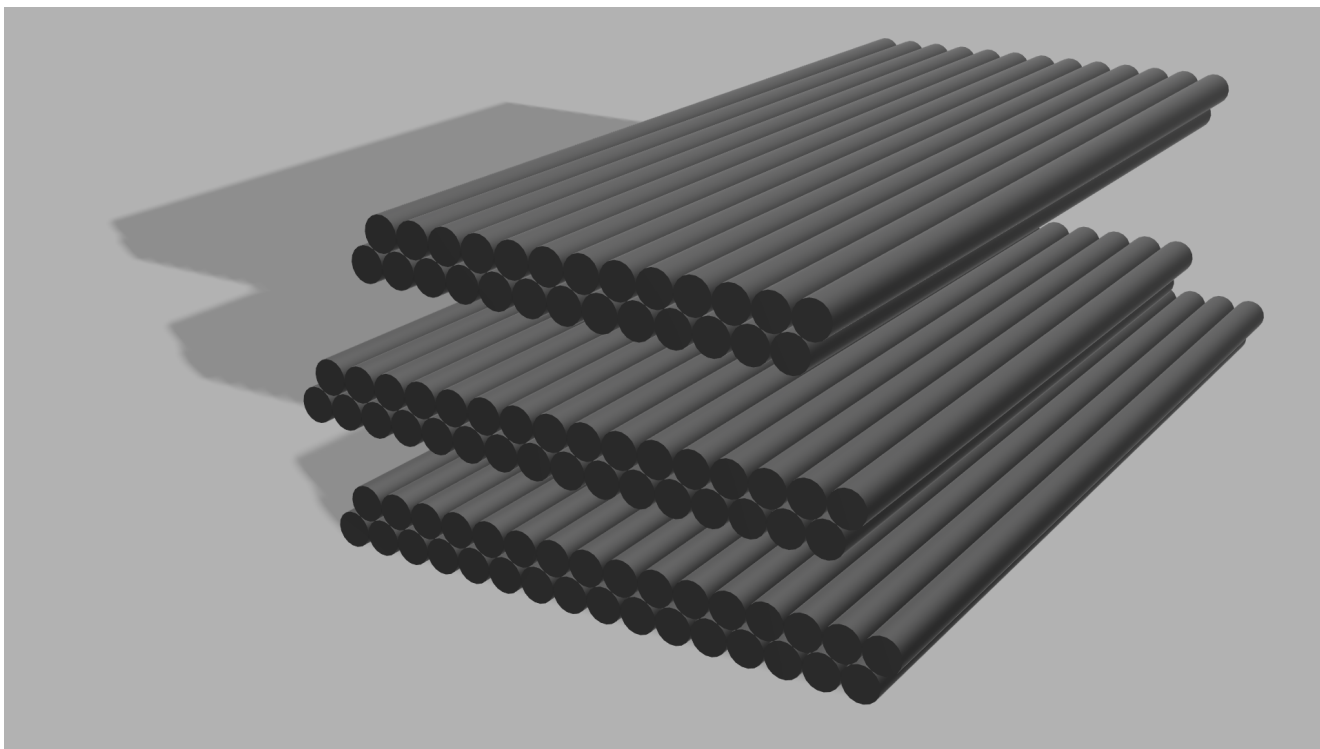


Рис. 6: Установка #2

1000 мм трубок в количестве 26ти штук. Средний из 32х трубок 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. Найдём 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 Реализация методов синхронизации

4.1 Синхронизация по внешнему триггеру

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 прихо-

да 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.

Для отладки и проверки данной реализации была собрана установка #1. В качестве источника сигнала-триггера в данной установке выступает сцинтиллятор. Этот тип детекторов обеспечивает хорошую для наших целей временную привязку. Задержка между проходом 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 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](#)[3].

4.2 Синхронизация двух и более straw-детекторов без внешнего триггера

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 VMM. 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.

4.3 Программная стыковка данных на ПК

Финальным этапом синхронизации данных для обоих методов 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 VMM.
- 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 VMM. Время чтения данных одного события из VMM составляет порядка 10-18 мкс. Такое большое время вызвано пределом возможностей stm32g4. Как следствие при потоке данных с VMM выше 55 КГц микроконтроллер не будет успевать считывать данные из VMM 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 впадение 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 #2 поток тройных совпадений не превышает 100 Гц, как следствие, становится возможным, стыковка по фактическому времени прихода данных с каждой из плат. Произведена доработка программы-конфигуратора целью которой стало вычисление временных интервалов между приходом событий с определенного числа плат, одновременно подключенных к ПК. В случае установки #2 это число равно трем. Если данные временные интервалы лежат во временном окне заданной длины, которое составило 1 мс для установки #2, 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 конфигуратора можно найти в репозитории[2].

5 Анализ данных с одного детектора

5.1 Структура данных с STM-VMM

Данные представлены в формате дерева ROOT. Для целей этой работы представляют интерес следующие ветки:

- `bcid` - в режиме работы без синхронизации хранит количество тиков аппаратного таймера 2 от запуска `stm32g4` до события в каждой отдельной трубке. Тип данных `UInt_32t`. Таймер 2 настроен на работу по аппаратному кварцу с частотой в 40 МГц, в связи с этим каждые 100 секунд счетчик переполняется и начинает отсчет с нуля. В режиме синхронизации по внешнему или внутреннему триггеру хранит модуль разности между временем прихода сигнала-триггера и временем считывания данных из VMM.
- `channel` - массив значений каналов на которые пришло событие.
- `pdMV` - значение амплитуды сигнала с каждой из трубок, пересчитанное в мВ.
- `timestamp` - unix время каждого из событий. Берется из часов ПК к которому подключена STM-VMM. Соответствует времени записи события, поэтому может давать систематическую погрешность вплоть до 1 мс.

5.2 Очистка данных

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 `stm`, что критично при большом потоке частиц.

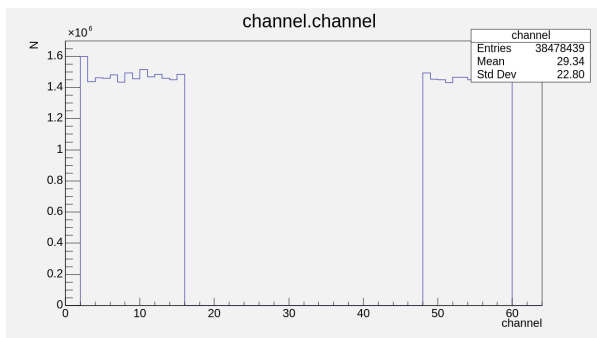


Рис. 7: Распределение по каналам для первого детектора в установке #2 (26 трубок) без удаления не подключенных каналов

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. На рисунке 6 двадцать седьмой по счету бин был специально отображен с нулевым значением для наглядного сравнения разброса в количестве событий между трубками.

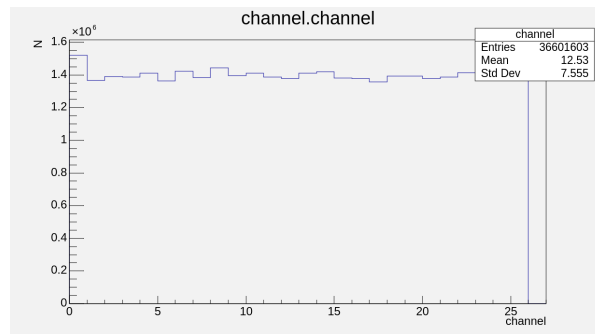


Рис. 8: Распределение после устранения лишних каналов

5.3 Получение распределения энергетических потерь космических мюонов в детекторе

После очистки лишних событий становится возможным получить спектр энергетических потерь частиц, измеренный детектором. 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), мы ожидаем получить распределение Ландау.

После объединения всех событий в одну гистограмму получаем следующий 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 порог дискриминатора близкий к началу формирования пика; нелинейность электроники; низкого разрешения самого детектора и прочих. Полученное распределение отличается от Ландау более вытянутым хвостом. Для фитирования была использована свертка Ландау, полиномиального хвоста и распределения Гаусса. Это приводит к результату $\chi^2/\text{NDF} = 3.6$

Сам детектор хранит данные в виде амплитуды сигнала в мВ, а не в единицах энергии. Для получения распределения в эВ, как на рисунке 9, была

Energy distribution

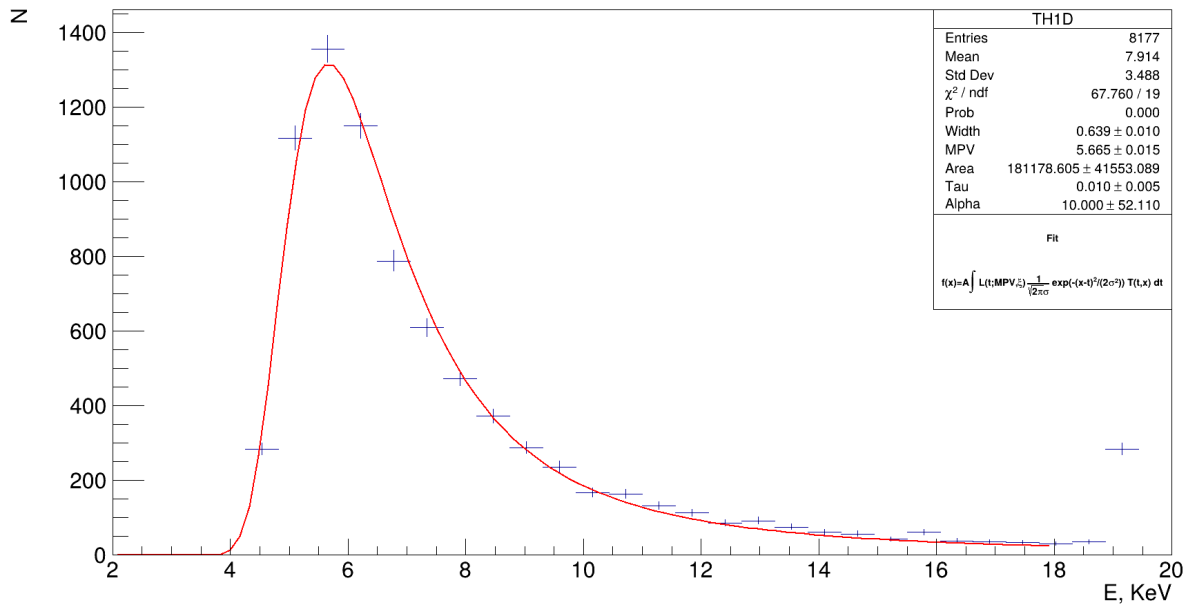


Рис. 9: Распределение энергетических потерь мюонов в детекторе

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 `geant4`, выполненной Маргаритой Банщиковой [7].

6 Валидация синхронизации через анализ данных

6.1 Анализ по перемещению сцинтиллятора в установке #1

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.

Произведено три набора данных. Первый набор выполнен без алгоритма синхронизации (рис. 10), второй со сцинтиллятором, расположенным в 250 мм от края детектора (рис. 11) и третий со сцинтиллятором расположенным на краю детектора (рис. 12).

Распределение в наборах со сцинтиллятором 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 сцинтиллятора. Как следствие для фитирования этого

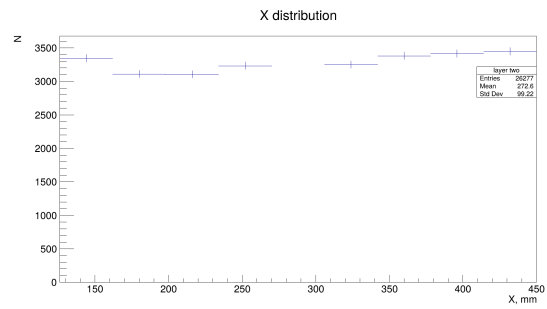
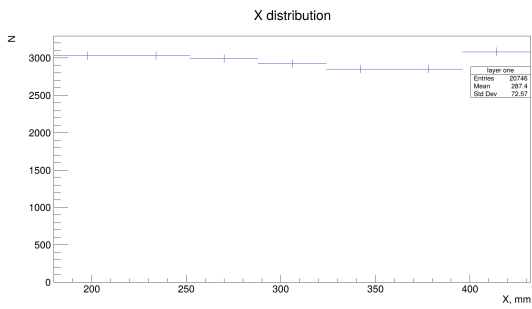


Рис. 10: Распределение по каналам каждого слоя без синхронизации

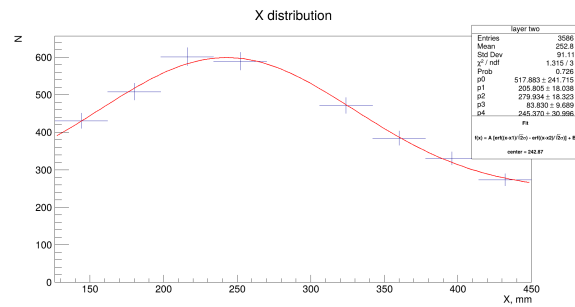
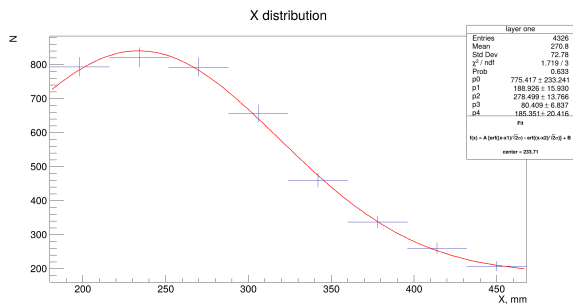


Рис. 11: Распределение по каналам каждого слоя после синхронизации, сцинтиллятор в 250 мм от края

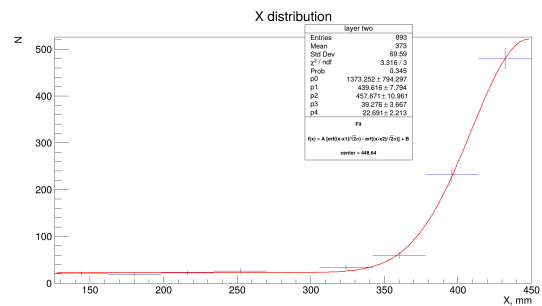
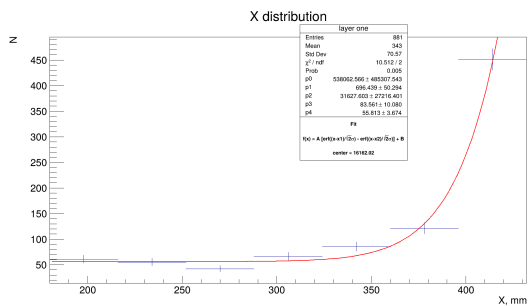


Рис. 12: Распределение по каналам каждого слоя после синхронизации, сцинтиллятор на краю

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 сцинтиллятора 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 сцинтиллятора 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 сцинтиллятора. Следующим этапом проверки является оценка эффективности регистрации событий установкой.

6.2 Анализ эффективности в установке #1

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 #2. Заключалась она в неправильной расстановке приоритетов прерываний микроконтроллера stm32g4. Приоритет прерывания по сигналу-триггеру был установлен ниже приоритета прерывания на считывание данных из VMM. Это приводило к тому что в случае опережения сигналом-триггером прерывания

для считывания данных из VMM 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 VMM 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 #1 была разобрана. В связи с переездом в город Алматы доступ к компонентам установки #1 отсутствовал. Из доступных компонентов была собрана установка #2, в которой невозможно было реализовать внешний триггер из-за отсутствия детекторов на эту роль. Как следствие дальнейшая проверка эффективности, так и не была произведена.

6.3 Анализ данных с установки #2

Установка #2 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 #1 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 геометрии 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 детекторов 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

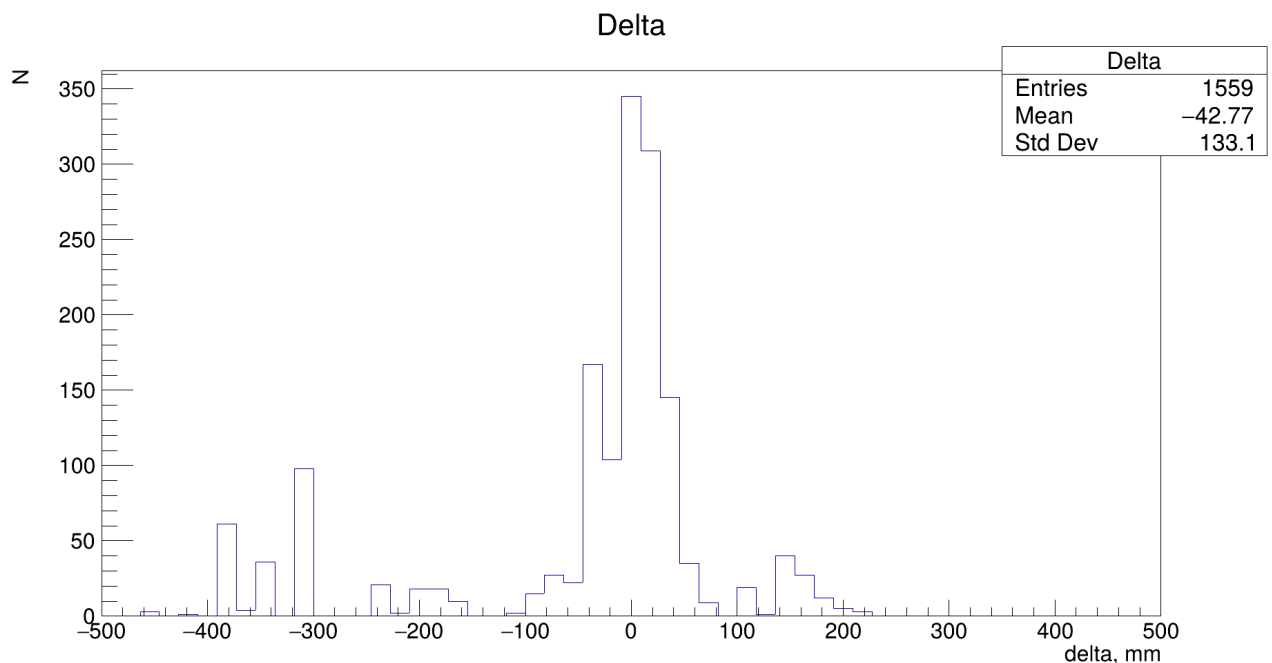


Рис. 13: Распределение невязки по координате X между измеренным и теоретически предсказанным событием в среднем детекторе

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.

7 Заключение

В ходе выполнения данной работы реализовано два метода синхронизации событий в детекторах; произведена модификация программы-конфигуратора для стыковки данных на этапе их записи на диск; произведена проверка реализованных методов.

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-конфигуратор 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.

8 Дальнейшие цели

- Выявить причину независимых событий в сцинтилляторе и straw детекторах, расположенных каскадно.
- Собрать установку #1, или ее аналог, для проверки эффективности после исправления ошибки в ПО.
- Локализовать и устранить проблему в алгоритме синхронизации по внутреннему триггеру, вызывающую появление ложных событий.

Список литературы

- [1] Walenta A.H. “The Time Expansion Chamber”. В: *NIM 161* (1979).
- [2] Tishkov Artyom. *STM-VMM configurator*. 2026. URL: <https://github.com/retr0n1p1/vmmConfigurer.git>.
- [3] Tishkov Artyom. *VMM3A trigger firmware*. 2026. URL: <https://github.com/retr0n1p1/VMM3Atrig.git>.
- [4] 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>.
- [5] TW. Blum. “HParticle Detection with Drift Chambers”. В: *Springer* (2008).
- [6] The ATLAS Collaboration. “Intermediate Conversion Stage for the Low Voltage System of the ATLAS New Small Wheel Project”. В: (2016).
- [7] М. А. Банщикова. “Исследование жесткой компоненты космических лучей с помощью Straw-детектора”. В: (2026).