

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

ПРОГРАММНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ КАСКАДНОЙ  
СИСТЕМЫ ИЗ ДВУХ НЕЗАВИСИМЫХ STRAW  
ДЕТЕКТОРОВ

Студент  
Научный руководитель  
Научный консультант

Тишков Артем Викторович  
Еник Темур Львович  
Баутин Виталий Викторович

Москва - 2025 г.

# Содержание

<b>1 Введение . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>2 Цели и задачи . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>3 Устройство установки . . . . .</b>	<b>5</b>
3.1 Параметры трубок . . . . .	5
3.2 Конструкция . . . . .	5
3.3 Электроника . . . . .	6
<b>4 Анализ данных . . . . .</b>	<b>9</b>
4.1 Структура данных с STM-VMM . . . . .	9
4.2 Очистка данных . . . . .	9
4.3 Получение распределения энергетических потерь космических мюонов в детекторе . . . . .	10
<b>5 Анализ методов синхронизации событий . . . . .</b>	<b>11</b>
5.1 Программный метод . . . . .	11
5.2 Внешний триггер . . . . .	12
5.3 Внешние часы . . . . .	13
5.4 Внутренний триггер . . . . .	14
<b>6 Реализация программной синхронизации двух детекторов . . .</b>	<b>15</b>
6.1 Подготовка данных . . . . .	15
6.2 Алгоритм поиска временного смещения . . . . .	16
<b>7 Заключение . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>8 Дальнейшие цели . . . . .</b>	<b>18</b>

# 1 Введение

В данной работе будет рассмотрена установка из двух каскадных straw детекторов; произведен набор и анализ данных; проанализированы различные способы синхронизации детекторов в каскаде; реализован и протестирован алгоритм программной синхронизации событий с детекторов.

Straw-детекторы — это тип трековых детекторов, состоящих из проводящих трубок (обычно диаметром 4–20 мм), заполненных газовой смесью (например, Ar/CO<sub>2</sub>)[4]. 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)[4]. 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.[3].

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 ремонтопригодность детекторных систем[1]

Под каскадными детекторами (детекторами размещенными в каскад) в данной работе подразумевается способ компоновки нескольких детекторов при котором они размещаются слоями, друг над другом.

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. Для анализа возможных решений и реализации одного из них изготовлен стенд, состоящий из двух каскадно расположенных детекторов, про который и будет идти речь в данной работе.

Актуальность данной работы заключается в тестировании электроники на основе VMM3A[2] и разработке методов ее применения в виде систем из нескольких детекторов.

## **2 Цели и задачи**

- Протестировать работу электроники на основе VMM3A с газовым straw детектором.
- Сверить полученные данные для космических мюонов, зарегистрированных детектором, с теоретически известными зависимостями.
- Проанализировать различные способы синхронизации событий между несколькими каскадными детекторами, построенными на основе STM-VMM.
- Реализовать программный способ синхронизации и протестировать на практике.

### 3 Устройство установки

#### 3.1 Параметры трубок

В конструкции детекторов использованы тонкостенные алюминиевые трубы длина которых составляет 770 мм, диаметр 44 мм. Для первого детектора число трубок составляет 26, для второго 18. Предварительный расчетный объем одной трубы без учета толщины стенок:

$$V_1 = \pi \frac{D^2}{4} H = 3.14 * \frac{0.44^2}{4} * 7.7 = 1.17 \text{ л}$$

Суммарный объем газовой смеси для двух детекторов составит:

$$V_{44} = 44 * 1.17 \text{ л} \approx 51 \text{ л}$$

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 объема камер детекторов в 51 л перед запуском необходима тщательная продувка. На практике оказалось что после подачи газовой смеси в детекторы и перед включением высокого напряжения желательно выждать не менее суток.

В электронике детектора применены фильтрующие и разделительные конденсаторы с максимальным допустимым рабочем напряжением в 3 КВ. В связи с этим, для минимизации рисков, при первом запуске была выбрана смесь газа из аргона и углекислого газа в пропорции 93% к 7% соответственно. Давление газовой смеси в детекторе незначительно превышает атмосферное. По окончании продувки детектора было подобрано оптимальное рабочее напряжение, которое 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. При этом детектор показывал оптимальную работу и на данной газовой смеси. Как следствие было принято решение продолжить работу на данной пропорции аргона и углекислого газа, оставив тем самым запас для конденсаторов по напряжению.

#### 3.2 Конструкция

Конструкция детектора устроена следующим образом: корпуса трубок соединены рамой, представляющей собой 4 пластины с углублениями под трубы.

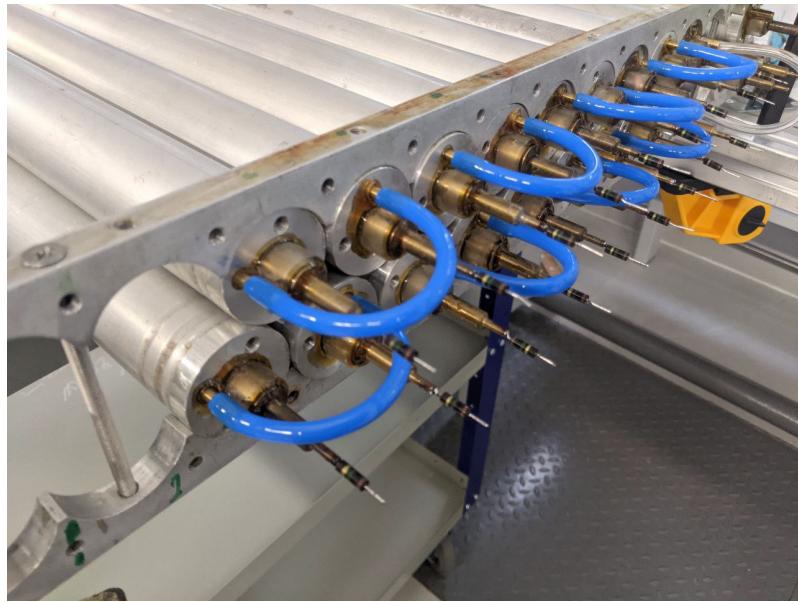


Рис. 1: Конструкция детектора

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

### 3.3 Электроника

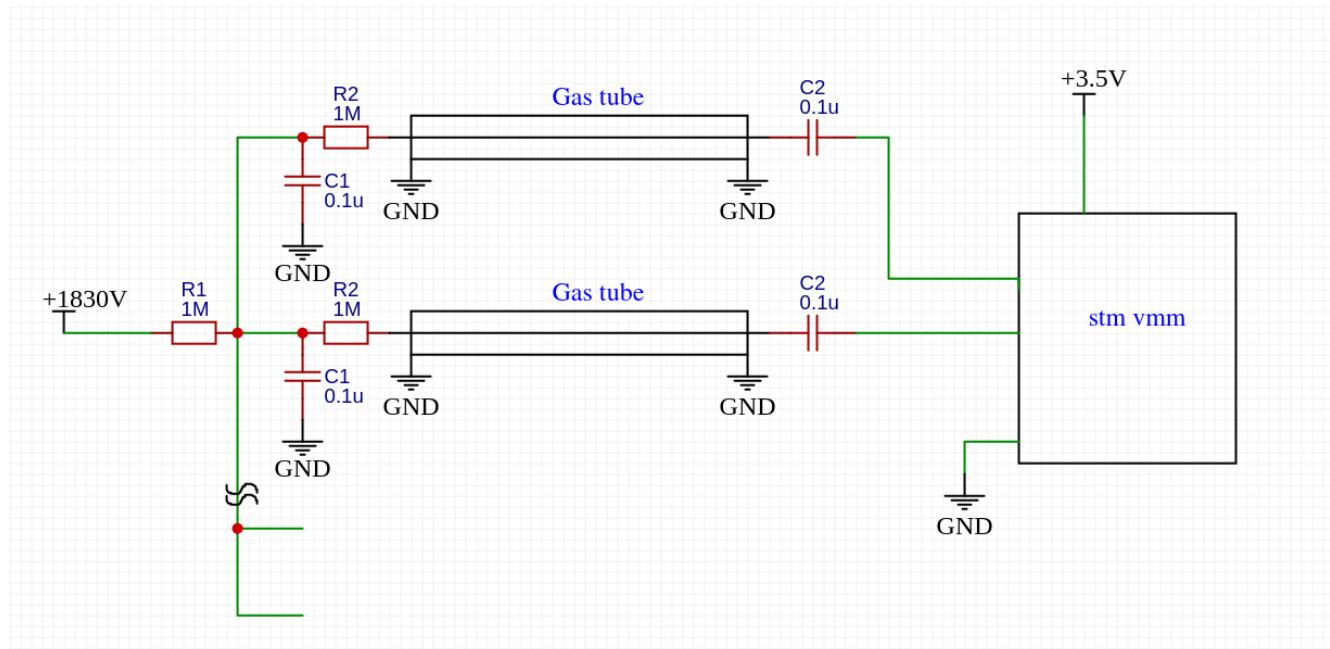


Рис. 2: Принципиальная схема электроники детектора

После подачи высокого напряжения ток в цепи каждого отдельного детектора составляет приблизительно 500 мА 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 высокого 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[2]. 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 С2 (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 c++ и QT. Она позволяет подключаться к СОМ 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 програм-

мой в виде дерева ROOT. Настройки можно сохранить в виде конфигурационного файла. После отправки настроек устройству, они записываются в энергозависимую память (EEPROM) микроконтроллера.

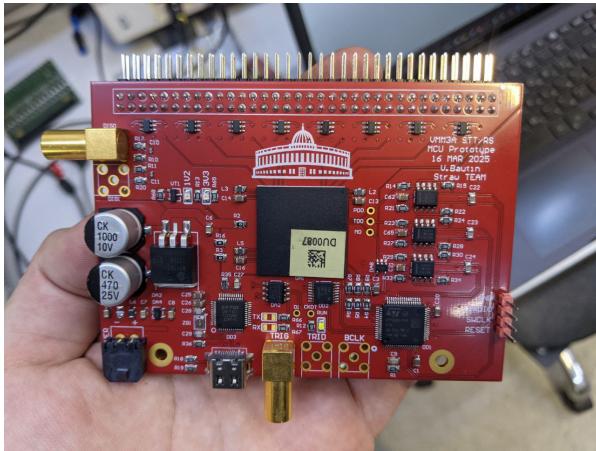


Рис. 3: Stm vmm

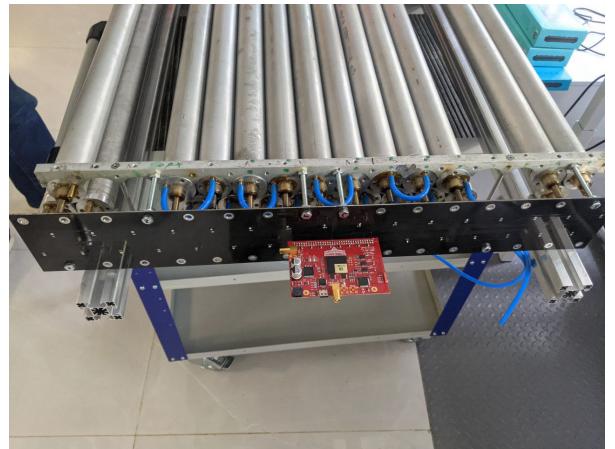


Рис. 4: Детектор в сборе, готовый к размещению в каскаде

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 хорошие 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.

## 4 Анализ данных

### 4.1 Структура данных с STM-VMM

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

- bcid - 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.
- channel - массив значений каналов на которые пришло событие.
- pdoMV - 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 5 мс.

### 4.2 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.

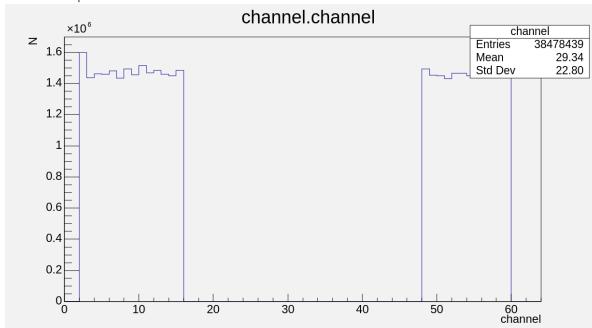


Рис. 5: Распределение по каналам для первого детектора (26 трубок) без удаления не подключенных каналов

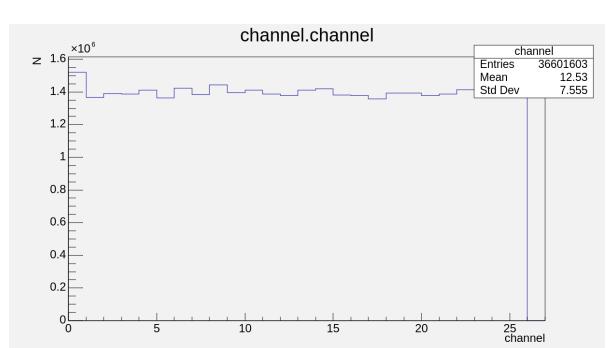


Рис. 6: Распределение после устранения лишних каналов

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. Как видно из графика разница в числе событий между трубками лежит в пределах 6%, в связи с этим было решено не производить аппаратную калибровку трубок, как и калибровку VMM3A. На рисунке 6 двадцать седьмой по счету бин был специально отображен с нулевым значением для наглядного сравнения разброса в количестве событий между трубками. Для второго детектора была проделана аналогичная процедура.

#### 4.3 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

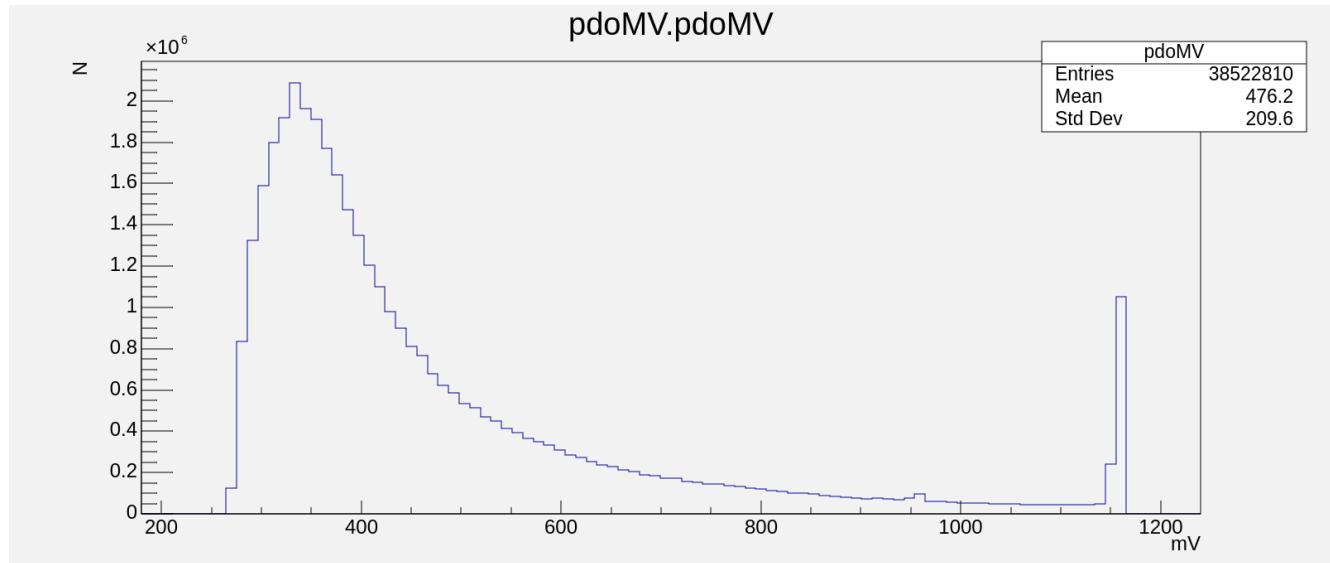


Рис. 7: Распределение энергетических потерь мюонов в детекторе

результат. Это распределение получено после набора в течение 8 часов. В правой части спектра образовалось перенаполнение - 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. Для качественного подтверждения вида распределения Ландау выполним фитирование.

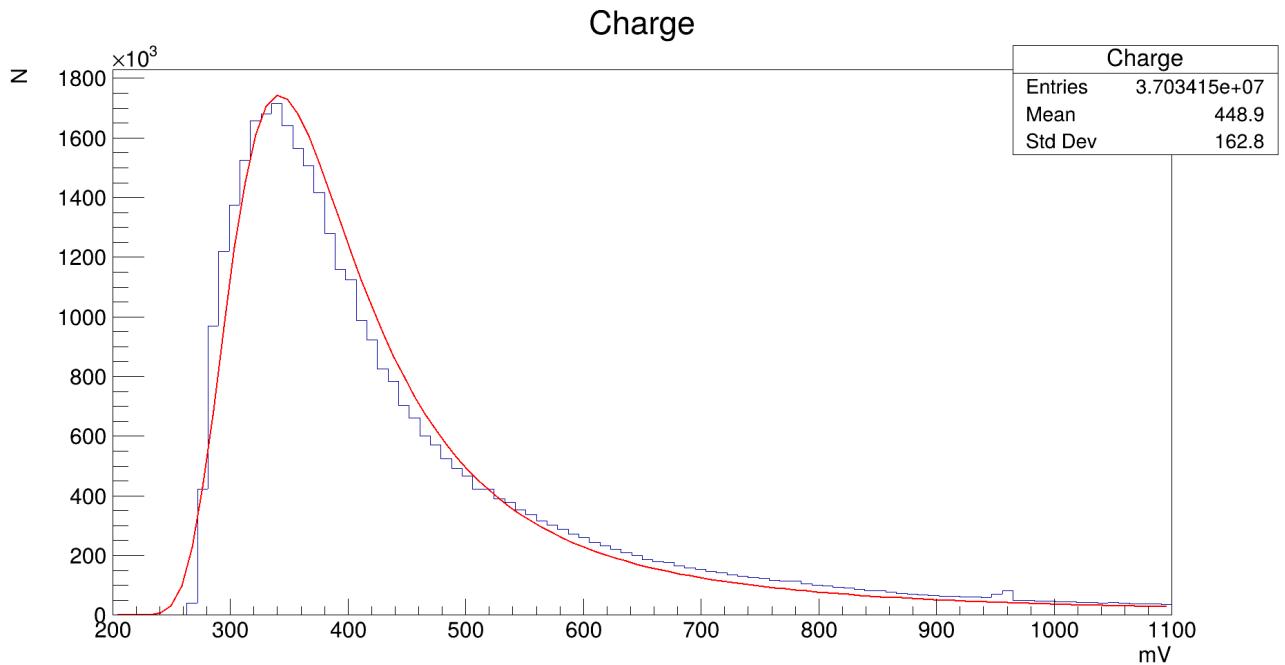


Рис. 8: Фитирование распределения функцией Ландау

## 5 Анализ методов синхронизации событий

В данной работе будут проанализированы основные методы синхронизации событий у нескольких детекторов скомпонованных каскадно. Некоторые из этих методов позволяют синхронизировать детекторы с любой компоновкой, в этом случае это будет уточнено. Всего было рассмотрено 4 способа: программный; с внешним триггером; с внешними часами; с внутренним триггером (роль триггера на себя возьмет один из детекторов в каскаде).

### 5.1 Программный метод

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 будет по отдельности, обеспечивая минимальный начальный временной сдвиг между детекторами.

Реализация заключается в создании алгоритма, выявляющего статистиче-

скую 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 делает 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.

## 5.2 Внешний триггер

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.

Реализация заключается в создании быстрого буфера в оперативной памяти микроконтроллера, в который будут записываться по кругу определенное количество последних зарегистрированных событий. Выход с триггера подключается к логическому входу `stm`. Далее в микроконтроллере настраивается прерывание, для обработки сигнала с триггера. Каждое срабатывание триггера

фиксируется и записывается на ПК. Это необходимо для синхронизации событий с детекторов. Кроме того, при срабатывании триггера буфер анализируется на наличие зарегистрированных частиц в определенном временном интервале, определяемым задержкой триггера. При нахождении в буфере соответствующего события оно отправляется на запись на ПК вместе с данными о срабатывании триггера.

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 VMMЗА.
- 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.

### 5.3 Внешние часы

Данный метод требует для своей работы внешний модуль часов, подключаемый ко всем детекторам, состоящим в эксперименте. В качестве такого модуля может выступать GPS приемник и микроконтроллер. Идея заключается в получении и записи времени событий каждым детектором не с внутренних часов, а с внешних, общих для всех детекторов.

Для реализации необходимо собрать модуль внешних часов с необходимой точностью хода. Точность хода необходимо подбирать в зависимости от потока частиц, регистрируемого детекторами. Для текущей конфигурации детекторов при работе с космическим излучением точность хода должна составлять в районе 100 наносекунд. Как следствие необходимо подобрать или реализовать соответствующий протокол общения между модулем и stm. Модуль внешних часов необходимо подключить к каждому из детекторов, используя данный протокол, что делает данный способ сложным со стороны аппаратной части.

Данный метод включает в себя плюсы метода с внешним триггером, за исключением простоты сопоставления событий на этапе обработки. Но в этом и

заключается основное его преимущество. Можно изменять алгоритмы временной фильтрации и сопоставления событий на этапе обработки, без необходимости в повторном проведении эксперимента. В теории это позволит добиться более высокой эффективности по сравнению с триггерным методом, за счет переноса алгоритмов фильтрации на этап обработки. Кроме того, этот метод позволяет синхронизировать любые детекторы, даже не состоящие в каскаде. Реализация данной задачи потребует точного учета временных задержек, возникающих за время переноса сигнала от детектора до модуля внешних часов и обратно. Как следствие это еще сильнее усложнит обработку, но теоретически позволяет получить желаемый результат.

К недостаткам можно отнести: аппаратную сложность реализации; значительное увеличение сложности обработки данных, значительное увеличение временных и вычислительных затрат на этот этап.

## 5.4 Внутренний триггер

Этот метод по своей сути представляет собой триггерный метод. Отличие заключается в использовании одного из детекторов в качестве триггера, как следствие пропадает необходимость во внешнем триггерном детекторе.

Аппаратная реализация заключается в подключении плат STM-VMM друг ко другу цепочкой. Первый детектор в каскаде работает в обычном режиме, регистрируя частицы и записывая их на ПК. При каждом срабатывании он должен отправлять сигнал триггера следующим по цепочке детекторам, с некоторой задержкой (чтобы не опередить регистрацию той же частицы последующим детектором). Последующие за ним детекторы работают по триггерному методу.

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).

К минусам данного метода необходимо отнести потенциальную сложность в настройке алгоритмов временной фильтрации для каждого из детекторов в каскаде. От точности настройки будет зависеть эффективность каждого из каскадов. Суммарная эффективность детекторной сборки, без учета геометрии, будет выглядеть как произведение эффективности каждого из каскадов. Кроме того, для реализации требует создание и отладки обычного триггерного режима.

## 6 Реализация программной синхронизации двух детекторов

На момент создания данной работы доступ к исходным файлам программного обеспечения stm отсутствовал, что не позволяло реализовать ни один из рассмотренных ранее методов, за исключением программного. В связи с проблемой сопоставления событий двух детекторов в каскаде, из которых состоит тестируемый стенд, было принято решение реализации данного метода. Впоследствии его результаты можно использовать как референс для других методов.

### 6.1 Подготовка данных

Для проведения данного эксперимента был произведен набор данных с детекторов продолжительностью в 8 часов. Запуск набора производился с минимальной задержкой между детекторами. Детекторы были расположены каскадом, перпендикулярно друг ко другу. 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 upix 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 STM-VMM прекращала свою работу на некоторое время (около 2х минут), а затем восстанавливалась. 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 вырежим 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.

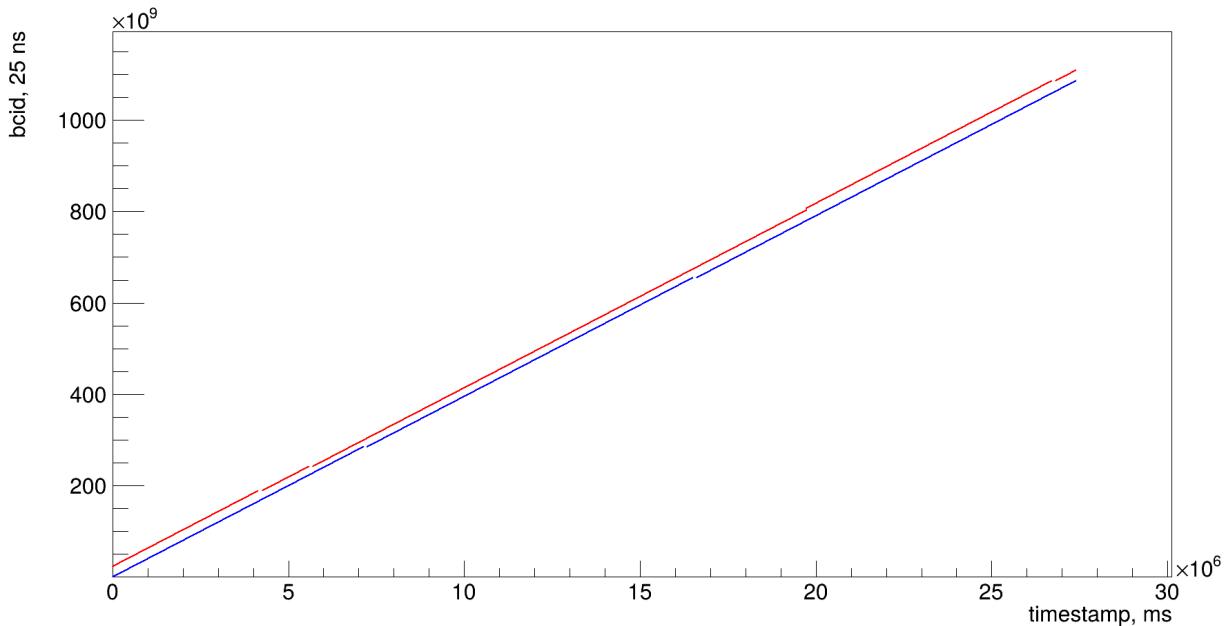


Рис. 9: Зависимость  $bcid$  от  $timestamp$  для каждого из детекторов. Синий - первый детектор, красный - второй. Каждое из событий нанесено точками.

## 6.2 Алгоритм поиска временного смещения

Произведена первоначальная синхронизация и калибровка точности хода кварцев по абсолютному unix времени. Так как unix время каждого события записывается в момент сохранения данных, а не в момент их получения с детектора это обеспечивает погрешность вплоть до 5 мс, что слишком много для точной синхронизации событий. Поэтому необходимо разработать алгоритм более точной синхронизации.

Классический алгоритм для данной задачи заключается в построении 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, смещааясь затем на следующие 3 с.

При анализе полученного результата можно заметить, что полученная гистограмма обладает сразу несколькими выраженнымами 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.

Проанализировав протокол общения между  $stm$  и  $VMM3A$  можно прийти к выводу, что при регистрации и обработке частиц  $VMM3A$  поднимает логическую единицу на одном из входов  $stm$ . В связи с малым буфером в одну частицу,

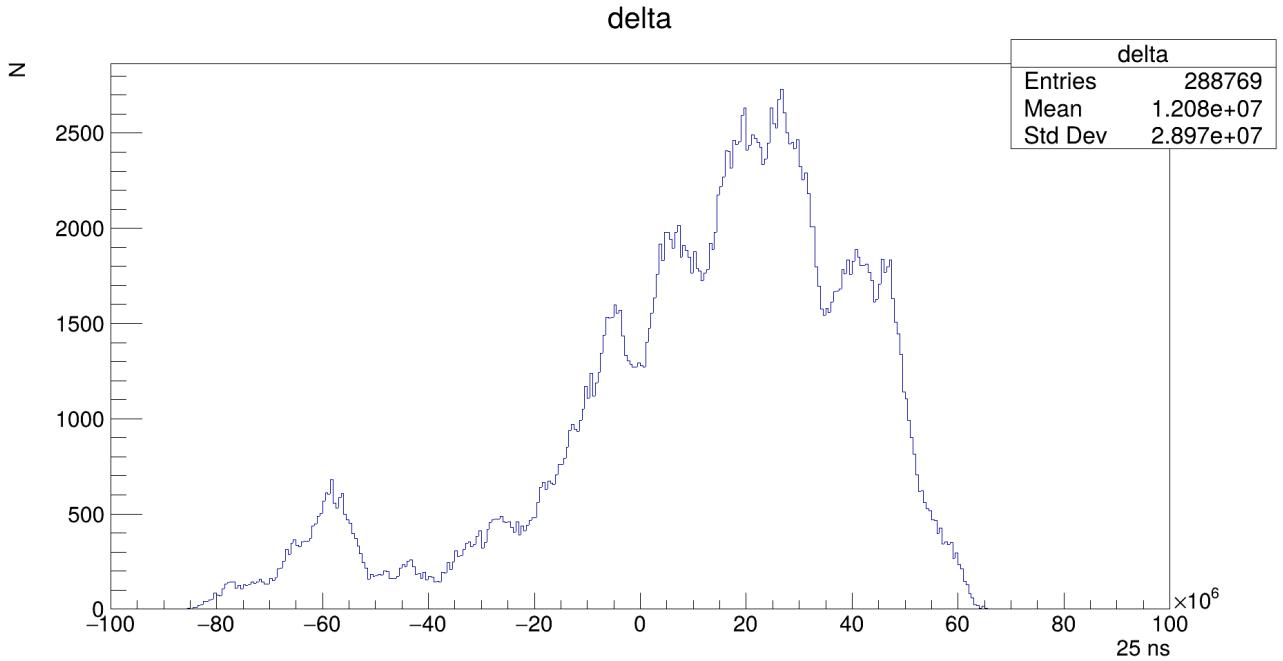


Рис. 10: Гистограмма распределения временной рассинхронизации событий двух детекторов.

до передачи информации stm VMM3A перестает регистрировать новые частицы. Это приводит к росту мертвого времени детектора. Для минимизации этого фактора считывание данных с VMM3A производится при помощи аппаратного прерывания stm. В связи с этим можно сделать вывод что прерывания настроены таким образом, что как-то влияют на аппаратный таймер, вызывая его остановку и создавая временной сдвиг при регистрации каждой частицы.

## 7 Заключение

В ходе выполнения данной работы был произведен запуск в эксплуатацию двух straw детекторов, получен спектр энергетических потерь космических мюонов, проанализированы различные методы синхронизации событий каскадных детекторов, произведена попытка программной синхронизации двух детекторов в каскаде.

Для стабильной работы детекторов подобраны пропорции газовой смеси и значение рабочего напряжения. Определены на практике временные промежутки для продува детекторов и их отжига для очистки анодной проволоки.

Энергетический спектр, полученный при анализе данных с детектора, качественно соответствует теоретически предсказанному распределению Ландау.

Полученные данные при попытке программной синхронизации говорят о невозможности применения этого метода с текущей версией программного обеспечения на платах STM-VMM. Для успешной реализации необходимо внести изменения в алгоритм считывания данных с VMM3A.

## 8 Дальнейшие цели

- Получить доступ к исходному коду ПО STM-VMM для реализации различных методов сопоставления событий, проанализированных в данной работе.
- Реализовать и протестировать метод с внешним триггером. Данный метод откроет дорогу к реализации способа с внутренним триггером, который по результатам анализа является наиболее перспективным и удобным для задач каскадной компоновки детекторов.
- Доработать тестовый стенд для реализации и проверки триггерного режима.

## Список литературы

- [1] Walenta A.H. “The Time Expansion Chamber”. B: *NIM 161* (1979).
- [2] Vitalii Bautin и др. “VMM3 ASIC as a potential front end electronics solution for future Straw Trackers”. B: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1047 (2023), c. 167864. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167864>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900222011561>.
- [3] TW. Blum. “HParticle Detection with Drift Chambers”. B: *Springer* (2008).
- [4] The ATLAS Collaboration. “Intermediate Conversion Stage for the Low Voltage System of the ATLAS New Small Wheel Project”. B: (2016).