

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ» В ГОРОДЕ АЛМАТЫ

УДК 539.1

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
**ИЗУЧЕНИЕ СТЕНДА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ  
КОСМИЧЕСКИХ МЮОНОВ**

Научный руководитель	_____	Еник Т. Л.
Научный консультант	_____	Ережеп Н. О.
Студент	_____	Семёнов Д. В.

Алматы 2025

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>2</b>
Предисловие . . . . .	2
Straw-детекторы . . . . .	2
Преимущества straw-детекторов . . . . .	3
Постановка целей и задач . . . . .	3
<b>Описание установки</b>	<b>4</b>
Конфигурация . . . . .	4
Устройство отдельных трубок . . . . .	5
Газораспределительная система . . . . .	6
Электроника . . . . .	7
<b>Система хранения данных</b>	<b>9</b>
Анализ данных . . . . .	9
Проблема синхронизации и анализ методов решения . . . . .	10
<b>Заключение</b>	<b>11</b>
<b>Список использованной литературы</b>	<b>12</b>

# ВВЕДЕНИЕ

## Предисловие

Несмотря на значительные достижения в теоретической и экспериментальной адронной физике, для точного и всестороннего описания сильно взаимодействующей материи, для решения вопросов механизмов конфайнмента и возникновения массы адронов, для исследования мюонных ШАЛ необходимы технологии, способные восстанавливать сложные многочастичные треки в высоком пространственном разрешении и с минимальным материальным бюджетом. [3] В многопроводочных пропорциональных детекторах обнаруживается ненадежность: случайный разрыв одного провода может привести к неисправности значительной части, если не вообще всей системы; стримерные же трубки страдают от возможности искажения поля регистрирующих анодных проводов зарядом, индуцированным на счётчиках, призванных определять координату трека вдоль трубки.

## Straw-детекторы

Straw-детекторы представляют собой газонаполненные цилиндрические трубки с проводящим внутренним слоем, выполняющим роль катода, и анодной проволокой, натянутой вдоль оси цилиндра. Электрическое поле разделяет электроны и положительные ионы, возникающие при ионизации газовой смеси (обычно — Ar или Xe с CO<sub>2</sub>) при пролёте заряженной частицы через объём. Обычно на проволоку подаётся положительное напряжение порядка нескольких киловольт — при использовании тонких проволок диаметром в несколько десятков микрометров напряжённость электрического поля вблизи их оказывается достаточной для инициирования каскада вторичных газовых ионизаций за счёт столкновений электронов с другими молекулами газа. В зависимости от напряжения и характеристик газа возможно усиление первичного зарядового сигнала примерно в  $10^4 - 10^5$  раз, чего достаточно для его регистрации.

Измеряя время прибытия самых ранних электронов, получают информацию о минимальном расстоянии трека частицы от проволоки. Изохронная поверхность описывает цилиндр вокруг оси проволоки. Трек частицы восстанавливается путём наилучшего приближения к изохронам, измеренным в серии нескольких трубок с одинаковой ориентацией, а слои трубок, скошенные относительно данного, обеспечивают полноценное стереоскопическое представление траектории.

## Преимущества straw-детекторов

Straw-детекторы обладают наиболее простой геометрией в виде цилиндрических трубок и имеют ряд преимуществ: [3]

- устойчивую электростатическую конфигурацию: экранирующая трубка вокруг проволоки подавляет помехи и защищает соседние трубки в случае обрыва проволоки;
- высокую механическую стабильность при укладке трубок слоями;
- высокое пространственное разрешение, зависящее от диаметра трубки и характеристик газа;
- простоту калибровки соотношения между пространством и временем дрейфа благодаря цилиндрической форме изохрон;
- возможность повышения пропускной способности по скорости счёта сигналов путём применения трубок меньшего диаметра и/или выбора газа с более быстрым дрейфом.

## Постановка целей и задач

В лаборатории исследования космических лучей и широких атмосферных ливней на базе Казахского Национального университета им. аль-Фараби используется стенд из трёх каскадных дрейфовых детекторов. Необходимо детально изучить устройство установки: общую конфигурацию трубок, конструкцию газораспределительной системы и системы питания и сбора и обработки первичных данных — кроме того, важно проконтролировать непосредственно саму методологию работы со стендом, синхронизации модулей каскада и исследования программно созданной структуры данных с STM-VMM.

# ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

## Конфигурация

Каждый из трёх модулей состоит из четырёх жердей с нишами под перпендикулярно им уложенные трубки. По паре жердей с двумя зафиксированными между ними слоями трубок стянуты винтами на том и другом концах модуля (рис. 1). Жерди фиксируются на алюминиевых профилях, при помощи которых модули жёстко скошенно устанавливаются друг над другом.



Рис. 1: Вид одного модуля детектора  
(Красная плата — STM-VMM)

В крупных детекторах микрочастиц цилиндрические камеры также модульны, подразделяются на секторы (секстанты или октанты), установленные на жёсткой раме и заключённые в полимерные оболочки. Каждый сектор содержит несколько десятков слоёв в общей сложности тысяч трубок, остающихся устойчивыми благодаря внутреннему давлению и плотной их

упаковке. Слои объединяются в уровни по своей пространственной ориентации: аксиальные, расположенные параллельно каналу пучка частиц, и скошенные под малыми углами, дающие информацию о z-координате трека и обеспечивающие полное стереоскопическое его представление. Угол скоса стереоскопических уровней мал ( $\sim 3^\circ$ ), чтобы не искажать геометрию камеры и не оставлять пустых пространств между уровнями — высокое же стереоскопическое разрешение достигается большим их количеством. [5]

## Устройство отдельных трубок

В конструкции детекторов использованы тонкостенные алюминиевые трубки, длина которых составляет 7.7 дм, диаметр — 0.44 дм, объём без учёта толщины стенок:  $\pi \times 0.44^2 \times 7.7 = 1.2$  л. Для каждого модуля детектора число трубок составляет 32; рабочие объёмы трубок последовательно соединены друг с другом. Суммарный объём газовой смеси для трёх модулей детекторов по их заполнению составит:  $V = 3 \times 32 \times 1.2 = 115$  л. Анодная проволока изготовлена из позолоченного вольфрама диаметром 20 мкм.

Дрейфовые трубки негерметичны, что приводит не только к постепенной утечке газа-заполнителя, но и к налипанию посторонних загрязнителей на проволоку. Также, вероятно, сам материал стенок выделяет засоряющие смесь частицы. В связи с этим, перед непосредственным проведением измерений необходимы длительная продувка детектора, калибровка состава газовой смеси и предварительный период включенного высокого напряжения для выжигания загрязнения на аноде.

От straw эти дрейфовые трубки отличаются как габаритами, так и твёрдостью стенок; последнее, впрочем, не так важно для детектора мюонов, не испытывающих многократного и сильного рассеяния, — но первое обнаруживает сложность реконструкции даже поперечной трубкам составляющей трека частицы, а с учётом электронной независимости модулей, возникает проблема синхронизации их считывающих систем для эффективного стереоскопического отслеживания частицы.

Straw изготавливаются из полиэтилентерефталата (ПЭТ, майлар) наматыванием двух плёнок по спирали на оправу и склеиванием их термопластичным полиуретаном при высокой температуре, или продольным спаиванием плёнки при помощи ультразвука. На внутреннюю сторону трубки наносится металлическое покрытие для улучшенной проводимости. Закупоривающие трубку заглушки держат натянутой анодную проволоку и подводят к объёму электрические соединения и газ. Для избежания деформа-

ций трубки, загрязнения её внутренней поверхности, провисания провода и, как следствие, асимметрии электрического поля внутри при хранении и эксплуатации целесообразно поддерживать в straw внутреннее избыточное давление порядка 1 бар. [4]

Вопрос механической стабильности straw-трубки и расчёта внутренних напряжений разобран в [2].

## Газораспределительная система

В данный момент, два модуля подключены к газораспределительной системе. Система состоит из контроллера автоматического управления смешения газов КГС-3, двухэтажного блока регуляторов расхода газа (РРГ), баллонов с углекислым газом  $\text{CO}_2$  и аргоном  $\text{Ar}$ .

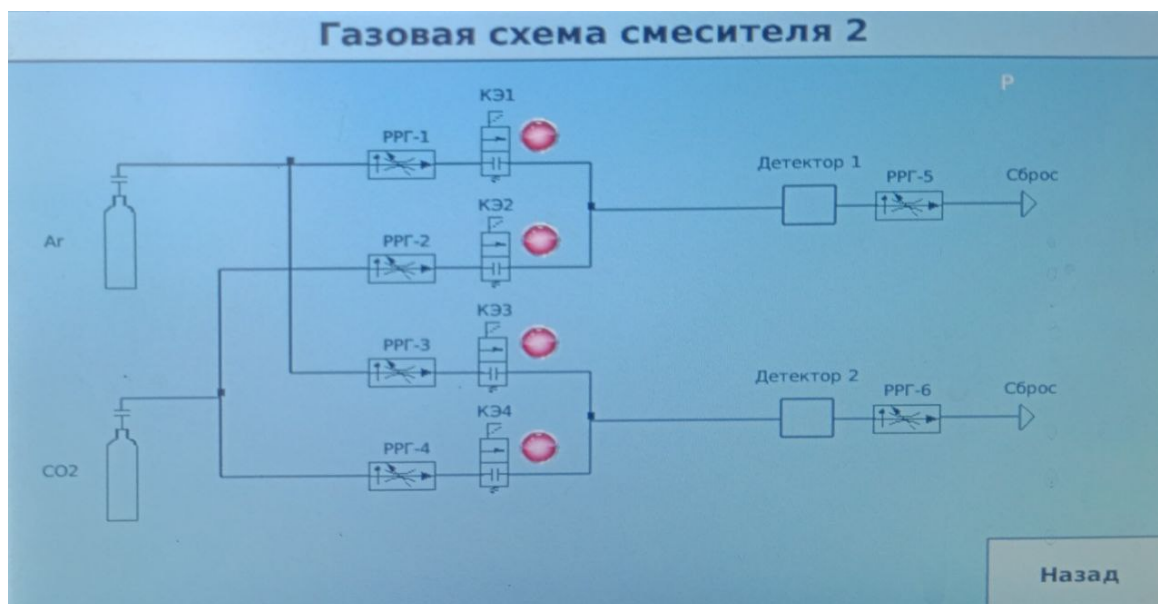


Рис. 2: Схема газовой системы КГС-3

РРГ подключены к КГС-3 через серию разъёмов RJ-45 на обратной стороне контроллера; порты DB-SUB же контролируют электронные клапаны КЭ. Открытие и закрытие КЭ осуществляется по нажатию на его символ на принципиальной газовой схеме контроллера. Газовый поток в РРГ регулируется по выбору режима работы «Ручной» и включению режима контроля «Рег.» (регуляция) как процентная доля от паспортного расхода РРГ. Поскольку паспортный расход установлен заранее (3,6 л/час для  $\text{Ar}$  и 0,9 л/час для  $\text{CO}_2$ ) и откалиброван по азоту  $\text{N}_2$ , устанавливаемые в КГС-3 процентные соотношения газов в смеси отличаются от реальных необходимых и находятся как:

$$N = \frac{n\Phi_n}{k\Phi}$$

где:

$N$  — выставленная концентрация на КГС-3;  $n$  — требуемая концентрация;  $\Phi_n$  — результирующий расход;  $\Phi$  — паспортный расход (при полном открытии клапанов);  $k$  — коэффициент поправки, определённый экспериментально для Ar как 1,45 и для CO<sub>2</sub> как 0,74.

Так как погрешность даже для такого расчёта составляет 4%, после продувки необходимо провести калибровку: сравнить полученный с системы CAEN спектр с контрольным, уже полученным заранее. Сдвиг графика счёта вправо говорит о среде, богатой азотом сверх меры; влево — о недостатке азота.

Оптимальной пропорцией Ar и CO<sub>2</sub> в смеси выбрана 93:7.

Таблица 1: Поправочные коэффициенты для разных газов

Газ	Химическая формула	Поправочный коэффициент, $k$	Пропускная способность регулятора, %
Азот	N <sub>2</sub>	1,00	100
Воздух	—	1,00	—
Аргон	Ar	1,45	87
Двуокись углерода	CO <sub>2</sub>	0,74	79
Окись углерода	CO	1,00	—
Метан	CH <sub>4</sub>	0,72	—

В крупных и профессиональных системах газораспределение, конечно, модульно, для обеспечения работоспособности сектора в случае выхода одного из распределителей из строя — особенно это важно для стереоскопических трубок, обнаруживающих z-координату трека. [3]

## Электроника

Напряжение в 1830 В подаётся с системы считывания CAEN FERS-5200 через сглаживающие конденсаторы C<sub>1</sub>. Сбор данных осуществляется в пропорциональном режиме (индуцированный на аноде заряд зависит



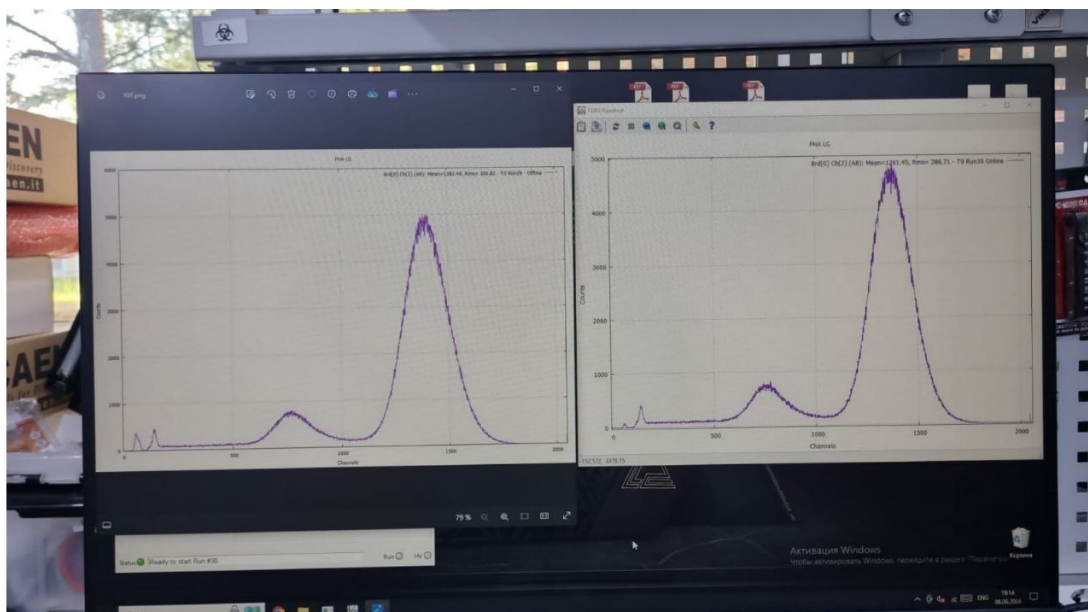


Рис. 3: Экспериментальный (слева) и контрольный (справа) спектры для проверки состава смеси

прямо от приложенного напряжения в силу вторичной ионизации атомов газа и лавинного умножения) через внешние разделительные конденсаторы  $C_2$  с устройства STM-VMM на основе интегральной платы VMM3A, установленного напрямую на детектор. Для считывания сигнала с устройства используется микроконтроллер stm32g4 — он записывает сигналы во временный буфер, затем отправляет на ПК через интерфейс UART — он же используется для управления STM-VMM с ПК, задания настроек работы, сохраняющихся в энергонезависимой памяти.

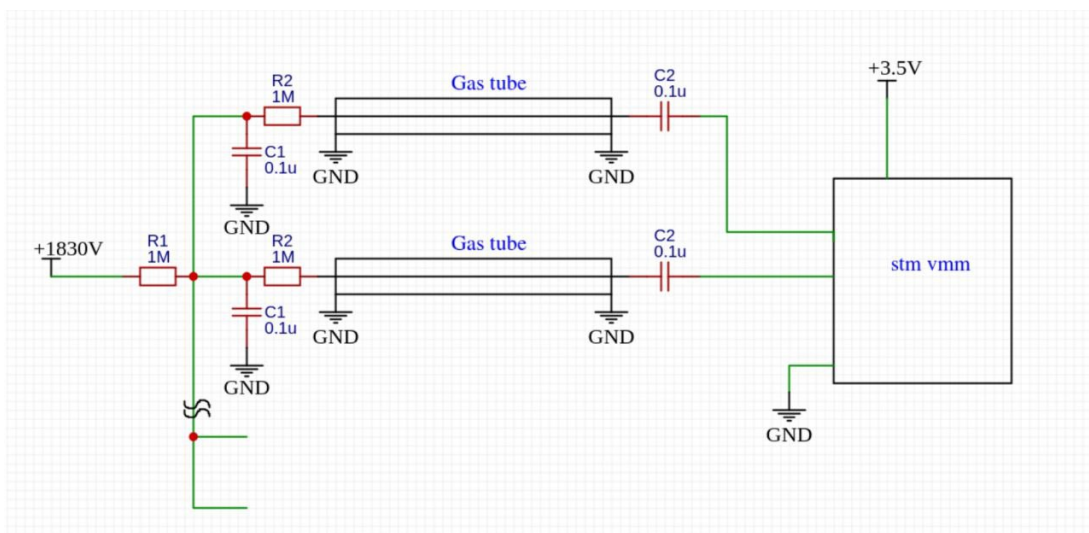


Рис. 4: Принципиальная электронная схема

# СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ

## Анализ данных

Данные с STM-VMM сохраняются в формате ROOT-дерева — основной интерес представляют ветки:

- `bcid` — время по кварцевому аппаратному таймеру частоты 40 МГц в каждой трубке. Тип данных — `UInt_32t`, в связи с чем каждые 100 секунд счётчик 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, записываемое по системному времени подключённого ПК. Соответствует именно времени записи события, поэтому может давать систематическую погрешность до 5 мс.

Для космических мюонов ожидаемо получить распределение Ландау для энергетических потерь в детекторе [1]:

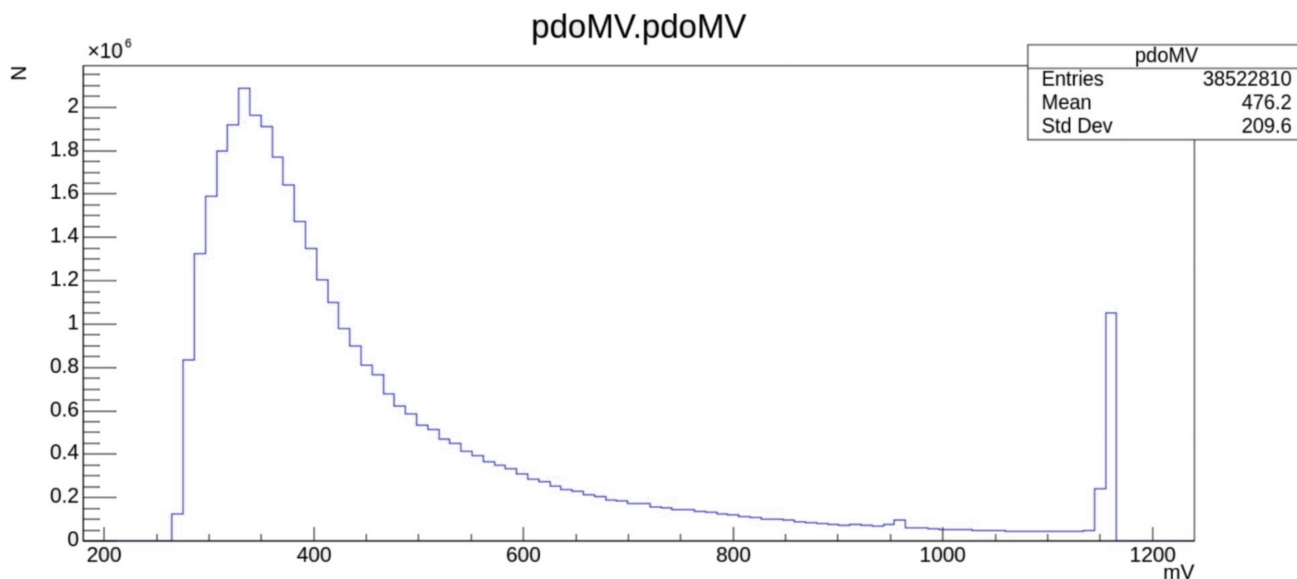


Рис. 5

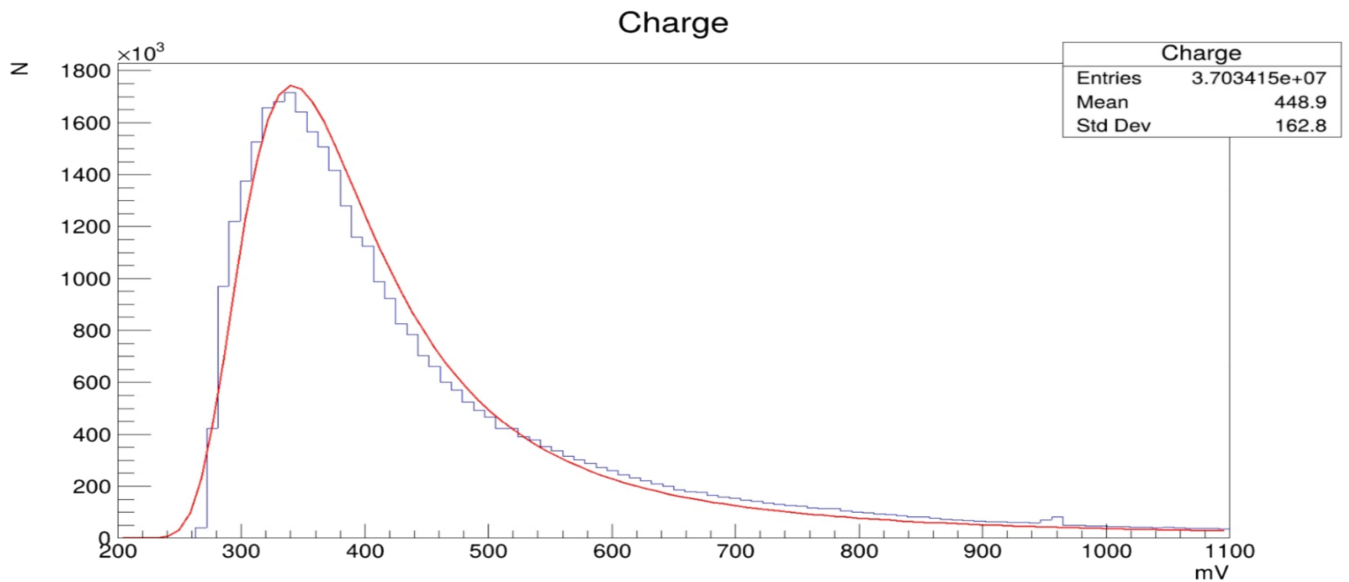


Рис. 6

## Проблема синхронизации и анализ методов решения

Модульность конструкции детектора означает раздельность записи событий у нескольких модулей, что в совокупности с погрешностью как Unix-времени записи события, так и аппаратного таймера, приводит к невозможности сопоставления записей, принадлежащих одной частице, и, следовательно, невозможности её отслеживания и построения трека. Методы решения включают в себя:

1. Программный — посредством выявления статистических закономерностей записанных событий на этапе анализа данных. Очевидно, этот метод довольно приближённый и требует большого объёма собранных данных.
2. Внешний триггер — форма записи, используемая во многих крупных установках: создание внешнего аппаратного триггера, имеющего определённый порог регистрации и объявляющего о начале события детекторам, так что из временных буферов записываются лишь короткие отрезки до и после пика регистрации — а это значительно упрощает вышеупомянутое статистическое сопоставление. Этот метод требует сложного алгоритма фильтрации данных из буфера, но предпочтителен при исследовании узких энергетических диапазонов частиц, и для детекторов малого размера. Альтернативно, в качестве такого триггера можно использовать сам один из модулей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы изучены общие вопросы об устройстве, принципах работы и изготовления дрейфовых и straw-трубчатых детекторов (изложенные в [4]), их применении в экспериментах SPD и PANDA;

К сожалению, непосредственно изучить работу с детектором мюонов из КазНУ на практике не представилось возможным по причине неимения лабораторией аргона и углекислого газа на момент проведения работы. Тем не менее, отдельно были запрошены и прочитаны отчёт прошлого года о сборке и калибровке газораспределительной системы стенда и недавние наработки об успешной программной синхронизации модулей стенда, на которые также ссылается набранная статистика измеренных энергий в секции «Анализ данных».

# Список литературы

- [1] Nikolay Shul'ga Eugene Bulyak. "Landau distribution of ionization losses: history, importance, extensions". B: (2022).
- [2] L. Glonti, T. Enik и др. "Longitudinal tension and mechanical stability of a pressurized straw tube". B: *Instruments 2018, 2, 27* (2018).
- [3] Technical Design Report for the: PANDA Straw Tube Tracker. "PANDA Collaboration and others". B: *Eur. Phys. J. A* (2013).
- [4] Fabio Sauli. "Gaseous Radiation Detectors". B: *Cambridge University Press* (2015).
- [5] Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA. "The SPD Collaboration and others". B: *Natural Science Review 1 1* (2024).