

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук**

На правах рукописи

Садыков Жакыпбек Турланович

**Экспериментальные исследования на основе методики
трековых детекторов в физике элементарных частиц**

Специальность 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2024

Работа выполнена в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСИС» и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук».

Научный руководитель: Полухина Наталья Геннадьевна, доктор физ.-мат. наук, г.н.с. ФИАН
Официальные оппоненты: Ким Виктор Тимофеевич, доктор физ.-мат. наук, Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», зам. руководителя ОФВЭ, Заведующий лабораторией физики элементарных частиц
Юркин Юрий Тихонович, кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры Экспериментальной ядерной физики и космофизики НИЯУ МИФИ
Ведущая организация: Институт ядерных исследований Российской академии наук

Защита состоится 10 февраля 2025 года в 12:00 на заседании диссертационного совета номер 24.1.262.03 на базе ФИАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на сайте <https://www.lebedev.ru>.

Автореферат разослан « » 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
номер 24.1.262.03, д-р физ.-мат. наук

_____ С.П.Баранов

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

В экспериментах в области ядерной физики, физики элементарных частиц и астрофизики исследуются свойства элементарных частиц и взаимодействия между ними. Для реализации научных программ таких экспериментов необходимы детекторы для обнаружения частиц и для измерения их различных характеристик. Обычно для этого необходима реконструкция траектории частиц. По траекториям можно определить происхождение частицы, направление ее движения и даже более сложные параметры, такие как импульс или, при наличии магнитного поля, знак заряда частицы. Трековые детекторы широко используются в подобных экспериментах по физике частиц на протяжении уже многих десятилетий [1–4]. В трековых детекторах регистрация элементарных частиц сопровождается появлением наблюдаемых следов (треков), повторяющих траекторию движения элементарной частицы. Такая популярность трековых детекторов не случайна и обусловлена целым рядом их достоинств: наглядностью результатов эксперимента; относительной простотой и дешевизной; способностью накапливать информацию в течение длительного времени; высоким пространственным разрешением. Столь продолжительная жизнь методики, безусловно, связана с уникальным пространственным разрешением и возможностью разделения треков частиц. Ни один из применяемых сейчас детекторов элементарных частиц не может обеспечить пространственное разрешение, которое, в частности, дает ядерная эмульсия: при размере зерна 0.3–1 мкм, отклонение зерен от восстановленной траектории движения частицы в среднем не превышает 0.8 мкм, а при определенных условиях может быть уменьшено до 0.2 мкм. Использование двухсторонней эмульсии позволяет определять направление движения частиц с погрешностью менее одного миллирадиана [5]. Простота трековых детекторов также обеспечивает им существенное преимущество перед многими другими системами детектирования. Метод трековых детекторов непрерывно развивается, совершенствуется его методика, и в настоящее время трудно найти такую область науки и техники, где бы он ни использовался. Это и физика высоких энергий, и физика космических лучей, реакторная физика, металлургия, геология, археология, медицина, биология, исследования метеоритов и образцов лунных пород [6].

Целью данной работы была модернизация аппаратного и программного обеспечения сканирующего микроскопа комплекса ПАВИКОМ для обеспечения высокотехнологичной обработки и анализа данных трековых детекторов (ядерной фотоэмульсии и фосфатных стекол) при реализации экспериментальных исследований в физике элементарных частиц.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка и интеграция новых модулей управления движением прецизионного столика микроскопа при автоматизированном сканировании;
2. Разработка и интеграция нового модуля в программном пакете для кластеризации треков в фотографической ядерной эмульсии;
3. Сканирование и анализ данных трековых детекторов (фосфатных стекол и фотографической ядерной эмульсии) на модернизированном оборудовании;
4. Идентификация тяжелых ионов в детекторах из фосфатного стекла КНФС-3 по геометрическим и динамическим характеристикам треков, для этого потребовалась разработка новой методики поиска и идентификации треков тяжелых ионов в фосфатных стеклах;
5. Анализ и интерпретация экспериментальных данных, подтверждающих состоятельность выбранных технических решений в мюнографическом эксперименте по исследованию Свято-Троицкого Данилова монастыря на основе полученных угловых распределений потоков мюонов для известных архитектурных элементов.

Научная новизна:

1. Впервые разработаны новые аппаратные и программные модули для обработки эмульсионных пластин эксперимента SND@LHC на автоматизированном сканирующем микроскопе с диапазоном перемещения стола в горизонтальной плоскости 400 мм × 800 мм.
2. Разработан новый метод идентификации ионов в фосфатном стекле КНФС-3 на основе полученной экспериментально зависимости между скоростью изменения характеристик протравленных треков и зарядом частицы.
3. Для мюнографических измерений создана новая методика подтверждения состоятельности выбранных технических решений и достоверности полученных результатов на основе полученных угловых распределений потоков мюонов для известных архитектурных элементов здания церкви в Свято-Троицком Даниловом монастыре.

Практическая значимость. Разработанное программное обеспечение успешно используется, прежде всего, при сканировании фотографической ядерной эмульсии в эксперименте SND@LHC. По результатам анализа данных этого эксперимента по изучению нейтрино высоких энергий, возникающих в *pp*-столкновениях при энергии $\sqrt{s}=13.6$ ТэВ на Большом адронном коллайдере, уже обнаружены восемь событий-кандидатов на взаимодействия мюонных нейтрино с превышением сигнала над фоном семь стандартных отклонений 7σ [7]. Этот результат подтверждает эффективность

использования высокотехнологичного сканирующего оборудования для анализа данных об ускорительных нейтрино высоких энергий и открывает возможности для их изучения на высокой статистике.

Выполненная автором модернизация сканирующего комплекса MIC1 в лаборатории университета им. Федерико II, Неаполь позволила увеличить скорость сканирования двухсторонних эмульсионных пленок со 180 до 500 см² в час [8].

Разработанная методика идентификации тяжелых ионов в детекторах из фосфатного стекла стала основой для продолжения исследования возможности использования твердотельных трековых детекторов для термохроматографии на колонке с золотым слоем менее летучих, чем ¹¹², элементов (например, флеровий), для которых переход от сорбции на золотом слое к десорбции лежит в области высоких температур выше двухсот градусов Цельсия [9].

Инновационный неинвазивный метод мюнографии позволяет осуществлять исследование внутренней структуры историко-археологических объектов без проведения раскопок и без использования радиоактивных источников. Результаты первого в России современного успешного мюнографического эксперимента в Свято-Троицком Даниловом монастыре в полной мере продемонстрировали возможности мюнографии как уникального метода исследования с целью сохранения объектов культурного наследия. Разработанная автором методика подтверждения достоверности полученных мюнографических результатов позволила реализовать серию работ на промышленных объектах и на объектах культурного наследия [10–13]. Авторские мюнографические методические подходы и технические решения с использованием эмульсионных трековых детекторов открывают широкие перспективы для исследований в области археологии, геологии, ядерной энергетики, вулканологии, дефектоскопии и других областях на основе эффективного, экономичного и экологически безопасного метода мюнографии, используемого, в частности, с целью сохранения объектов культурного наследия и создания систем мониторинга проблемных объектов для минимизации последствий возможных природных и техногенных катастроф для населения, инфраструктуры и окружающей среды.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модернизированное аппаратное обеспечение автоматизированных сканирующих микроскопов ПАВИКОМ с имплементацией новых алгоритмов сканирования в программный пакет для обработки эмульсионных пластин эксперимента SND@LHC.

2. Методика идентификации тяжелых ионов в детекторах из фосфатного стекла КНФС-3 по геометрическим и динамическим характеристикам треков.
3. Идентификация видимых архитектурных элементов в мюнографическом исследовании здания в Свято-Троицкого Данилова монастыре.

Достоверность внедрения нового аппаратного и программного обеспечения подтверждается работоспособностью сканирующих станций, а также наличием результатов, подтвержденных при перекрестном сканировании на микроскопах в Неапольской Лаборатории Института ядерной физики Италии [13]. Результаты работы были опубликованы в международных рецензируемых журналах с высоким рейтингом. Достоверность сделанных выводов не вызвала сомнений у рецензентов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных конференциях

- TeV Particle Astrophysics (TeVPA) 2023,
- Fundamental and Applied Problems of Modern Physics 2023,
- Международной конференции памяти академика НАН РК Бооса Э. Г. 2023,
- ICHEPMS-2024.

Результаты работы автора вошли в отчёты по гранту № BR10965191 («Комплексные исследования в области ядерной и радиационной физики, физики высоких энергий и космологии для разработки конкурентоспособных технологий») Министерства образования и науки Республики Казахстан, а также Российского научного фонда в рамках программы "Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами" (проект № 23–12–00054).

Личный вклад. Автор принимал непосредственное активное участие в разработке программного обеспечения модуля управления прецизионным столом сканирующей станции MIC1 в Неаполе и в работе по созданию алгоритма кластеризации. Автором были выполнены работы по имплементации нового программного обеспечения и оборудования сканирующей станции ПАВИКОМ-1, а также экспериментальные исследования по использованию фосфатных стекол для регистрации осколков сверхтяжелых ядер и по мюнографии. Результаты, представленные к защите, получены при определяющем вкладе диссертанта.

Публикации. Общий список публикаций автора включает 25 статей. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 статьях, которые изданы в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Burtabayev, N.; Chernyavskiy, M.; Gippius, A.; Kalinina, G.; Konovalova, N.; Nassurlla, M.; Kvochkina, T.; Nassurlla, M.; Okateva, N.; Pan, A.; et al. Phosphate Glass

Detectors for Heavy Ion Identification. Universe 2022, 8, 474.
<https://doi.org/10.3390/universe8090474>

2. Burtebayev, N., Argynova, K., Chernyavskiy, M.M. et al. Method for Determining the Etching Rate in Phosphate Glass Detectors. Bull. Lebedev Phys. Inst. 49, 350–355 (2022).
<https://doi.org/10.3103/S1068335622100062>

3. Alexandrov, A.B., Vasina, S.G., Galkin, V.I. et al. A Noninvasive Muonography-Based Method for Exploration of Cultural Heritage Objects. Phys. Part. Nuclei 53, 1146–1175 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1063779622060028>

4. Vasilev, V.T., Konovalova, N.S., Okateva, N.M. et al. Modernization of the Automated Scanning Complex for Data Processing of the SND@LHC Experiment. Phys. Atom. Nuclei 86, 2251–2255 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1063778823090272>

5. Адаптация автоматизированной сканирующей установки ПАВИКОМ-1 для обработки ядерных эмульсий эксперимента SND@LHC, М.М. Чернявский, Н.С. Коновалова, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, Ж.Т. Садыков, Т.В.Щедрина, Н.И. Старков, Е.Н. Старкова, КСФ, № 9, 27–35, 2024

Содержание работы:

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена трековым детекторам, которые используются в физике элементарных частиц, в частности ядерной фотографической эмульсии.

Среди всех детекторов, используемых в физике элементарных частиц, ядерно-эмульсионные детекторы частиц до сих пор обладают самым высоким пространственным разрешением при изучении характеристик ионизирующих частиц. С помощью эмульсионных детекторов были сделаны многие открытия в физике элементарных частиц (открытие радиоактивности, мезонов, космических лучей, осцилляций мюонных нейтрино в таонные и др. [1, 5, 6]). Обработка данных трековых детекторов, проводившаяся ранее оператором на оптических микроскопах вручную, требовала огромных затрат труда и времени. Скорость измерений при этом оказывалась невысокой, что определяло низкую статистику обработанных событий. Кроме того, при таких измерениях была достаточно велика вероятность появления трудно улавливаемых ошибок, поэтому получаемые результаты плохо поддавались проверке на возможные сбои, возникающие в процессе обработки материала (например, потери измерителями следов частиц и другие ошибки).

В последние годы этот недостаток в значительной мере был преодолен благодаря прогрессу, который достигнут в производстве прецизионной техники, и созданию

оптических столов с высокой точностью перемещения по командам от компьютеров, широкому применению современных приборов с зарядовой связью (CCD-камеры) для регистрации и оцифровывания оптических изображений и вычислительным возможностям современных компьютеров. Благодаря применению этих достижений прецизионной механики, возможностям средств вычислительной техники и разработке необходимого программного математического обеспечения стала реальностью полная автоматизация труда микроскопистов. При измерениях в таком автоматическом режиме оцифрованные изображения следов заряженных частиц и ядер в трековых детекторах, полученные при помощи CCD-камер, вводятся в компьютеры, математическое обеспечение которых позволяет производить поиск, распознавание и изучение треков, восстанавливать их пространственное положение. Такой автоматизированный метод измерений практически полностью исключает использование изнурительного визуального труда микроскопистов и ускоряет процесс обработки приблизительно на три порядка по сравнению с ее длительностью при использовании так называемых полуавтоматов. Новый метод позволяет обрабатывать большие массивы экспериментальных данных и существенно увеличивать статистику событий, что раньше было практически нереально. Создание подобных автоматизированных комплексов позволило перейти на более высокий уровень проведения экспериментов, использующих трековую технику регистрации частиц, и существенно расширило круг задач, где эта техника может быть эффективно использована.

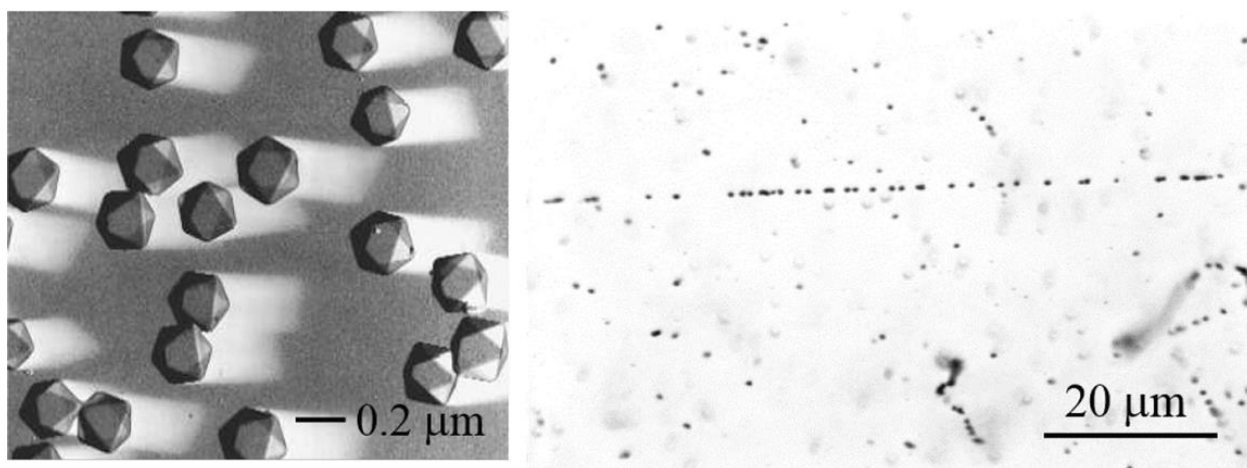


Рисунок 1 – Слева: кристаллы бромида серебра (линейный размер 0,2 мкм), видимые с помощью электронного микроскопа. Справа: след, оставленный минимальной ионизирующей частицей (10 ГэВ π^-) в ядерных эмульсиях; обнаружено около 36 зерен на 100 мкм. Комптоновские электроны с энергией приблизительно 100 кэВ также видны в правом нижнем углу изображения [6]

Вторая глава содержит информацию о технологиях сканирования трековых детекторов, о модернизации существующих механических компонентов и о внедрении

инновационных методов сканирования. В начале главы описывается модернизация сканирующего комплекса MIC1, находящегося в лаборатории университета им. Федерико II в Неаполе. Автором были выполнены работы по имплементации нового сканирующего прецизионного столика, состоящего из контроллера G 900K044, а также двигателей V-412 компании PI в состав оборудования комплекса. Помимо калибровки движения двигателей потребовалось разработать модуль управления движением стола, включающий в себя функции, описанные в таблице 1.

Таблица 1 – Основные функции модуля управления контроллером

Наименование функции	Входные параметры	Выходные параметры	Краткое описание
ReadCfg	-	-	Считывание параметров, передаваемых в контроллер из конфигурационного файла
IsConnected	-	Логические 0 или 1, как результат опроса	Опрос контроллера на наличие связи
Initialize	-	-	Проведение операций по подготовке контроллера к работе
Finalize	-	-	Проведение операций по отключению контроллера
SetVel	Порядковый номер оси движения, предыдущая скорость	Массив скоростей, где индекс является порядковым номером оси	Выставление скорости движения стола
SetAccel	Порядковый номер оси движения, предыдущее ускорение	Массив ускорений, где индекс является порядковым номером оси	Выставление ускорения
SetDecel	Порядковый номер оси движения, предыдущее замедление	Массив замедлений, где индекс является порядковым номером оси	Выставление замедления
Zero	Порядковый номер оси	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Обнуление координат

Stop	-	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Остановка движения на всех осях
QueryPos	Порядковый номер оси	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Функция чтения координат с последующей записью в историю движения
MoveTo	Класс с координатами	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Функция, осуществляющая движение в заданные координаты
MoveStage	Класс с параметрами: координаты, скорость, ускорение, замедление.	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Функция, осуществляющая движение в координаты с заданной скоростью, ускорением, замедлением, а также с записью координат в историю движения.
MoveStage2	Два класса с параметрами: координаты, скорость, ускорение, замедление	Текущая позиция с последующей записью в историю движений	Функция, отвечающая за движение Stop&Go. В первую итерацию функция ожидает окончания движения, далее задает сканирование по глубине. Во вторую итерацию функция ожидает окончания сканирования по глубине, отдает команду на движение к следующей позиции и на выход.
StartMove	Порядковый номер оси, скорость	-	Начинает движение по заданной оси с определенной скоростью
StopMove	Порядковый номер оси	-	Прекращает движение по заданной оси

Была также интегрирована в систему видеокамера нового поколения (Microtron EoSens 4CXP 2) с 21 Мпикс и объектив 10x (Nikon CFI Plan Fluor 20X MI). Все это позволило увеличить скорость сканирования двухсторонних эмульсионных слоев, по сравнению с прецизионным столиком прошлого поколения, со $\sim 180 \text{ см}^2/\text{ч}$ до $500 \text{ см}^2/\text{ч}$ с. Профиль движения сканирующей станции в разогнанном режиме показан на рисунке 2.

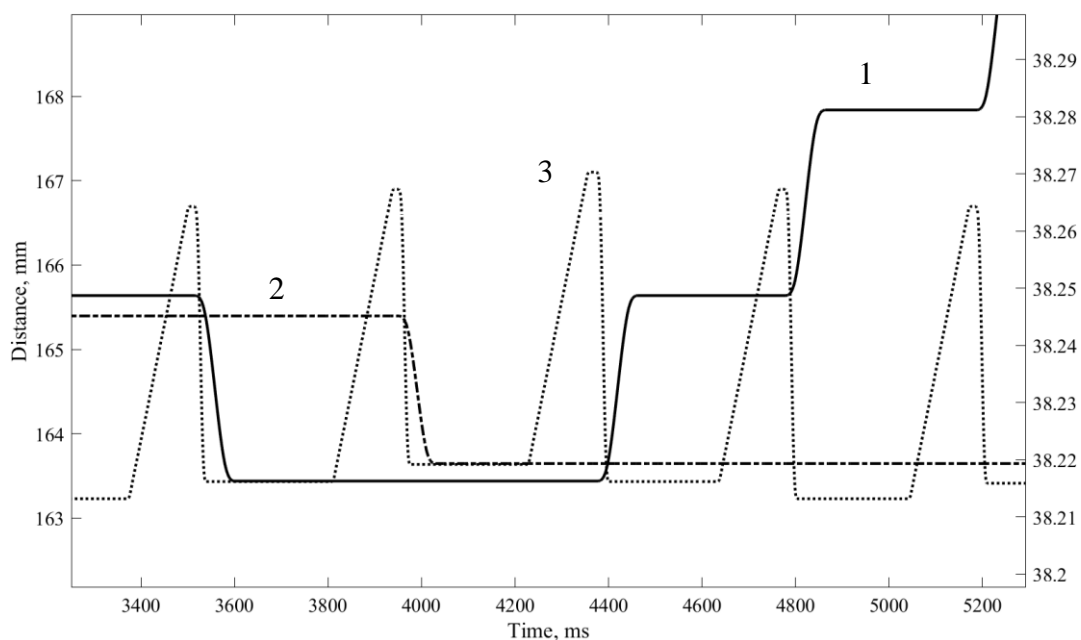


Рисунок 2 – Профиль движения сканирующей станции. 1 – горизонтальное перемещение (X), 2 – горизонтальное перемещение (Y), 3 - вертикальное перемещение.

Далее описывается модернизация сканирующей станции ПАВИКОМ-1, где основным отличием от МІС1 является большая площадь сканирования 400×800 мм (по сравнению с 400×400 мм на МІС1), а также другой подход к отправке команд на движение.

Затем описывается разработанный автором новый алгоритм кластеризации, который использует метод разделения изображения на отдельные объекты, каждый из которых состоит из 16 пикселей, расположенных в виде квадратной матрицы размером 4x4 (рисунок 3 (1)). Каждая ячейка этой матрицы соответствует определенному пикселю и указывает на его точное положение на исходном изображении. Общее количество различных комбинаций расположения пикселей внутри такой матрицы составляет 65536.

Пиксели могут быть представлены в виде двоичных чисел, где уровень черного или белого определяет значение (1 для черного и 0 для белого, рисунок 3 (2, 3)). Эти бинарные значения могут быть преобразованы в десятичные числа путем простого преобразования совокупности битов в его десятичное эквивалент (рисунок 3 (6, 7)). Матрица 4x4 может быть представлена одним десятичным числом в диапазоне от 0 до 65535 (рисунок 3 (4)).

В дальнейшем формируется база данных, представляющая собой массив структур, который содержит информацию о каждой ячейке. В базе данных хранятся следующие данные о ячейке: количество кластеров, маска каждого кластера, сжатая маска возможных соседей кластера, а также количество пикселей в каждом кластере. Под маской подразумевается десятичное число, характеризующее набор значений битов в матрице. Для доступа к информации используется индекс, соответствующий матрице размером 4x4.

После разделения изображения на отдельные объекты, с помощью базы данных определяются кластеры. В цикле производится сшивка кластеров посредством сравнения маски соседей с соседним кластером. Когда последний кластер будет сшит алгоритм готов.

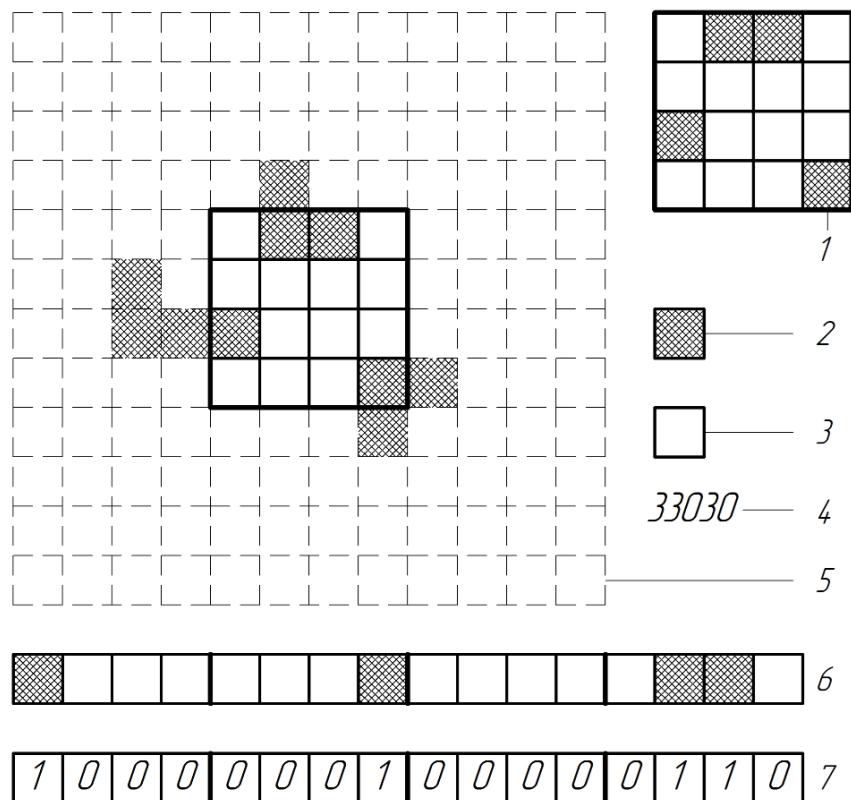


Рисунок 3 – Алгоритм кластеризации Clustering 16. Цифрами показаны этапы алгоритма: 1 – выделенная ячейка кластеризации, 2 – пиксель, принадлежащий кластеру (прошедший порог почернения), 3 – пиксель, не принадлежащий кластеру (не прошедший порог почернения), 4 – десятичное число, соответствующее ячейке кластера, 5 – исходное изображение, 6 – разложенная ячейка с почерневшими пикселями, 7 – соответствующая (6) разложенная ячейка, представленная в двоичной системе

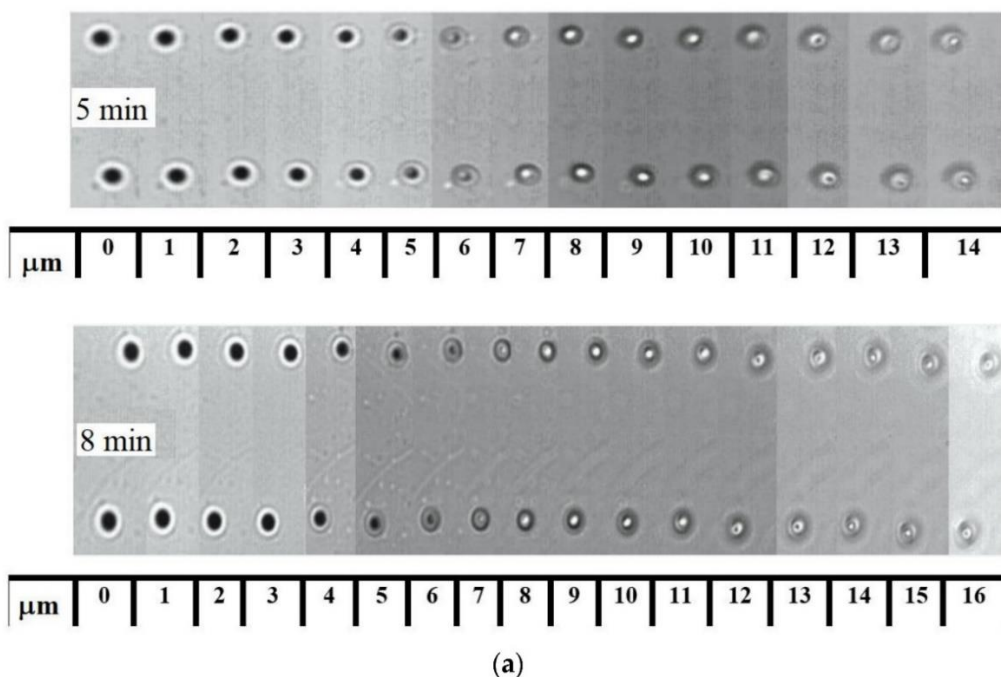
Третья глава посвящена разработке методики поиска редких событий распада сверхтяжелых ядер с помощью детекторов из фосфатного стекла.

Проблема существования сверхтяжелых трансфермиевых элементов является одной из актуальных проблем современной физики. Крупнейшие экспериментальные физические лаборатории мира работают над синтезом сверхтяжелых ядер [14, 15]. Поэтому весьма актуальной является задача создания эффективных детекторных систем для регистрации и идентификации новых синтезированных сверхтяжелых элементов. Диэлектрические трековые детекторы, в том числе изготовленные из стекла, обладают высокой эффективностью регистрации тяжелых ионов и низкой чувствительностью к фоновому излучению и, следовательно, широко используются в экспериментальной физике, в том

числе в физике тяжелых ионов [16–20]. Использование таких оптически прозрачных детекторов из фосфатных стекол позволяет, после процедуры их химического травления, выполнять сканирование стекла на оптических микроскопах с целью поиска и идентификации следов ядер.

Принцип действия диэлектрического детектора основан на эффекте разрушения локальной кристаллической структуры материала по траектории проникновения быстрого тяжелого иона. Это локальное разрушение усиливается при последующем селективном травлении, когда поврежденные участки материала вступают в реакцию с травителем более интенсивно (с большей скоростью), чем неповрежденные, что приводит к образованию видимых протравленных каналов размером до нескольких десятков микрон. Связь между скоростью травления в области скрытого следа и потерями на ионизацию является основой для определения характеристик частицы. Таким образом, идентификация тяжелых ядер в оптически прозрачных диэлектрических детекторах основана на анализе геометрических параметров вытравленных треков, поскольку масштаб радиационного повреждения диэлектрического материала пропорционален заряду частицы.

В реализованных при определяющем участии автора тестовых облучениях на ускорителе фосфатных стекол около 100 образцов размерами $10 \times 5 \times 4$ мм, обеспечивающих оптимальное сочетание оптической прозрачности и механической прочности, были облучены пучками ионов $^{40}\text{Ar}^{8+}$, $^{84}\text{Kr}^{17+}$ и $^{132}\text{Xe}^{26+}$ с энергией 1,16 МэВ/нуклон при различных углах наклона пучка к поверхности стекла.



(a)

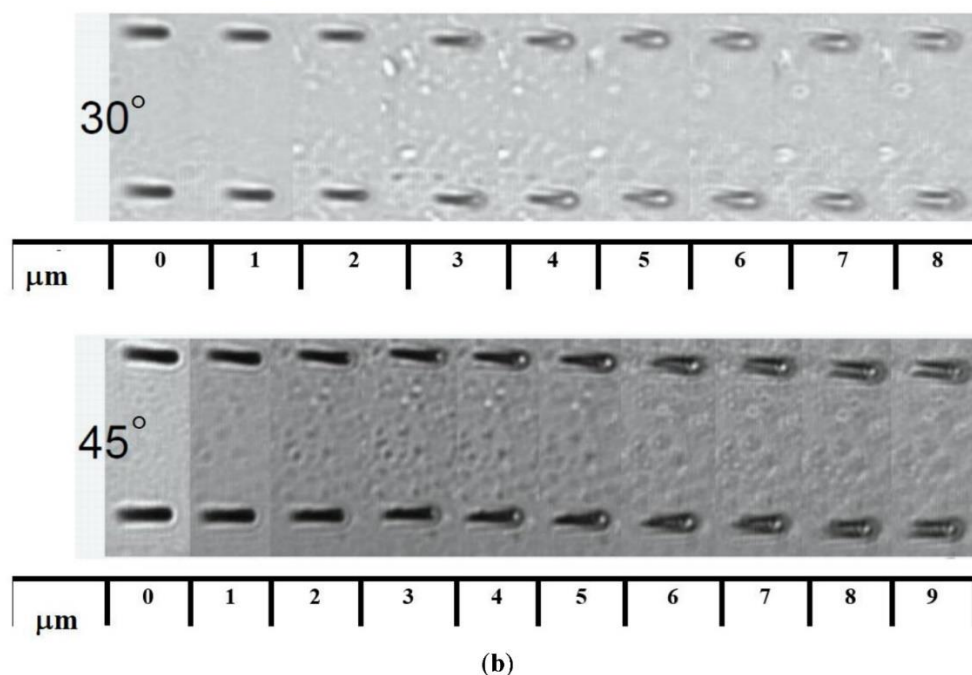
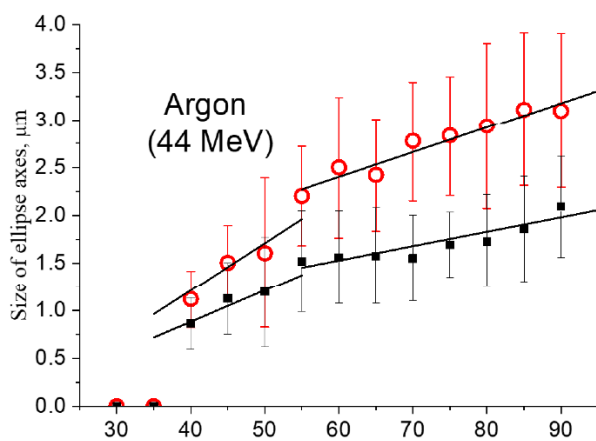


Рисунок 4 – Форма лунок ионов Хе, образовавшихся в результате травления в HF для разных времен травления: а) вертикальное вхождение, энергия ионов $E=65-68$ МэВ, время травления указано на рисунке; б) вхождение под углами 30° и 45° к вертикали, энергия ионов $E=160$ МэВ, интервал между последующими травлениями 5 мин.

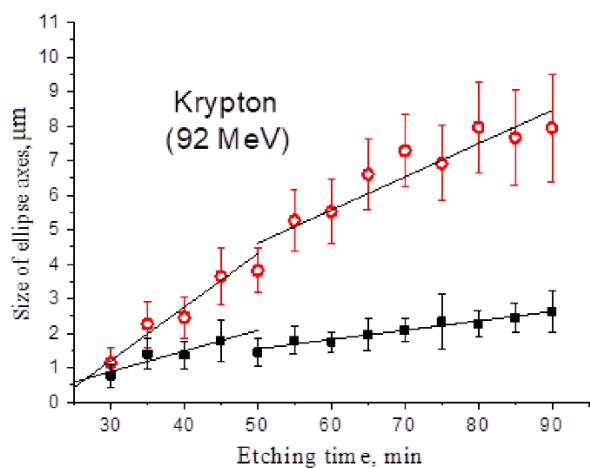
На рисунке 4 показаны результаты травления. Представлены фотографии треков ионов $^{132}\text{Xe}^{26+}$ в стекле, полученные в тестовых облучениях при различных углах наклона пучка и различной продолжительности травления.

Результаты травления в 20% HF треков ядер разного заряда с углом входа в поверхность стекла 30° представлены на графиках (рисунок 5) зависимости от продолжительности травления размеров большой и малой осей эллипса – лунки, образовавшейся в стекле при прохождении иона. Размеры лунок протравленных треков измеряются на автоматизированном комплексе ПАВИКОМ с использованием авторских программ.

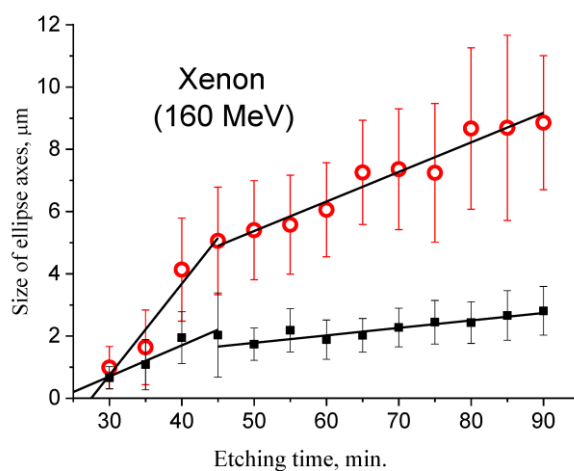
Характер полученных зависимостей показывает, что при выбранном режиме обработки процесс травления распадается на две части. Сначала, при более коротких временах травления, происходит формирование трека травления до остановки ядра. В области после "излома" избирательность травления пропадает, происходит изотропное растравливание материала без дальнейшего углубления трека. Скорость травления, определяемая как угловой коэффициент соответствующего отрезка, становится заметно ниже. В области второго сегмента скорость травления, определяемая как угловой коэффициент соответствующего сегмента, заметно ниже, чем в первом.



(a)



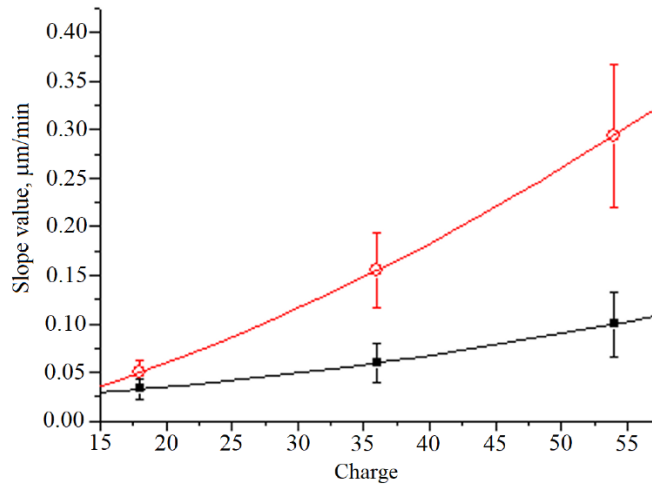
(b)



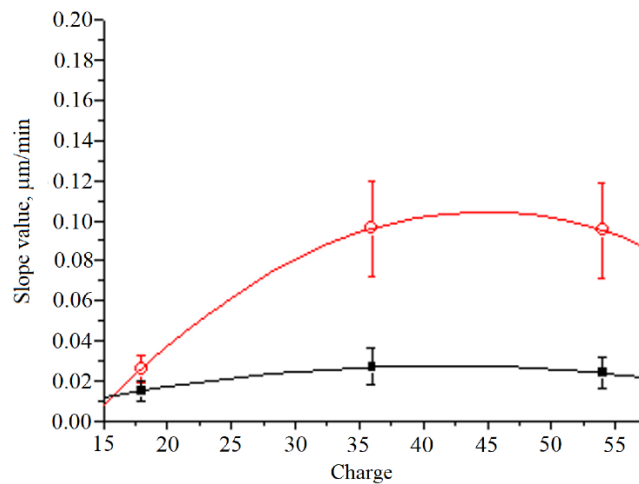
(c)

Рисунок 5 – Зависимость большой (красные точки) и малой (черные точки) осей эллипса на поверхности стекла от продолжительности травления для различных ионов ((a) — аргона, (б) — криптона и (в) — ксенона). Угол наклона луча к поверхности стекла (цветного) составляет 30° .

На рисунке б представлены коэффициенты наклона сегментов (скорости изменения осей эллипса) в зависимости от заряда иона. Сравнение показывает, что при коротких интервалах травления (рис. б) эта зависимость более выражена, в то время как с увеличением продолжительности травления чувствительность к заряду снижается (рис. б). Из этого следует, что при данных условиях интервалы травления, превышающие 50 мин, менее информативны для определения характеристик ионов.



(a)



(b)

Рисунок 6 – Зависимость коэффициентов наклона (скорости изменения размеров дорожки) от заряда ионов для большой (красная линия) и малой (черная линия) осей эллипсов: (а) продолжительность травления от 30 до 45 минут; (б) продолжительность травления более 50 минут. Экспериментальные точки аппроксимируются параболоми (цветными).

Представленный анализ зависимости геометрических параметров трека в стекле от продолжительности травления и скорости этого изменения позволяет разработать алгоритм идентификации ионов в фосфатном стекле. Заряд иона может быть оценен на основе зависимостей, аналогичных полученным в наших калибровочных экспериментах (рис. 7), путем интерполяции обратной функции. Травление с небольшими интервалами и мониторинг характеристик протравленных треков повышают надежность идентификации ионов.

Результаты проведённых исследований позволили предложить алгоритм идентификации иона при его замедлении в фосфатном стекле, в основе которого лежит установленная связь заряда со скоростью изменения размеров лунки в фазе избирательного

травления. Последовательность действий при определении характеристик ядра по его треку в стекле можно описать следующим образом. Рассмотрим случай облучения стекла разными ионами, имеющими различные углы вхождения. Сформированные ими латентные треки имеют каждый свой оптимальный режим травления. Чтобы не пропустить ядра с небольшим зарядом или идущие под малым углом к поверхности и уходящие в стекло на небольшую глубину, необходимо проводить травление с небольшими интервалами времени (порядка нескольких минут), каждый раз измеряя характеристики протравленных каналов. По каждому протравленному треку строится зависимость размеров лунок от времени травления и определяются скорости изменения этих размеров. По кривым, аналогичным полученным в наших калибровочных экспериментах (рисунок 6), производится оценка заряда иона методом интерполяции обратной функции.

Таким образом, зависимость коэффициентов наклона сегментов от заряда иона, показанная на рисунке 5, позволяет оценить заряд других ядер, для которых была проведена процедура травления со временем травления до 45–50 мин и был определен коэффициент наклона. На рисунке 6 стрелками показана процедура определения заряда ядра при значении наклона 20 микрон в минуту, определяемом как $Z = 45$. Чтобы оценить точность определения заряда, можно использовать величину погрешности измерения наклона для криптона ($Z = 36$), определяя, какие заряды соответствуют верхнему и нижнему пределам погрешности. Вспомогательные линии на графике показывают, что эти границы соответствуют зарядам $Z = 33$ и $Z = 39$. Таким образом, наклон в 20 микрон в минуту соответствует заряду $Z = 45 \pm 3$. Данный алгоритм позволяет оценить точность определения заряда ионов по предлагаемому методу.

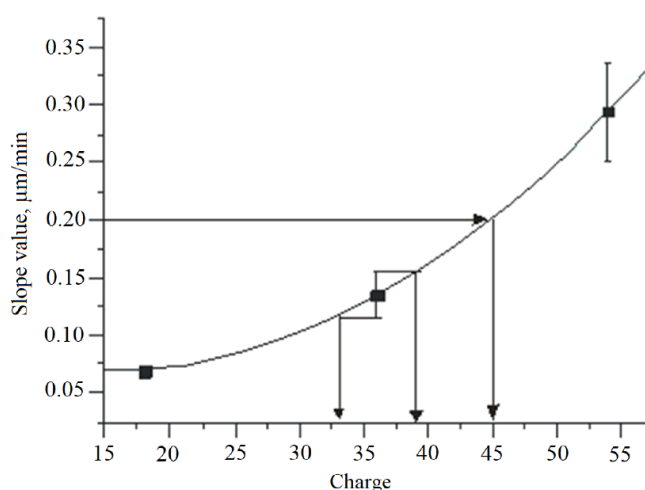


Рисунок 6 – Алгоритм определения заряда ионов (без цвета).

В настоящей работе калибровочные кривые получены для ионов с фиксированной энергией около 1,1 МэВ/нуклон. В общем случае, поведение этих кривых должно зависеть также от энергии и угла вхождения частицы, и функция для определения её характеристик

будет задаваться не кривыми на плоскости, а поверхностью. Тогда для определения заряда может быть применена двойная интерполяция.

Четвертая глава посвящена мюнографическому эксперименту, целью которого было изучение скрытой внутренней структуры зданий и территории Свято-Троицкого Данилова монастыря.

Представленный эксперимент является совместной работой нескольких российских институтов (МИСИС, ФИАН, НИИЯФ МГУ, ООО «АВК Славич»). За долгую историю комплекс монастыря неоднократно реконструировался, а историческая документация, включающая планы построек, была безвозвратно утеряна. С помощью «просвечивания» мюонами зданий и подземных зон монастыря предполагалось обнаружить возможные скрытые неоднородности (подвальные помещения, захоронения или склепы). Учитывая невозможность проведения раскопок из-за статуса монастыря как объекта культурного наследия федерального значения, применение в данном случае неинвазивного метода мюнографии - единственно возможный метод. Одновременно эта исследовательская работа способствовала научно-техническому освоению и развитию самого метода мюнографии в историко-археологической области и стала яркой демонстрацией его возможностей.

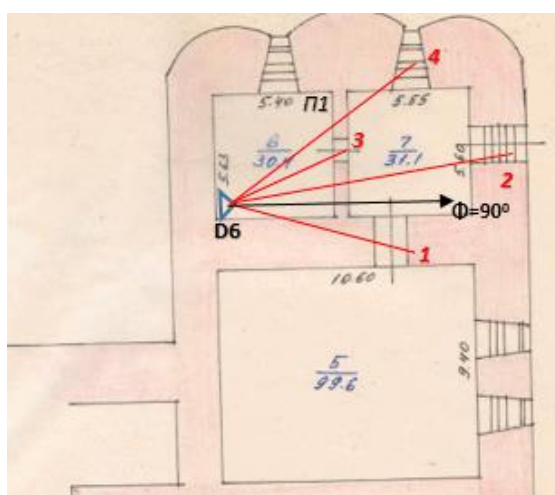
Предметом изучения в данном эксперименте стали здания Церкви Похвалы Божьей Матери и Церкви Всех Святых, а также территория между ними (рисунок 7).



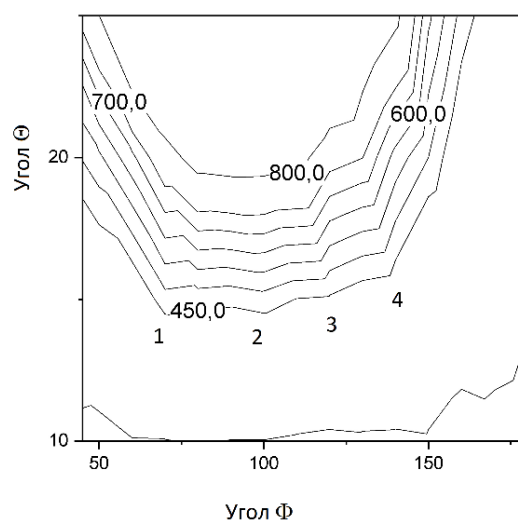
Рисунок 7 – Территория Свято-Троицкого Данилова монастыря. Цифрами на красном фоне обозначены области исследований: 1 – подвалы здания Церкви Похвалы Божьей Матери (ЦПБМ) и прилегающая территория; 2 – возможные остатки старого

фундамента здания Церкви Всех Святых; 3 – участок территории между зданиями церквей; 4 - Троицкий собор.

Одной из задач эксперимента, именно в решении которой был определяющий вклад автора, стала проверка методики, конкретно, её чувствительности к изменениям количества материала на пути мюонных потоков, приходящих с разных направлений. Эта проверка проводилась на видимых архитектурных элементах подвальных помещений ЦПБМ. Анализ результатов измерений показал, что использованные в работе детекторы «чувствуют» пустоты (дверные и оконные проёмы, переходы между помещениями) размером от 50×50 см на фоне окружающих стен на расстоянии 10-15 м. Этот результат иллюстрируют данные детектора б, находившегося в подвале ЦПБМ (рисунок 8, а). На рисунке 8, б показан фрагмент распределения числа мюонов, полученного в детекторе, на котором выступы, отмеченные цифрами, соответствуют направлениям на пустоты, обозначенным теми же цифрами на рисунке 8, а.



а)

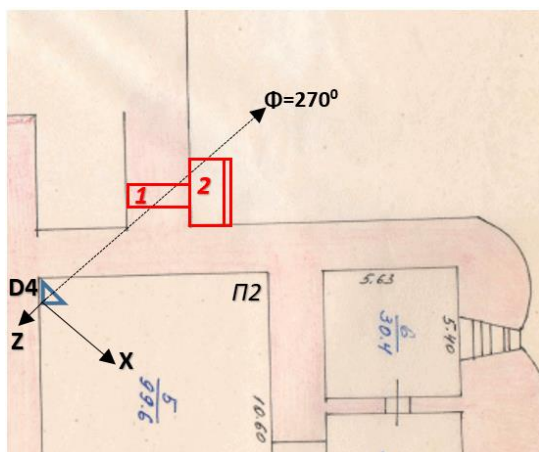


б)

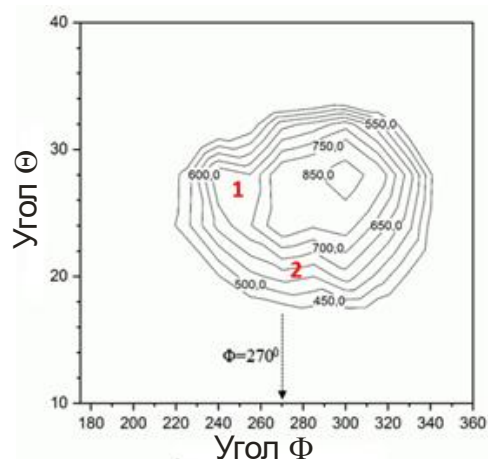
Рисунок 8 – а) План части подвала ЦПБМ, просматриваемой детектором б. Указаны лучи, пересекающие элементы строения: 1 – переход из маленького подвального помещения в большое, 2 – вход в подвальные помещения ЦПБМ, 3 – переход между маленькими подвальными помещениями, 4 – окно в маленьком подвальном помещении.

б) Линии уровня, полученные по данным детектора б для направления «назад». Небольшим локальным объектам, типа дверных или оконных проёмов, соответствуют небольшие пики на линиях уровня.

Данные других детекторов также демонстрируют соответствие между особенностями хода линий уровня и направлениями на реальные фрагменты зданий. Ниже это соответствие проиллюстрировано данными детекторов 4 (рисунок 9) и 5 (рисунок 10).



а)



б)



в)

Рисунок 9 – Результат экспозиции детектора 4: а – схема установки детектора; б – линии уровня, полученные по данным детектора для направления «вперед» (цифрами показаны особенности распределения); в – фотография двери и массивной лестницы, «увиденных» детектором, находившемся в подвале на глубине 3 метра на расстоянии примерно 7 метров от комнаты за дверью (1) и лестницы (2).

На рисунке 10 представлен результат измерения потоков мюонов детектором 5 в направлении назад. На рисунке 10, а цифрами 1 и 2 обозначены оконные проёмы в подвале ЦПБМ, а на рисунке 10, б приведён результат обработки данных детектора в переменных t_x , t_y , где эти проёмы, обозначенные теми же цифрами, чётко видны на гистограмме.

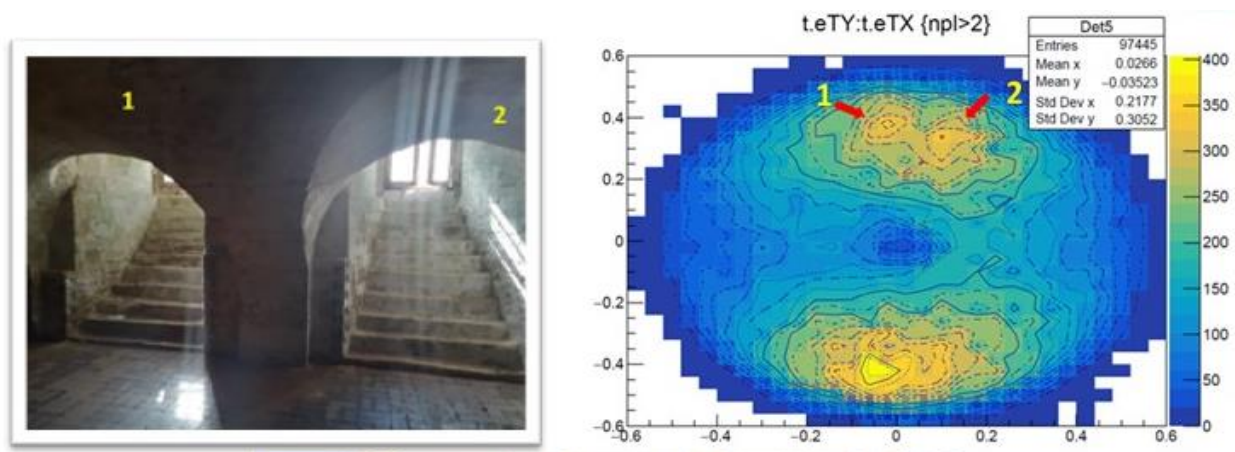


Рисунок 10 – Оконные проёмы в подвале ЦПБМ, «увиденные» детектором 5: а – фотография оконных проёмов, б – распределение потоков мюонов в переменных t_x и t_y , цифрами 1 и 2 указаны «сигналы» от оконных проёмов.

Таким образом, регистрация методом мюонографии наблюдаемых архитектурных элементов здания ЦПБМ позволила подтвердить состоятельность этого метода с применением эмульсионных детекторов и достоверность получаемой информации.

Убедительные результаты, полученные описанным методом для видимых структурных фрагментов здания ЦПБМ, дали основание использовать его для поиска и исследования недоступных областей, таких как скрытые части подвалов, неизвестные захоронения, исторические фундаменты и т.д. С этой целью при дальнейшем анализе данных были рассмотрены попарные пересечения секторов обзора (лучей) детекторов, зарегистрировавших особенности на линиях уровня (выпуклости, соответствующие менее плотным областям или впадины, соответствующие более плотным областям). В результате были выделены области, в которых предположительно могли находиться фрагменты с аномальной плотностью.

Итогом эксперимента стало обнаружение в замурованной части подвалов ЦПБМ двух пустых комнат и значительного уплотнения (стены, перегородки) по направлению к главному входу в монастырь. Обнаружен неизвестный воздуховод на уровне первого этажа ЦПБМ. На территории монастыря между зданиями ЦПБМ и ЦВС выявлены три полости, происхождение и назначение которых может представлять большой интерес для дальнейших археологических изысканий [21; 22]

В **заключении** сообщается, что в результате работы над диссертацией была осуществлена модернизация аппаратного и программного обеспечения сканирующего комплекса ПАВИКОМ для обеспечения высокотехнологичной обработки и анализа данных трековых детекторов (фотографической ядерной эмульсии и фосфатных стекол) при реализации экспериментальных исследований в физике элементарных частиц.

При определяющем участии автора модернизирован и введён в действие самый большой сканирующий микроскоп комплекса, ПАВИКОМ-1, для сканирования ядерной эмульсии эксперимента SND@LHC. Проведённая модернизация обеспечила корректную настройку сложной оптической системы и возможность в полном объеме выполнять сканирование эмульсий эксперимента и первичную обработку данных.

Основными результатами диссертации являются:

1. Установка новых аппаратных и программных модулей управления движением прецизионного столика автоматизированного сканирующего микроскопа ПАВИКОМ-1 с диапазоном перемещения стола в горизонтальной плоскости $400 \text{ мм} \times 800 \text{ мм}$.

2. Имплементация новых алгоритмов сканирования в программный пакет для обработки эмульсионных пластин большой площади и обеспечения их совместимости с требованиями эксперимента SND@LHC.

3. Модернизация сканирующего комплекса MIC1 в лаборатории университета им. Федерико II (Неаполь) с установкой и вводом в действие новейших линейных двигателей V-412 компании PI, позволившая увеличить скорость сканирования двухсторонних эмульсионных плёнок со 180 до $500 \text{ см}^2/\text{час}$.

4. Разработка и интеграция в программный пакет ПАВИКОМ нового модуля кластеризации треков в фотографической ядерной эмульсии, обеспечивающего эффективную первичную обработку данных при увеличенном поле зрения и скорости сканирования.

5. Идентификация тяжелых ионов в детекторах из фосфатного стекла КНФС-3 по геометрическим и динамическим характеристикам треков.

6. Внедрение для мюнографических измерений новой методики подтверждения состоятельности выбранных технических решений и достоверности полученных результатов на основе полученных угловых распределений потоков мюонов для известных архитектурных элементов здания Церкви Похвалы Божьей Матери в Свято-Троицком Даниловом монастыре.

7. Сканирование и первичный анализ данных трековых детекторов (фотографической ядерной эмульсии и фосфатных стёкол) на модернизированном комплексе ПАВИКОМ с применением новых программных и аналитических методов обработки.

Список литературы

1. Observation of a likely example of the decay of a charmed particle produced in a high energy neutrino interaction / E. Burhop [и др.] // *Physics Letters B*. — 1976. — Т. 65, № 3. — С. 299—304.
2. Measurement of the fragmentation of Carbon nuclei used in hadron-therapy / De Lellis G. [и др.] // *Nuclear Physics A*. — 2011. — Т. 853. — №. 1. — С. 124-134.
3. Nuclear Research Emulsions II: Particle Behavior and Emulsion Applications / W. H. Barkas, D. H. Davis // *Physics Today*. — 1974. — Июль. — Т. 27, № 7. — С. 49-50. — URL: [https://doi.org/ 10.1063/1.3128700](https://doi.org/10.1063/1.3128700).
4. Observations on the Tracks of Slow Mesons in Photographic Emulsions. 2 / C. M. G. Lattes, G. P. S. Occhialini, C. F. Powell // *Nature*. — 1947. — Т. 160. — С. 486—492.
5. The OPERA film: New nuclear emulsion for large-scale, high-precision experiments // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2006. — Янв. — Т. 556, № 1. — С. 80—86.
6. Nuclear Emulsions / A. Ariga [и др.] // *Particle Physics Reference Library: Volume 2: Detectors for Particles and Radiation* / под ред. С. W. Fabjan, H. Schopper. — Cham: Springer International Publishing, 2020. — С. 383—438. — URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-35318-6_9.
7. SND@LHC neutrino results / S. Ilieva // *PoS*. — 2024. —Т. LHCP2023. — С. 038.
8. Novel Optical Scanning Technique with an Inclined Focusing Plane / A. Alexandrov, G. De Lellis, V. Tioukov // *Scientific Reports*. — 2019. — Февр. — Т. 9.
9. Features of Registration of Accelerated Heavy Ions by Phosphate Glass Detectors at Different Temperatures / N. Burtebaev [и др.] // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. — 2022. — Апр. — Т. 134. —С. 528—532.
10. Exploration of Underground Structures in the Holy Trinity Danilov Monastery by Muon Radiography Method / N. Konovalova [и др.] // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. — 2021. — Авг. — Т. 48. — С. 175—180.
11. Muonography of Caves of the Holy Dormition Pskovo-Pechersky Monastery / A. Alexandrov [и др.]. — 2023. — Сент.
12. A Noninvasive Muonography-Based Method for Exploration of Cultural Heritage Objects / A. Alexandrov [и др.] // *Physics of Particles and Nuclei*. — 2022. — Ноябрь. — Т. 53. — С. 1146—1175.

13. Исследование скрытых помещений Свято-Троицкого Данилова монастыря методом мюонной радиографии / А. Александров [и др.] // Ядер-ная физика. — 2021. — Янв. — Т. 84. — С. 496—501.
14. Recent developments in heavy-ion fusion reactions / Back B. B. [и др.]. //Reviews of Modern Physics. — 2014. — Т. 86. — №. 1. — С. 317-360.
15. Физика тяжелых ионов и ее приложения: Учебное пособие. / Оганесян Ю. Ц. [и др.] // — Издательский отдел, 2021. — №. JDS-2021-00200.
16. Phosphate glasses for identification of heavy ions / Price P. B., Cook L. M., Markert A. //Nature. — 1987. — Т. 325. — №. 6100. — С. 137-138.
17. A study of heavy ion tracks in phosphate glass detectors / Garg A. K., Kumar S., Sharma A. P. //International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes. — 1988. — Т. 39. — №. 2. — С. 109-111.
18. Track etching studies in phosphate glass detectors / Singh G., Kaur R., Virk H. S. //International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements. — 1991. — Т. 19. — №. 1-4. — С. 655-656.
19. Science and technology with nuclear tracks in solids / Price P. B. //Radiation Measurements. — 2005. — Т. 40. — №. 2-6. — С. 146-159.
20. Application of Ag⁺-doped phosphate glasses as nuclear track etch detectors / Kodaira S. [и др.] // Radiation measurements. — 2014. — Т. 71. — С. 537-540.
21. Muography of the Cave Church of the Holy Dormition Pskovo-Pechersky Monastery / Alexandrov A. B. [и др.] // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. — 2023. — Т. 50. — №. 12. — С. 603-611.
22. Nuclear emulsion detectors for the muography of underground structure of Holy Dormition Pskov-Caves Monastery / Alexandrov A. [и др.] //Physics of Atomic Nuclei. — 2023. — Т. 86. — №. 6. — С. 1095-1100.