

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

на правах рукописи
УДК 539.1.05, 539.1.07

ВЛАДИМИРОВ
Михаил Сергеевич

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ
ДАНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА ОПЕРА
НА КОМПЛЕКСЕ ПАВИКОМ**

Специальность: 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2013 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской
академии наук

Научный руководитель

доктор физико-математических наук
ПОЛУХИНА Наталья Геннадьевна

Официальные оппоненты

доктор физико-математических наук

СМИРНITСКИЙ Владимир Александрович

кандидат физико-математических наук

ГРАЧЕВ Виктор Михайлович

Ведущая организация

Научно-исследовательский Институт Ядерной Физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится «18» ноября 2013 года на заседании
диссертационного совета Д 002.023.04 Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук по адресу:

119991 г. Москва, Ленинский проспект, д.53.

Факс: 8(495)135-78-80

e-mail: postmaster@lebedev.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Физического института им.
П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Автореферат разослан “__” октября 2013 г.

Электронная версия автореферата размещена: <http://www.lebedev.ru>

Учёный секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук

Серов Александр Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена созданию системы сканирования, обработки и хранения данных эксперимента OPERA на высокотехнологичном фиановском комплексе ПАВИКОМ (Полностью АВтоматизированный Измерительный КОМплекс), развитию методов обработки данных различных трековых детекторов и разработке программного обеспечения для сканирующих станций нового поколения. Благодаря созданной автором и успешно эксплуатируемой системе сканирования и обработки эмульсионных данных ФИАН стал первым институтом, начавшим обработку событий эксперимента OPERA в России.

Комплекс ПАВИКОМ изначально создавался для обработки событий, зарегистрированных с помощью ядерных фотоэмульсий, облученных пучком ядер свинца с энергией 158 ГэВ/нуклон на ускорителе SPS (CERN) в рамках эксперимента EMU-15. Универсальность, быстродействие и постоянно обновляемое программное обеспечение ПАВИКОМ не только позволили обеспечить потребности исследований, проводимых в ФИАН, но эффективно использовались также другими российскими и зарубежными лабораториями и институтами. При этом участие группы ПАВИКОМ отнюдь не сводилось к предоставлению установки в аренду. Для каждого эксперимента группой ПАВИКОМ как минимум, дорабатывалось старое или разрабатывалось специальное программное обеспечение, часто производилась доработка аппаратуры, необходимое приспособление установки и изменение метода измерений. Фактически, ПАВИКОМ уже около десяти лет используется в режиме центра коллективного пользования и в этом смысле не имеет аналогов среди автоматизированных микроскопов в мире. На ПАВИКОМе обрабатываются практически все известные типы твердотельных трековых детекторов. Это и ядерные эмульсии, и рентгеновские пленки, и полимерные детекторы CR-39, и другие.

Один из трех автоматизированных микроскопов комплекса – ПАВИКОМ-3 создан при непосредственном прямом и решающем участии автора на всех этапах, начиная от приобретения элементов оборудования, сборки комплекса из отдельных комплектующих элементов, его освоения, разработки программного обеспечения. Предназначен он, в первую очередь, для сканирования эмульсионных данных эксперимента OPERA, однако успешно используется также для нескольких других экспериментов [1].

В число задач диссертационной работы входила также разработка

программного обеспечения с учетом нужд сканирующих систем нового поколения. Программный пакет, изначально созданный для обработки данных эксперимента EMU-15, послужил базой для развития методики сканирования и создания программного пакета для сканирующих установок нового поколения.

Созданное автором программное обеспечение позволяет повысить в два раза скорость сканирования на используемом в настоящее время на ПАВИКОМ и европейских сканирующих станциях (ESS – European Scanning Station) оборудовании. Этот пакет используется не только на ПАВИКОМ, но также и в итальянских лабораториях, в частности для сканирования эмульсионных данных экспериментов по мюонной радиографии.

Актуальность работы.

Трековые детекторы находят свое применение в экспериментальной физике уже на протяжении многих десятилетий. Ядерная фотоэмульсия (ЯФЭ), являющаяся классическим трековым детектором, имеет уникальное пространственное разрешение и позволяет разделять треки отдельных частиц.

Современные эксперименты, такие как эксперимент по прямому наблюдению нейтринных осцилляций в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ OPERA (*OPERA, Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus*), или эксперименты по мюонной радиографии используют огромное количество ЯФЭ. В эксперименте OPERA используется около 100 т ЯФЭ. Обработка такого количества ЯФЭ требует создания новых автоматизированных методов обработки.

Для накопления достаточной статистики в экспериментах с ЯФЭ необходимо обработать большую площадь фотоэмульсии. Созданная в ходе этой работы система автоматизированной обработки данных эксперимента OPERA для фиановского комплекса автоматизированных микроскопов ПАВИКОМ разработана с учетом этих требований, и может производить на скорости 40 см²/час сканирование и обработку в режиме реального времени (означающем в данном контексте обработку видеоизображений с микроскопа непосредственно при сканировании, без стадии сохранения огромного объема графических файлов на промежуточном носителе). Созданная техника позволила сотрудникам ФИАН начать подготовку и проведение экспериментов по мюонной радиографии.

Цель диссертационной работы.

Целью диссертационной работы было создание сканирующей станции для обработки данных эмульсионных пластин эксперимента OPERA и разработка программного обеспечения для сканирующих автоматизированных микроскопов

нового поколения. Обязательным требованием при создании станции была реализация ее универсальности для использования при обработке трековых детекторов других типов (CR-39, оптически прозрачные кристаллы и т.п.).

Научная новизна и практическая ценность работы

Автоматизация трудоемкого измерительного процесса при обработке данных трековых детекторов является основной задачей при создании комплексов автоматизированных микроскопов. Созданный в ФИАНе комплекс ПАВИКОМ удовлетворяет самым современным мировым стандартам. Его отличительной особенностью стала универсальность: он успешно используется для обработки данных эмульсионных и разнообразных твердотельных трековых детекторов во многих физических исследованиях, и в этом смысле является уникальным.

В состав комплекса вошла созданная и введенная в эксплуатацию автором установка ПАВИКОМ-3, при создании которой стояла, прежде всего, задача обработки эмульсионных данных эксперимента OPERA в ФИАН при сохранении универсальности для обработки данных других экспериментов. При этом одной из основных задач было значительное увеличение скорости обработки и анализа изображений для исследовательских работ по мюонной радиографии, поскольку ожидаемый объем данных в этих экспериментах не мог быть обработан при старых характеристиках установки. Такая модернизация могла быть выполнена только при условии использования самых современных аппаратных комплектующих и методов программирования.

Выполненная автором успешная сборка, настройка, прецизионная калибровка, установка специального программного обеспечения, созданная необходимая инфраструктура позволила полностью решить поставленную задачу, и сейчас на комплексе идет полномасштабная обработка событий эксперимента OPERA. Разработанное автором программное обеспечение позволило задействовать установку ПАВИКОМ-3 также в обработке данных экспериментов ОЛИМПИА, медицинских исследований, а также приступить к обработке других фотоэмульсионных экспериментов, например, экспериментов по мюонной радиографии.

Одновременно с созданием ПАВИКОМ-3 автором выполнялась разработка программного обеспечения для сканирующих систем нового поколения. Были разработаны ключевые элементы, позволившие создать распределенную систему обработки. Задействовав вычислительные возможности GPU (Graphical Processor

Unit – графический процессор), удалось значительно ускорить обработку, повысить эффективность реконструкции треков, при обработке данных в реальном времени в режиме непрерывного сканирования. Кроме возможности использования в сканирующих системах нового поколения, использующих камеру с большим полем зрения и пьезо-систему фокусировки, что позволяет увеличить скорость сканирования до 100 см²/час, разработанное программное обеспечение позволяет на уже имеющемся оборудовании увеличить скорость сканирования до 40 см²/час, при этом осуществляя восстановление треков частиц с наклоном до 45°. Восстановление треков в широком диапазоне углов позволяет снизить фон в событиях эксперимента OPERA. Созданная автором система абсолютно применима для обработки экспериментальных данных по мюонной радиографии, где требуется восстановление треков в широком диапазоне углов, а накопление достаточной статистики требует обработки большого количества эмульсионных пластин с площадью не менее нескольких квадратных метров.

Созданные при выполнении диссертационной работы методы и программное обеспечение являются необходимым этапом полной автоматизации обработки данных современных фотоэмульсионных экспериментов. Это позволяет повысить в два раза скорость сканирования на используемом в настоящее время на ПАВИКОМ и европейских сканирующих станциях (ESS – European Scanning Station) оборудовании. Этот пакет используется не только на ПАВИКОМ, но также и в итальянских лабораториях, в частности для сканирования эмульсионных данных экспериментов по мюонной радиографии.

Основные положения, выносимые автором на защиту:

Создание, настройка, и ввод в эксплуатацию автоматизированного микроскопа ПАВИКОМ-3. Создание в ФИАНе распределенной системы обработки эмульсионных данных эксперимента OPERA, а также системы хранения данных на основе системы управления базами данных (СУБД) Oracle и их синхронизации с центральной (удаленной) базой данных эксперимента.

Проверка работы системы по результатам обработки тестового события, обнаружение в нем дополнительной e^+e^- пары не обнаруженной ранее. Организация поставки эмульсионных «кирпичей» из Гран Сассо и их хранения в ФИАН. Организация массового сканирования и обработки на комплексе ПАВИКОМ (по результатам сканирования выполнен физический анализ 10 взаимодействий нейтрино в детекторе OPERA). Обучение сканированию и организация полноценных рабочих смен силами молодых научных сотрудников,

аспирантов и студентов.

Модернизация программного комплекса PAVICOM для работы в сканирующих системах нового поколения. Доработка программного комплекса для работы в сканирующих станциях нового поколения: реализация распределенных вычислений в программном комплексе; реализация ресурсоемких алгоритмов, таких как операции обработки изображений и кластеринга с использованием вычислительных мощностей современных видеокарт на основе технологии CUDA; создание гибридной CPU-GPU системы реконструкции треков в ЯФЭ; обеспечение гибкости и модульной структуры комплекса как реализация возможности использовать его при последующей модернизации оборудования. 6 из 10 исследованных на ПАВИКОМ событий обработаны новым программным комплексом.

Разработка программного обеспечения для проведения измерений геометрических параметров треков космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов проекта ОЛИМПИА и накопления базы данных изображений треков.

Личный вклад

Один из трех автоматизированных микроскопов комплекса – ПАВИКОМ-3 создан при непосредственном прямом и решающем участии автора на всех этапах, начиная от приобретения элементов оборудования, сборки комплекса из отдельных комплектующих элементов, его освоения, настройки, калибровки до разработки необходимого программного обеспечения и организации работы на нем. Автором создана система распределенных вычислений, анализа и хранения отсканированных эмульсионных данных. Отсканировано и обработано тестовое событие, в котором была обнаружена дополнительная e^+e^- пара, налажена массовая поставка, хранение и обработка эмульсионных «кирпичей» – событий эксперимента OPERA. Автором создан программный комплекс, реализующий возможность распределенных вычислений и использующий вычислительные возможности современных графических плат, имеющий также все необходимое для использования в сканирующих станциях нового поколения. Разработан и успешно реализован алгоритм и программное обеспечение для высокоэффективной реконструкции треков в широком диапазоне углов, использующий вычислительные возможности графических плат. Разработано программное обеспечение для измерений геометрических параметров треков космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов проекта ОЛИМПИА и накопления базы данных изображений треков.

Апробация работы

Основные результаты диссертации представлялись и докладывались на международных и национальных конференциях: *Международная конференция «Физико-химические и петрографические исследования в науках о Земле»* (Москва, 2011), *САММАС* (2008, 2011 Украина, Винница), *Nufact08* (Spain, Valencia, 2008), *Quarks2012* (Ярославль, 2012), рабочее совещание по разработке сканирующих систем нового поколения (Италия, Бари, 2011), рабочее совещание коллаборации OPERA (Италия, Гран Сассо, 2012; Украина, Алушта, 2012, Анси, Франция, 2012, Бари, Италия, 2013).

Всего автором опубликована 41 работа, из них по теме диссертации 10 работ в отечественных и зарубежных журналах: УФН, Известия РАН, Краткие Сообщения по Физике, Вестник Отделения наук о Земле РАН, Physics Letters, New Journal of Physics, Eur. Phys. J и др. (см. Приложение – Список публикаций по теме диссертации).

Созданный комплекс ПАВИКОМ-3 успешно используется для сканирования эмульсионных кирпичей эксперимента OPERA, а программный комплекс PAVICOM благодаря разработкам, изложенным в данной работе, используется для сканирования ЯФЭ не только в ФИАН, но и в лабораториях Национального Института Ядерной Физики (Италия)

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объём работы составляет 135 страниц без приложения, включая 51 рисунок, 11 таблиц и перечень литературы из 67 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** описаны особенности методики ядерно-физических исследований с трековыми детекторами. Рассмотрены актуальные задачи науки и техники, для решения которых широко используются трековые детекторы. Показана научная значимость эксперимента OPERA, сформулированы требования этого и других современных экспериментов к обработке эмульсионных данных. Говорится об уникальности комплекса ПАВИКОМ, использующегося для обработки данных широкого спектра твердотельных трековых детекторов.

Трековые детекторы, и в их числе ядерные фотоэмульсии, сыграли

выдающуюся роль в развитии ядерной физики в силу наглядности и возможности получения исчерпывающей пространственной картины изучаемых процессов. Ядерные фотоэмульсии широко используются в мире в целом ряде экспериментов. Самые крупные из них содержат тонны ядерной фотоэмульсии, что соответствует тысячам квадратных метров её поверхности.

При многих своих очевидных преимуществах, фотоэмульсионный метод раньше имел и серьёзный недостаток – его применение требовало тяжёлого изнурительного визуального труда, связанного с поиском нужных треков и измерением их параметров, что неизбежно было сопряжено с ошибками микроскопистов. От этих недостатков удалось избавиться благодаря созданию автоматизированных сканирующих систем. Первая полностью автоматизированная сканирующая система была создана в Японии в 1982 г, полномасштабным применением системы стала обработка данных нейтринного эксперимента CHORUS.

Изучение свойств нейтрино имеет фундаментальное значение для физики элементарных частиц, астрофизики и космологии. Если массы нейтрино отличны от нуля, то собственные состояния нейтрино с данной массой не обязаны совпадать с собственными состояниями нейтрино с данным лептонным числом. Поэтому может существовать «смешивание» нейтрино, аналогичное смешиванию кварков, описываемому матрицей Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты, приводящее к возникновению нейтринных осцилляций. Гипотеза о возможности нейтринных осцилляций была предложена Б. М. Понтекорво в 1957.

Основной задачей эксперимента OPERA (*Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus*) является поиск и изучение осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. OPERA стал первым экспериментом на "появление", в котором осцилляции $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ изучают путем прямого наблюдения распадов τ -лептонов, образованных в ν_τ -СС взаимодействиях. Проникающая способность нейтрино колоссальна, поскольку сечение взаимодействия чрезвычайно мало. По этой причине установки для регистрации нейтрино должны иметь детекторы с высоким пространственным разрешением, большие размеры и массу, измеряемую тысячами тонн. Ядерная фотоэмульсия в настоящее время является одним из лучших детекторов применительно к задачам нейтринной физики, таким образом, возникает необходимость обрабатывать огромное количество эмульсионных данных.

Завершает введение к диссертации обоснование актуальности темы исследования, формулирование целей и задач работы, во введении также отражены новизна и практическая значимость её результатов.

В первой главе представлен краткий обзор по методике трековых детекторов. Рассматриваются принципы регистрации заряженных частиц в трековых детекторах различного типа, их основные характеристики, преимущества и недостатки.

Детально рассмотрен фотоэмульсионный метод ядерных исследований, приведена краткая история фотоэмульсионного метода, подчёркивается его значимость и описывается возможность измерения с его помощью таких характеристик частиц как энергия, импульс, заряд и масса. Описаны методы обработки эмульсионных данных.

Во второй главе говорится о краткой истории экспериментальной нейтринной физики, от гипотезы о существовании нейтрино до прямого наблюдения тау-нейтрино. Подчеркнута важность решения проблемы существования нейтринных осцилляций.

В третьей главе дается описание эксперимента OPERA – первого эксперимента по прямому наблюдению осцилляций нейтрино в канале $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$.

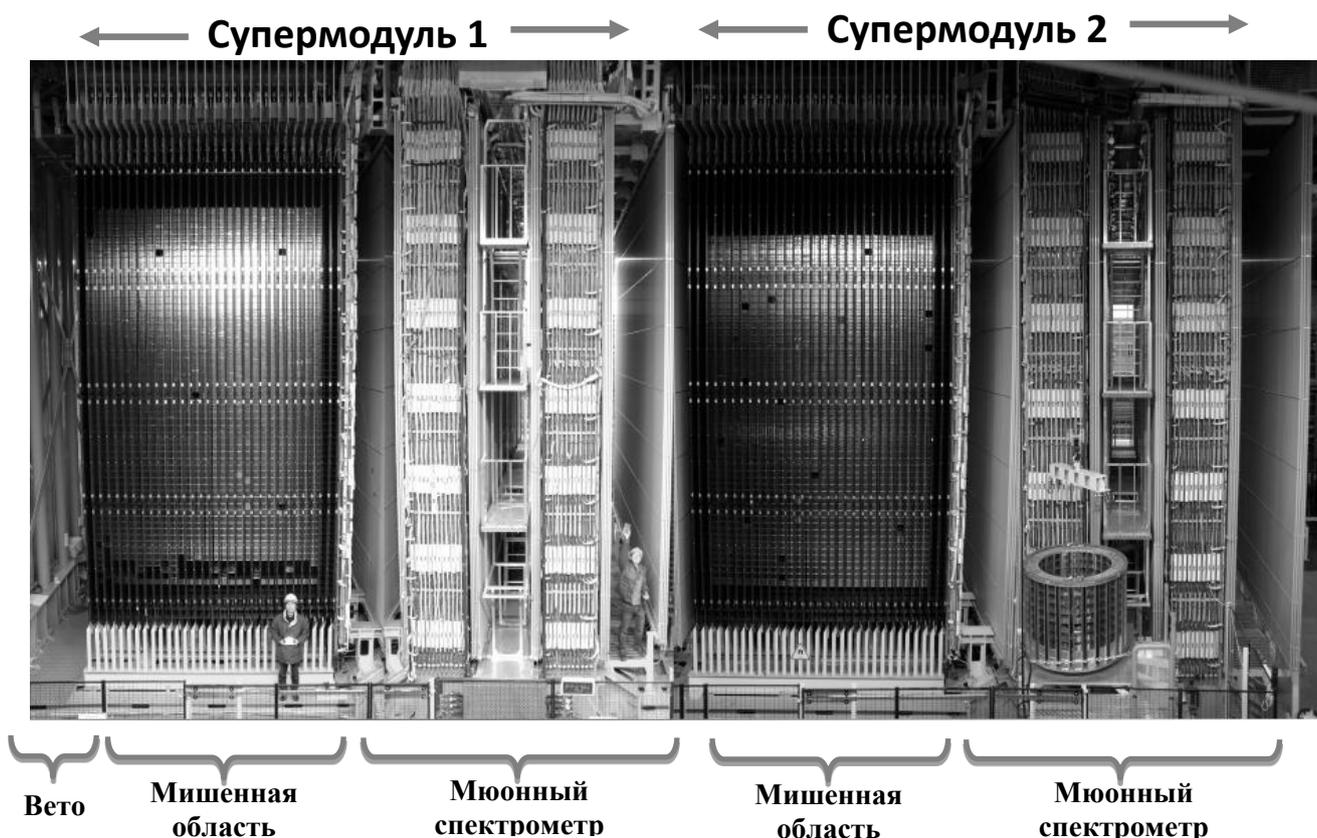


Рис. 1. Фотография детектора эксперимента OPERA.

Эксперимент OPERA использует пучок CNGS (CERN Neutrino to Gran

Sasso), который формируется на ускорителе SPS в ЦЕРН. Нейтрино пролетают расстояние 732 км до лаборатории Гран Сассо (Италия), где находится детектор эксперимента. Детектор состоит из двух супермодулей и VETO-системы (Рис. 1). Каждый супермодуль включает в себя стены из эмульсионных кирпичей (в которых происходят взаимодействия нейтрино), электронных сцинтилляционных детекторов и мюонный спектрометр, позволяющий определять заряд и импульс мюонов. Эмульсионный кирпич представляет собой набор из 57 пластин двойной фотоэмульсии (два слоя эмульсии 45 мкм, с двух сторон политых на триацетилцеллюлозную основу толщиной 200 мкм), переложенных пластинами свинца толщиной 1 мм (56 пластин). К каждому кирпичу прикреплено две дополнительные съемные эмульсионные пластины (Changeable Sheet – CS) [2].

Эти сменные пластины используются для проверки сигнала электронного сцинтилляционного детектора Target Tracker (ТТ) от заряженной частицы из нейтринного взаимодействия, прошедшей сквозь кирпич и CS, перед началом обработки эмульсионных слоев самого кирпича. При соответствующих указаниях ТТ, кирпич и CS извлекают из супермодуля, CS проявляют, сканируют и анализируют. Таким образом, CS является некоторым связующим звеном, или, как говорят, интерфейсным детектором, между ТТ и эмульсионным кирпичом. В случае, когда соответствующих треков в CS не обнаружено, кирпич возвращают в супермодуль с заменой только CS. И только при подтверждении в CS наличия сигналов взаимодействия, весь кирпич отправляется на проявку и обработку.

Детектирование появления таонного нейтрино в пучке мюонных нейтрино производится путем прямого наблюдения рождения тау-лептона по характерной топологии его распада и отделения таких событий от фона (Рис. 2). Основным фоном являются чармированные частицы, рождающиеся во взаимодействиях мюонных нейтрино, к фоновым событиям относятся также случаи кулоновского рассеяния мюонов на большие углы.

Эксперимент OPERA успешно набирает статистику с 2008 года. На данный момент завершена обработка данных 2008-2009 гг., данные 2010-2011 гг. находятся в обработке. К июню 2012 года по результатам обработки локализовано и анализируется 4611 событий взаимодействий нейтрино. В 4126 событий произведен поиск распада, из них 3224 событий по каналу заряженного тока. 55 событий идентифицировано как события с рождением чармированных частиц, 24 события – с ν_e , Уже обнаружено два события с рождением тау-лептона.

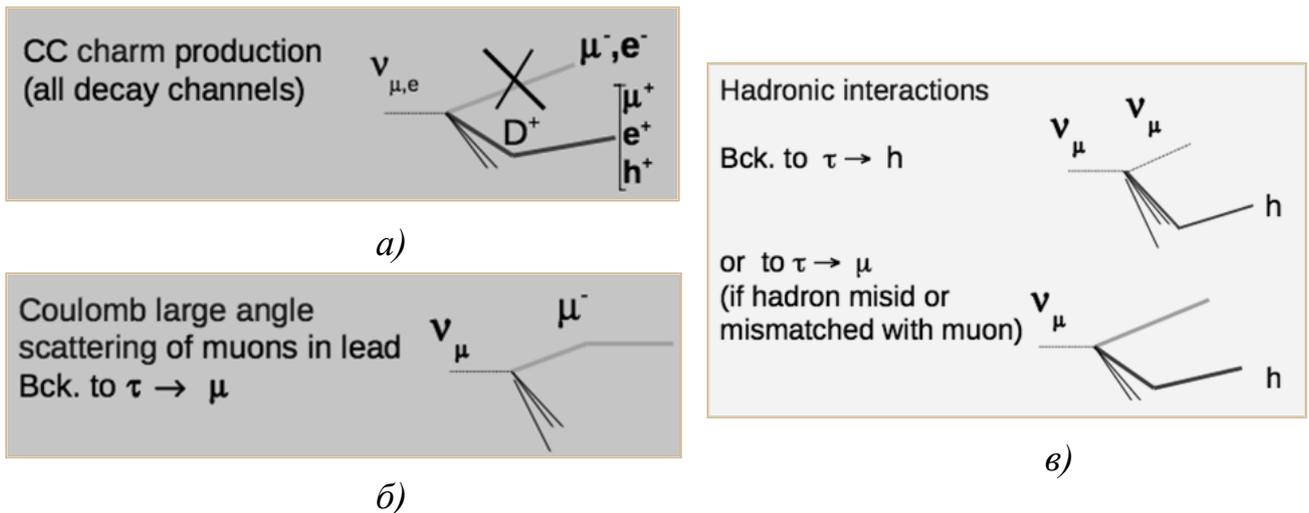


Рис. 2. Фоновые события по отношению к рождению тау лептона: по заряженному (а, б) и нейтральному (в) току.

Описана процедура обработки эмульсионных данных эксперимента в других лабораториях. Обработка такого значительного количества событий в ядерной эмульсии возможна только в автоматическом режиме. В Японии для обработки используется уже упомянутая система Track Selector. В отличие от TS, в европейских автоматизированных системах для обработки данных трековых детекторов основная часть обработки изображения выполняется специализированным программным обеспечением, что делает эти системы более гибкими для адаптации к условиям различных задач. «Европейская Сканирующая Система» (ESS), разработанная в рамках эксперимента OPERA, использует коммерчески доступное оборудование. Программное обеспечение написано на языке C++/C# и оптимизировано для работы в многопроцессорных вычислительных системах.

Несмотря на различие подходов, обе указанные системы обеспечивают примерно одинаковую эффективность: 95% для ESS и 97% для S-UTS. Скорость сканирования ESS составляет ~ 20 см²/час, скорость сканирования S-UTS ~ 50 см²/час.

В **четвертой главе** дано описание оборудования комплекса ПАВИКОМ и методики выполнения автоматизированных измерений на нем. Подробно рассмотрена процедура настройки и калибровки созданной автором установки ПАВИКОМ-3. Представлены разработанные и созданные в ФИАН элементы системы.

Измерительный комплекс ПАВИКОМ был создан в 2000 г. группой сотрудников Физического института им. П.Н.Лебедева Российской академии наук

(ФИАН), в первую очередь, для обработки ЯФЭ эксперимента ЕМУ-15. Однако при создании программного обеспечения и сборке комплекса ставилась задача его многофункционального использования, которая была успешно решена. Особенностью комплекса ПАВИКОМ, его главным отличием от всех других подобных систем и основным достоинством является универсальность: на автоматизированных установках комплекса успешно обрабатываются и ядерные эмульсии, и пластиковые детекторы, и кристаллы оливинов из метеоритов.

Комплекс ПАВИКОМ состоит из трех независимых автоматизированных установок ПАВИКОМ-1, ПАВИКОМ-2 и ПАВИКОМ-3 (Таблица 1). ПАВИКОМ-1 включает в себя микроскоп MiCos и ССD-видеокамеру, подключённые к персональному компьютеру. Оптическая система микроскопа была создана в ФИАНе с использованием элементной базы ЛОМО. Автоматизированный микроскоп ПАВИКОМ-2 создан на базе микроскопа МПЭ-11, производства ЛОМО и содержит следующие основные узлы: прецизионный стол Carl Zeiss, быструю CMOS-видеокамеру Mikrotрон MC-1310 и персональный компьютер, оборудованный платой обработки изображений Matrox Odyssey XPro.

Таблица 1. Характеристики микроскопов комплекса ПАВИКОМ.

	ПАВИКОМ-1	ПАВИКОМ-2	ПАВИКОМ-3
Диапазон перемещения стола и объектива микроскопа, мм	800 × 400 × 200	120 × 100 × 10	205 × 205 × 305
Точность измерения координат, мкм	0.5	0.25	0.2
Максимальный размер изображения	1360 × 1024	1280 × 1024	1280 × 1024
Максимальная глубина цвета, бит	10	10	10
Максимальное количество кадров в секунду	30	376	376

Автоматизированный микроскоп ПАВИКОМ-3, который был собран и введен в эксплуатацию при определяющем вкладе автора, содержит следующие основные элементы: прецизионные подвижные столики MiCos LS-110 и MS-8 с усилителем МРА-5, быструю CMOS-видеокамеру Mikrotрон MC-1310 и рабочую станцию, оборудованную контроллером движения National Instrument PCI-7344 и платой обработки изображений Matrox Odyssey XPro.

Установка ПАВИКОМ-3 была настроена и откалибрована. Стоит отметить, что положение столика перемещения по оси z должно быть выставлено с точностью 5 миллирадиана, причем подстройка положения производится итерационно. В процессе настройки системы определен набор коррекций оптического изображения, необходимый для проведения измерений на комплексе. Эффективность реконструкции треков проверена по результатам обработки стопки тестовых пластин облученных пионами с энергией 1 ГэВ под разными углами. Зависимость эффективности от угла показана на рис. 3 Средняя эффективность составляет 92%.

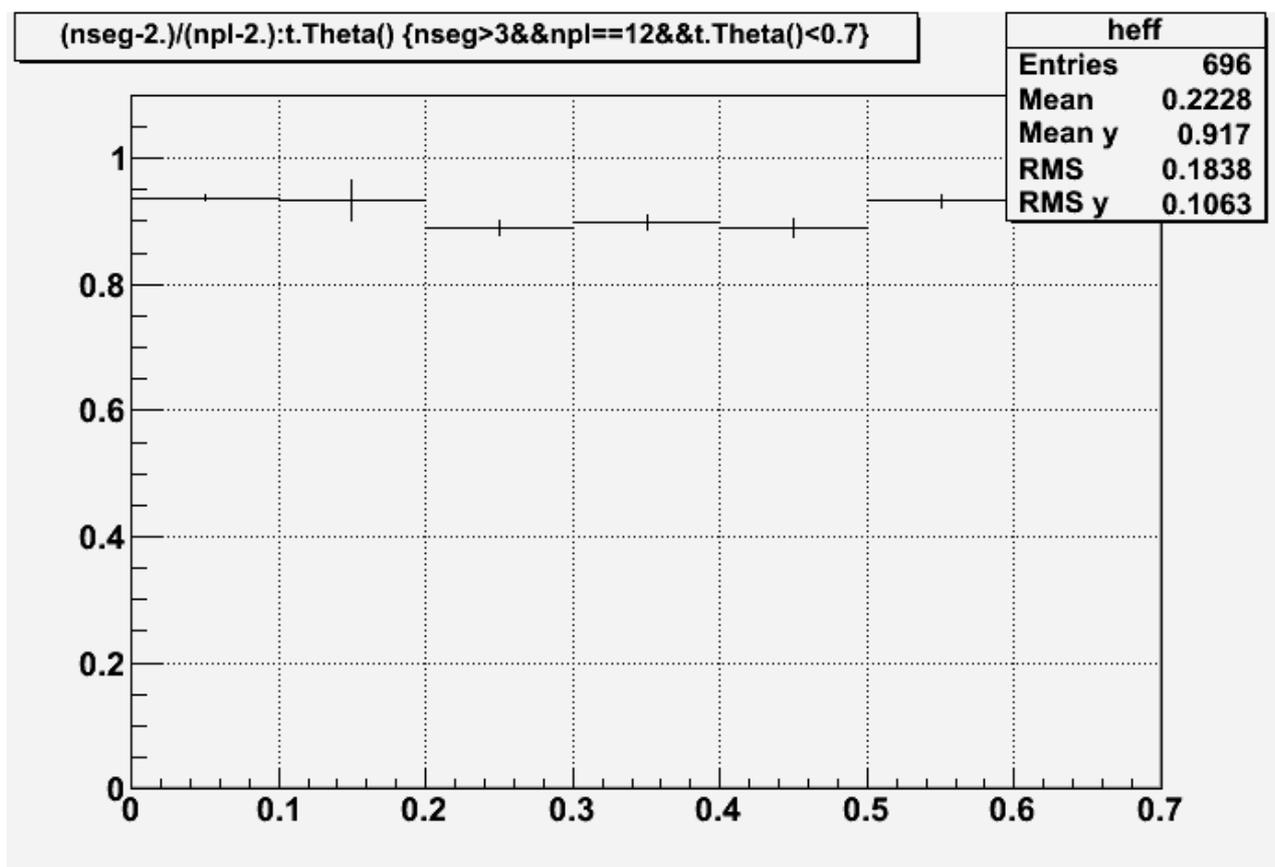


Рис. 3. Распределение эффективности восстановления треков на тестовых пластинах.

На ПАВИКОМ-3 установлено и настроено программное обеспечение, отвечающее за перемещение подвижных столиков, захват и обработку изображений на карте Matrox Odyssey XPro, управление процессом сканирования и обработку до уровня треков в одном слое эмульсии (SySal2000).

Огромный объем обрабатываемых данных требует использования нескольких компьютеров для реализации их физического анализа. Поэтому уже в режиме offline специальный компьютер выполняет обработку микротреков на

базе программного пакета FEDRA [3] – второго из блоков обрабатывающего программного комплекса. По найденным на предыдущем этапе трекам в одном слое эмульсии восстанавливаются треки, проходящие через оба слоя двухсторонней эмульсии. Далее проводится реконструкция треков в объеме всего кирпича: восстанавливается относительное расположение эмульсионных пластин по найденным в каждой пластине базовым трекам и реконструируются объемные треки. После этого производится поиск вершины распада, места взаимодействий вторичных частиц и, таким образом, восстановление топологии события.

Третьим основным блоком программного комплекса ПАВИКОМ-3 является база данных ORACLE, в которой хранятся данные об отсканированных событиях. Она синхронизируется с центральной базой данных эксперимента.

На автоматизированном микроскопе ПАВИКОМ-3 была произведена калибровка оптической системы, положения подвижных столиков.

Была разработана и смонтирована автоматическая система поддержания давления в системе вакуумного прижима эмульсий (для крепления эмульсии во время сканирования). Вакуум давлением до 150 мбар обеспечивается вакуумным насосом производительностью 3 м³/час, который откачивает воздух из ресивера объемом 50 л. Давление контролируется электронным датчиком с рабочим диапазоном 0-1000 мбар, и точностью измерений 10 мбар. Для уменьшения износа насоса и уровня шума в рабочей комнате была разработана и изготовлена система автоматического поддержания давления в системе в пределах 250-500 мбар. Когда давление, по показаниям датчика, поднимается до 500 мбар, система включает насос и открывает клапан между насосом и вакуумной системой. При снижении давления до уровня 250 мбар система сначала закрывает клапан (во избежание утечек через выключенный насос), и затем выключает насос. Созданная автором автоматическая система поддержания давления в системе вакуумного прижима эмульсий позволила уменьшить время работы насоса на 87%.

Налажено управление блоком питания лампы подсветки TE2-PS100W посредством контроллера NI PCI-7344. Для этого автором был изготовлен соединительный кабель с делителем напряжения, обеспечивающий совместимость напряжений аналогового выхода контроллера и управляющего входа блока питания.

Таким образом, автором диссертации была собрана, настроена и откалибрована установка ПАВИКОМ-3; настроена вакуумная система, спроектирована схема ее автоматизации, организовано ее изготовление; создана

необходимая для обработки данных эксперимента OPERA инфраструктура; доработано программное обеспечение, необходимое для сканирования. В результате комплекс дополнен современной установкой ПАВИКОМ-3, полностью подготовленной для обработки данных эксперимента OPERA.

В пятой главе диссертации рассматривается текущее состояние обработки событий эксперимента OPERA на комплексе ПАВИКОМ, представлены реконструированные события. Изложены принципы организации полномасштабного сканирования на ПАВИКОМ.

В июне 2011 года было завершено сканирование первого (тестового) кирпича эксперимента OPERA на комплексе ПАВИКОМ. Прослежены треки предсказаний в объеме кирпича. Локализована вершина взаимодействия в пластине свинца между 18й и 19й пластинами эмульсии. Проведена процедура сканирования площади 1 кв. см на 15-ти пластинах вокруг вершины взаимодействия. Реконструировано 4 трека заряженных частиц (одна из которых мюон), дополнительно найдена относящаяся к этой же вершине взаимодействия e^+e^- пара от распада π^0 . (Следует отметить, что при первом сканировании этого кирпича в другой лаборатории e^+e^- пару не нашли.) Проведен физический анализ события, измерены импульсы частиц и прицельные параметры (см. таблицу 2). Все данные сканирования занесены в базу данных.

Таблица 2

№	Прицельный параметр (мкм)	Импульс (GeV)	Минимальная оценка импульса(GeV)	Максимальная оценка импульса (GeV)
7	1.2	3,8	2,8	6,0
1	1.1	1,6	1,3	2,1
17	0,8	2,9	2,2	4,5
5	2.2	-*	-	-
152, 153	127	-*	-	-

* нет достаточной статистики данных в эмульсии для оценки импульса.

В настоящее время произведено сканирование и обработка еще десяти кирпичей, следующие 16 кирпичей находятся в обработке. Организовано посменное сканирование, операторы обучены работе с системой, процедуре сканирования, обработки, реконструкции событий.

Во второй части данной главы рассказывается о том, что автором модернизировано программное обеспечение для обработки данных эксперимента ОЛИМПИА на установках комплекса. Кратко изложен процесс наладки

сканирования кристаллов оливина и текущий статус обработки.

На ПАВИКОМ с 2005 года проводятся исследования в рамках проекта ОЛИМПИА (ОЛИвины из Метеоритов – Поиск тяжелых И сверхтяжелых Ядер) – поиск тяжелых и сверхтяжелых ядер в природе. Эта проблема связана с вопросом о существовании «островов» стабильных сверхтяжелых элементов.

Однако, экспериментальные данные по сверхтяжелым ядрам в природе чрезвычайно бедны, таких ядер очень мало – их всего лишь 1-2 ядра на кв. метр в год, для трансфермиевых ядер достаточно надежные данные вообще отсутствуют. Точно так же отсутствуют какие-либо данные и о возможном существовании экзотических сверхтяжелых ядер. Поэтому для того чтобы искать их в природе, требуются детекторы очень больших площадей и длительные экспозиции.

Измерение потоков и спектров тяжелых и сверхтяжелых ядер в космических лучах является эффективным способом изучения состава источников космических лучей. Использование фактора длительной экспозиции метеоритов в космосе приводит к огромному преимуществу метода поиска сверхтяжелых элементов в кристаллах оливинов из метеоритов по сравнению с методами, основанными на использовании различных спутниковых и аэростатных детекторов. Измеряя параметры треков, можно не только идентифицировать частицы, но и определить их энергетические спектры. В проекте ОЛИМПИА исследуются образцы двух метеоритов класса паласситы: «Марьялахти» – 185 млн. лет и «Игл стейшен» – 300 млн. лет.

Разработанная в проекте ОЛИМПИА методика впервые позволяет просматривать весь объем кристалла, и тем самым существенно увеличивать статистику обработанных треков. Созданное на ПАВИКОМ программное обеспечение позволяет выделять области кристаллов, находить и измерять геометрические параметры треков ядер, а также осуществлять пространственную сшивку следов.

Автором было создано программное обеспечение для движения микроскопа при сканировании всего объема исследуемого кристалла. В отличие от обработки ядерных фотоэмульсий была поставлена и успешно решена задача сохранения изображения всего объема и измерений параметров треков в объеме кристалла. Такое программное обеспечение позволило на основе хранящейся в базе данных информации обеспечить, при необходимости, повторную обработку некоторых элементов объема исследуемого вещества, поскольку впервые использованная методика проекта ОЛИМПИА подразумевает послойную сошлифовку кристалла.

Успешное использование сканирующей станции в проекте ОЛИМПИА доказало правильность выбранного автором подхода и достигнутой требуемую универсальность нового оборудования.

Созданная система также демонстрирует универсальность созданного программного комплекса PAVICOM. Он реализует взаимодействие с оборудованием (возможность перемещения, захвата изображений, получение координат) и основной пользовательский интерфейс, а также синхронизацию работы модулей. При этом на примере обработчика для проекта ОЛИМПИА показана возможность разработки специфической для конкретного эксперимента надстройки. Такая надстройка может реализовать необходимые алгоритмы движения и обработки полученных с камеры изображений, а также дополнительный пользовательский интерфейс.

Основная задача проекта ОЛИМПИА заключается в определении зарядового состава космических лучей в области тяжёлых и сверхтяжёлых ядер [4, 5]. Уже обработано примерно 170 кристаллов, размеры кристаллов – не более 2 мм. Получено зарядовое распределение около 6000 ядер галактических космических лучей с зарядом больше, чем 55. В начале 2011 года в ходе выполнения проекта ОЛИМПИА обнаружены три сверхдлинных трека, скорость травления которых больше 35 мкм/час. Калибровочные измерения показывают, что заряды этих ядер существенно превышают $Z = 92$. Была получена в первом приближении оценка границ заряда трех ультратяжелых ядер галактических космических лучей в интервале $105 < Z < 130$. Этот результат был представлен на международной конференции по космическим лучам в августе 2011 года [6]. Выполненный регрессионный анализ позволил уточнить оценку заряда одного из трех ядер – он равен 119^{+10}_{-6} с вероятностью 95%. Именно такие ядра должны образовывать острова стабильности, их обнаружение в природе подтверждает справедливость теоретических предсказаний и оправдывает усилия по их синтезу в земных условиях.

В шестой главе рассказывается о разработке программного обеспечения для сканирующих систем нового поколения. Излагаются технические требования для создания таких систем и возможные пути модернизации. Описан программный комплекс ПАВИКОМ. Детально описан вклад автора в его развитие и доработку для сканирующих систем нового поколения.

Основной задачей сканирующих систем нового поколения является повышение скорости сканирования и достижение возможности обработки реконструируемых треков с большими углами наклона. Первое требование

связано со значительными объемами эмульсии в текущих и находящихся в стадии проектирования экспериментах. Увеличение доступного для обработки угла наклона распознаваемых треков позволяет более полно восстанавливать события, что помогает увеличить отношение сигнала к фону.

Разработанное в ФИАНе программное обеспечение ПАВИКОМ имеет следующие ключевые характеристики:

- Способность обработки изображений в режиме реального времени.
- Независимость от типа сканируемого детектора.
- Независимость от характера обрабатываемых данных.
- Возможность быстрой адаптации к новому оборудованию.
- Максимальная гибкость настройки.
- Эффективная работа в многопроцессорных системах.
- Принципиальная возможность участия в распределённых вычислениях.

Программа автоматизации измерений реализована в виде пяти независимых программных модулей. Интерфейсный модуль представляет собой пользовательский интерфейс. Модули управления видеокамерой и микроскопом предназначены для работы с аппаратурой. Обрабатывающий модуль обрабатывает полученные данные. Наконец, управляющий модуль обеспечивает их совместную работу.

Сотрудниками группы ПАВИКОМ для увеличения скорости сканирования был разработан алгоритм непрерывного пилообразного движения [7], протестированный также на оборудовании неапольской группы Национального итальянского института ядерной физики.

До сих пор сканирующие системы использовали так называемый шаговый режим движения. В этом режиме работы захват данных производится во время движения вдоль вертикальной оси, пока столы движения по горизонтальным осям остаются неподвижными. Рабочий цикл состоит из времени, необходимого для захвата данных, и времени, необходимого для перемещения к следующему полю зрения.

Как было показано в [8], скорость сканирования Европейской Сканирующей Системы (ESS), составляет около $20\text{см}^2/\text{час}$, с рабочим циклом 170-180 мс, из которых 55 мс занимает непосредственно захват изображений, и 90-125 мс на перемещение стола в положение, необходимое для следующего рабочего цикла (перемещение к следующему полю зрения). Время перемещения может быть значительно уменьшено, если использовать схему непрерывного движения. В таком режиме кадры захватываются во время постоянного движения

вдоль вертикального и горизонтального направлений, т.е. без остановки стола. Это позволяет уменьшить рабочий цикл до 80 мс. В будущем, при использовании быстрой пьезо-подвески для перемещения по оси z цикл сканирования может быть уменьшен до 56 мс.

Созданная новая система для автоматической обработки ядерных фотоэмульсий на ПАВИКОМ, использующая новый алгоритм непрерывного движения, позволяет производить сканирование со скоростью до 40 см²/час. Однако при такой скорости резко увеличивается объем данных, который придется хранить для выполнения физического анализа. Поэтому, во избежание накопления огромных массивов данных, основная обработка должна производиться в режиме реального времени – непосредственно при захвате видеоизображения. Обработка изображений в режиме реального времени, т.е. непосредственно во время сканирования, даёт возможность получить результат обработки сразу по завершению сканирования, сокращая тем самым общее время обработки данных. К тому же, возможность обработки в режиме реального времени является необходимым условием для построения сложных сканирующих систем реального времени, способных изменять свои параметры с учетом полученных результатов обработки только что полученных данных (системы с обратной связью). Такая обработка требует значительных вычислительных мощностей, использование которых возможно только при создании распределенной вычислительной системы. Определяющим элементом такой системы является программный модуль, позволяющий узлам системы обмениваться большими массивами данных с высокой скоростью и надежностью.

Такой модуль был разработан автором и интегрирован в программный комплекс ПАВИКОМ. Модуль обеспечил передачу данных по ТСР/IP сетям, позволил контролировать целостность передаваемых данных, продемонстрировал стабильную и надежную работу в системе, использующей обычную сеть, работающую на скорости 1 Gbps.

Этот программный модуль также был использован автором для построения модуля удаленного управления. Модуль удаленного управления необходим для переноса пользовательского интерфейса с машины, где выполняется управление процессом сканирования, или интеграции с системой offline обработки. Например, в обработке эксперимента OPERA цикл сканирования построен так, что именно в режиме offline система FEDRA управляет процессом сканирования, задавая требуемую область и параметры сканирования.

Программный пакет FEDRA был доработан для сканирования с помощью

программного комплекса PAVICOM.

Используемая в настоящий момент для начальной обработки изображений эмульсий OPERA плата Matrox ODYSSEY XPro не справляется с нагрузкой, возникающей при сканировании в непрерывном режиме. Поэтому для начальной обработки изображений автором было принято решение использовать графический процессор (GPU) с технологией CUDA. CUDA (Compute Unified Device Architecture) — это разработанная компанией NVIDIA программно-аппаратная архитектура, позволяющая производить вычисления с использованием графических процессоров NVIDIA, поддерживающих технологию произвольных вычислений на видеокартах. Специфика программирования для GPU заключается в том, что максимально эффективным кодом является такой, в котором, во-первых, для обработки массива данных используется один и тот же алгоритм без ветвлений, а во-вторых, следующие друг за другом потоки используют расположенные рядом в памяти данные. Такие этапы обработки изображений как вычитание общего фона, высокочастотная фильтрация, применение переменной карты порога и бинаризация идеально соответствуют этой специфике.

На ПАВИКОМ разработано тестовое приложение, производящее все эти этапы обработки изображений. Оно было протестировано на видеокарте GTX570. Время обработки одного кадра составило 0.46 мс. Время, затрачиваемое для проведения всех этих этапов с использованием Matrox ODYSSEY XPro – не менее 5 мс на последних моделях платы. Возможность обработки изображений на GPU была также интегрирована автором в программный комплекс PAVICOM. Проведенные тесты показали, что при использовании камеры Mikrotron 1305, установленной сейчас на работающих сканирующих станциях, время обработки одного кадра на плате Quadro 2000, установленной также на большинстве рабочих станций по умолчанию, составляет 1.3 мс, что соответствует 21 мс на поле зрения. Также разработан алгоритм кластеринга, использующий вычислительные ресурсы GPU.

Созданная система реализована с использованием как классических, так и самых современных методов статистической обработки данных (методы распознавания образов, математические методы и приёмы, основу которых составляет разложение сигнала в ряд Фурье). Например, выполняемая перед трекингом фильтрация изображений в математическом отношении представляет собой матричную операцию над цветами пикселей:

$$g_{i,j} = TrF^T C_{i,j}$$

где $g_{i,j}$ – новый цвет пикселя (i,j) , F – матрица фильтра и $C_{i,j}$ – матрица, составленная из цвета пикселя (i,j) и цветов окружающих его пикселей так, чтобы цвет $g_{i,j}$ пикселя (i,j) был центральным элементом матрицы $C_{i,j}$.

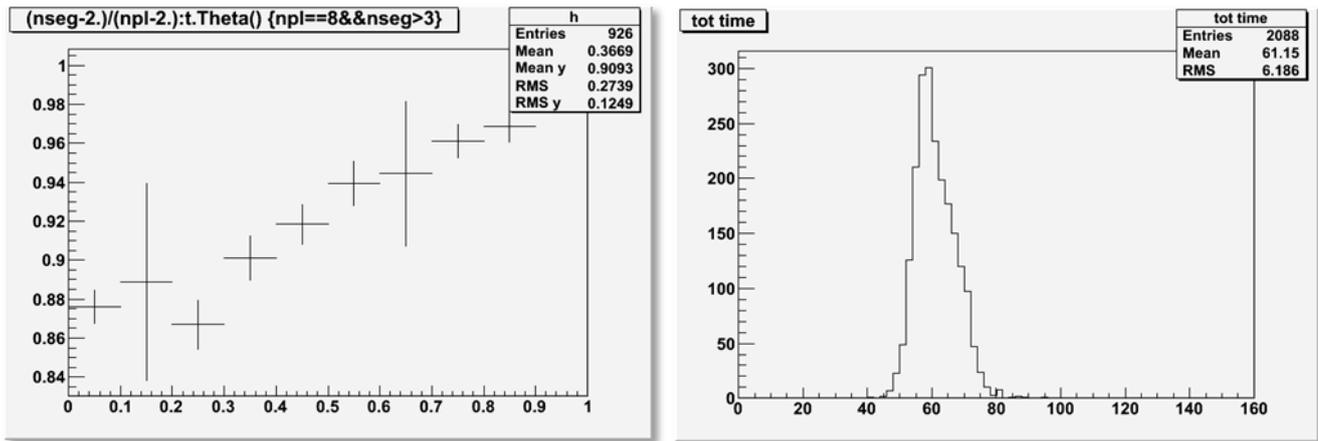
Нашей группой в сотрудничестве с неапольской группой Национального итальянского института ядерной физики была разработана высокоэффективная система трекинга. В ней был применен разработанный нами статистический подход, учитывающий возможные неоднородности плотности зерен вдоль трека в реальной эмульсии. Он позволил значительно повысить эффективность реконструкции треков. Главным отличием созданной автором новой процедуры трекинга от существующих систем является возможность реконструкции треков с высокой эффективностью в широком диапазоне углов наклона непосредственно во время сканирования. Эффективность определяется следующим образом: производится сканирование и реконструкция треков в каждом слое эмульсии, после чего восстанавливаются треки, прошедшие через весь объем. Далее для

$$e = \frac{n_{segm} - 2}{n_{pl} - 2}$$

каждого трека вычисляется величина e , где n_{segm} – число базовых треков в восстановленном треке, а n_{pl} – число пластин от начала до конца трека. Среднее этой величины для всех треков в некотором диапазоне углов называют эффективностью восстановления треков в этом диапазоне углов.

Однако применение этого трекинга для массовой обработки эмульсионных данных затруднено, ввиду его ресурсоемкости. Время обработки одного поля зрения на двухпроцессорной рабочей станции Dell T7500, с двумя 6-ядерными процессорами Xeon X5650 2.66 GHz, поддерживающими гиперпоточность, что соответствует 24 логическим процессорам, составляет ~600мс. Это практически на порядок превосходит время сканирования в режиме непрерывного циклического движения. Было решено создать гибридный CPU-GPU трекинг, создав модуль, выполняющий самую ресурсоемкую процедуру трекинга (линкинг) на GPU. Разработанный автором модуль осуществляет поиск линков (кандидатов микротреков) в наборе кластеров соответствующем одному полю зрения, т.е. прямых с высокой плотностью кластеров, находящихся на расстоянии радиуса ошибки определения положения кластера в пространстве от прямой на GPU. Использование этого GPU-модуля позволило ускорить реконструкцию треков до 61 мс (Рис. 4, б) при использовании видеокарты NVIDIA GTX690, т.е. достаточно для обработки данных в реальном времени при сканировании в

режиме непрерывного циклического движения. На рис. 4, а представлено распределение эффективности реконструкции треков в восьми слоях тестовой эмульсии, облученной пионами для диапазона углов $\text{tg}(\theta) < 1$ с помощью разработанной системы. (Сейчас максимальный угол наклона треков реконструируемых в эксперименте OPERA $\text{tg}(\theta) = 0.65$).



а)

б)

Рис. 4. Эффективность (а) и время работы (б) системы трекинга, использующей разработанный автором модуль GPU-линкинга.

Таким образом, разработанное программное обеспечение позволяет даже на текущем оборудовании ПАВИКОМ и ESS увеличить скорость сканирования в 2 раза по сравнению с используемым сейчас программным обеспечением SySal. Также программный комплекс ПАВИКОМ может быть использован в сканирующих системах нового поколения, при небольшой дополнительной модернизации оборудования. Например, при использовании камеры VDS смс 4000 “Bonito” с разрешением 2320x1726 и одной дополнительной платы NVIDIA GTX690, скорость сканирования может быть увеличена еще в три раза – до 120 см²/час.

Программный комплекс PAVICOM, в разработку которого автор сделал значительный вклад, используется в ФИАН для сканирования эмульсий эксперимента OPERA и данных тестовых экспериментов по мюонной радиографии. Также он используется в неапольском отделении Национального Института Ядерной Физики и в Национальной Лаборатории Гран Сассо. Суммарно с его помощью уже отсканировано более 50000 см² ЯФЭ. Именно с использованием PAVICOM было получено изображение вулкана Стромболи в эксперименте по мюонной радиографии.

В **заклучении** формулируются основные результаты работы и положения,

выносимые на защиту.

В ходе диссертационной работы:

- Создан, настроен, откалиброван и введен в эксплуатацию автоматизированный микроскоп ПАВИКОМ-3.
- Разработано и изготовлено необходимые для работы дополнительное оборудование (автоматическая система поддержания вакуума, автоматическое управление освещением). Настроена вся программная инфраструктура.
- Работа системы проверена экспертами OPERA по результатам обработки автором тестового события.
- Организована массовая обработка событий эксперимента. На комплексе обработано и проанализировано 10 событий – взаимодействий нейтрино в детекторе эксперимента OPERA, 6 из которых обработаны уже новым программным обеспечением; 16 находятся в обработке.
- Программный комплекс ПАВИКОМ модернизирован для работы в сканирующих системах нового поколения. Выполненная автором работа позволила использовать распределенные вычисления при обработке эмульсионных данных на комплексе; операции обработки изображений и кластеринга были реализованы с использованием вычислительных мощностей современных видеокарт; создан модуль линкинга, также использующий вычислительные мощности GPU. Таким образом, реализована возможность полной обработки отсканированных данных в режиме реального времени при сканировании в режиме непрерывного циклического движения. Созданное ПО может быть использовано в сканирующих системах нового поколения.
- Разработано программное обеспечение для измерений геометрических параметров треков космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов проекта ОЛИМПИА и накопления базы данных изображений треков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гинзбург В.Л., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Фейнберг Е.Л., Царев В.А., Проблемы и перспективы поиска следов тяжелых и сверхтяжелых ядер в оливинах из метеоритов, ДАН, 2005, т.402, № 4, 1-3.
- [2] OPERA collaboration, A. Anokhina et al., Emulsion sheet doublets as interface trackers for the OPERA experiment, 2008, JINST 3, P07005.
- [3] V. Tioukov et al., The FEDRA – Framework for emulsion data reconstruction and analysis in the OPERA experiment, Nucl. Instrum. Meth. A, 2006, 559, 103-105.

- [4] Perron C., Maury M., Very heavy ion track etching in olivin, *Int. J. Radiat. Appl. Instrum., D Nuclear Track*, 1986, v. 11, No 1/2, 73.
- [5] Perron C., Bourot-Denise M., Heavy ion track etch rate measurements and track structure in a mineral, *Int. J. Radiat. Appl. Instrum., D Nuclear Track*, 1986, v. 12, No 1-6, 29.
- [6] Aleksandrov A.B., Bagulya A.V., Vladimirov M.S. et al, Results of investigations associated with the search for tracks of relict galaxy nuclei in olivine crystals from meteorites, 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, August 2011
- [7] A. Aleksandrov, V. Tioukov, A novel approach for fast scanning of nuclear emulsions with continuous motion of the microscope stage, *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2013, V.718, 184–185
- [8] N. Armenise et al., High-speed particle tracking in nuclear emulsion by last-generation automatic microscopes, *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2005, V.551, 261.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Александров А.Б., Багуля А.В., Владимиров М.С., Гончарова Л.А., Ивлиев А.И., Калинина Г.В., Кашкаров Л.Л., Коновалова Н.С., Полухина Н.Г., Русецкий А.С., Старков Н.И., Царев В.А. Скорость травления треков высокоэнергетичных ядер тяжелых ($z \geq 30$) элементов в оливине палласита Марьялахти, *Вестник Отделения наук о Земле РАН*, 2008, №1(26)
2. Aleksandrov A.B., Chernyavsky M.M., Galkin V., Goncharova L.A., Orlova G.I., Polukhina N.G, Publichenko P.A., Roganova T.M., Sazhina G.P., Starkov N.I., Vladymyrov M.S., Tsarev V.A., Adapting and testing PAVICOM facility for treatment of OPERA experimental data *Proceedings of Science, Nufact08 materials*, 2008, http://pos.sissa.it/archive/conferences/074/143/Nufact08_143.pdf
3. Александров А.Б, Багуля А.В., Владимиров М.С., Гончарова Л.А, Ивлиев А.И., Калинина Г. В., Кашкаров Л.Л., Коновалова Н.С., Окатьева Н.М., Полухина Н.Г., Русецкий А.С., Старков Н.И., Царев В.А., Методика определения заряда ядер космических лучей по трекам в кристаллах оливина из метеоритов, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, 2008, т.7, 19-27
4. Александров А.Б., Багуля А.В., Владимиров М.С., Гончарова Л.А., Ивлиев А.И., Калинина Г.В., Кашкаров Л.Л., Коновалова Н.С., Окатьева Н.М., Полухина Н.Г., Русецкий А.С., Старков Н.И., Зарядовый спектр ядер галактических космических лучей в оливинах из метеоритов, *УФН*, 2010, т.180, 839–842
5. N. Agafonova, A. Aleksandrov et al, Observation of a first ν_τ candidate event in the

OPERA experiment in the CNGS beam, *Physics Letters B*, 2010, V.691 Issue 3, 138-145

6. N. Agafonova, A. Anokhina et al, Measurement of the atmospheric muon charge ratio with the OPERA detector, *Eur. Phys. J. C*, 2010, 67, 25–37

7. N. Agafonova, A. Aleksandrov, et al, Study of neutrino interactions with the electronic detectors of the OPERA experiment, *New Journal of Physics*, 2011, 13, 053051

8. N. Agafonova, A. Aleksandrov et al, Search for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ oscillation with the OPERA experiment in the CNGS beam, *New Journal of Physics*, 2012, 14, 033017

9. Александров А.Б., Владимиров М.С., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Щедрина Т.В., Система обработки эмульсионных данных эксперимента ОПЕРА на комплексе ПАВИКОМ и перспективы ее использования для сканирования объектов методами мюонной радиографии, *Краткие Сообщения по Физике*, 2012, 9, 38-50

10. Александров А.Б., Багуля А.В., Владимиров М.С., Гончарова Л.А., Ивлиев А.И., Калинина Г.В., Кашкаров Л.Л., Коновалова Н.С., Окатьева Н.М., Полухина Н.Г., Русецкий А.С., Старков Н.И., Обнаружение треков ядер трансурановых элементов в составе галактических космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов, *Известия РАН. Серия физическая*, 2013, том 77, № 11, 1613–1616