

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
Лаборатория элементарных частиц

На правах рукописи

УДК 539.1.05, 539.1.07

Владимиров Михаил Сергеевич

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ
ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА ОПЕРА НА КОМПЛЕКСЕ
ПАВИКОМ

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
Полухина Наталья Геннадьевна

Москва, 2013 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. ТРЕКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ.....	15
Краткий обзор свойств трековых детекторов	15
Ядерная фотоэмульсия.....	22
Глава 2. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР РАБОТ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ НЕЙТРИННОЙ ФИЗИКЕ	32
Глава 3. Эксперимент OPERA.....	40
Физическая постановка эксперимента	40
Пучок CNGS	44
Детектор эксперимента OPERA	46
Ядерная фотоэмульсия в эксперименте OPERA.....	47
Электронный сцинтилляционный детектор Target Tracker	52
Вето система	52
Магнитный спектрометр	53
Извлечение и проявка кирпичей.....	56
Сканирующие системы	57
Методы сканирования эмульсии	60
Глава 4. КОМПЛЕКС ПАВИКОМ.....	63
Описание установки	63
Настройка.....	68
Программное обеспечение.....	76
Глава 5. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА КОМПЛЕКСЕ ПАВИКОМ.....	79

Результаты обработки событий эксперимента OPERA на комплексе ПАВИКОМ.	79
Проект ОЛИМПИА 88	88
Глава 6. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ	95
Требования к сканирующим системам нового поколения.....	95
Программный комплекс PAVICOM.....	97
Устранение вибраций.....	103
Передача данных по TCP-сети	107
Интерфейс управления из пакета FEDRA.....	109
Вычисления на графическом процессоре.	110
Специфика вычислений на графическом процессоре	110
Обработка изображений на графическом процессоре	112
Реконструкция кластеров на GPU	114
Гибридная GPU-CPU система реконструкции микротреков	115
Программное обеспечение для обработки данных проекта ОЛИМПИА	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	129
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	134

ВВЕДЕНИЕ

Трековые детекторы широко используются в физике элементарных частиц на протяжении очень многих десятилетий. В трековых детекторах регистрация элементарных частиц сопровождается появлением наблюдаемых следов (треков), повторяющих траекторию движения элементарной частицы. Это пузырьковые и искровые камеры, ядерные эмульсии, кристаллы хлористого серебра и травимые твердотельные трековые детекторы [1-13]. Такая популярность и столь продолжительная жизнь методики трековых детекторов не случайна и обусловлена целым рядом их достоинств: уникальным пространственным разрешением, наглядностью восстановления пространственной картины взаимодействия частиц, относительной простотой и дешевизной, способностью накапливать информацию в течение длительного времени и другими достоинствами. Благодаря этим детекторам были открыты ядерные распады и новые частицы (позитрон, мюон, заряженные пионы, странные и очарованные частицы, таонное нейтрино).

Метод трековых детекторов непрерывно развивается и совершенствуется. В настоящее время трудно найти такую область науки и техники, где он бы не использовался. Это и физика высоких энергий, и физика космических лучей, реакторная физика, металлургия, геология, археология, медицина, биология, исследования метеоритов и образцов лунных пород. Трековая методика широко используется для решения целого ряда прикладных задач. Так, например, данные об энергетическом спектре нейтронов от реактора получают с помощью нейтронных дозиметров, содержащих делящиеся слои и трековые детекторы [14]. С использованием трековых детекторов получают информацию о распространении важнейших с радиологической точки зрения α -излучающих природных ядер инертных газов ^{222}Rn и ^{228}Rn (соответственно, из распадов ^{238}U и ^{232}Th), которые, диффундируя из горных пород или конструкционных материалов, попадают в атмосферу, и могут создавать опасный уровень радиации [15]. Контроль времени облучения радоном шахтеров на урановых

рудниках проводится с использованием полосок нитрата целлюлозы, закрепляемых на касках [16]. Метод регистрации α -частиц радона использовался для предсказания землетрясений, поскольку, как было замечено, повышение сейсмической активности в период перед землетрясением часто сопровождается возникновением трещин и напряжений с выделением радона от содержащихся в земной коре урана и тория [17]. Трековая методика также применяется при изучении процессов обмена в тропосфере, где в качестве индикатора используется радон [18]. Трековые детекторы используются в пучках отрицательных пионов в радиотерапии для изучения событий с высокими линейными потерями энергии [19, 20].

Уникально высокое пространственное (<1 мкм) разрешение ядерной фотоэмульсии (ЯФЭ) и активно развивающаяся автоматизация обработки данных в ЯФЭ привела к постановке и успешной реализации многих новых экспериментов, использующих значительные объемы ЯФЭ, в частности, в нейтринной физике. Самые крупные нейтринные эксперименты содержат тонны ЯФЭ, что соответствует тысячам квадратных метров поверхности эмульсии (Таблица 1).

Таблица 1. Эксперименты, использующие большие объёмы ЯФЭ

Эксперимент	Год	Цель	Масса ЯФЭ	Поверхность ЯФЭ	Сканирующие системы
CHORUS	1994 - 1997	Поиск $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ осцилляций	770 кг	500 м ²	TS, NTS, UTS, SUTS
DONUT	1997	Прямое наблюдение ν_τ	200 кг	200 м ²	UTS, SUTS
OPERA	2006	Поиск $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ осцилляций	100 т	110×10 ³ м ²	SUTS, ESS

Изучение свойств нейтрино имеет фундаментальное значение для физики элементарных частиц, астрофизики и космологии. Несмотря на то, что нет фундаментальных причин полагать нейтрино безмассовыми частицами, долгое время (согласно «научному общественному мнению») было принято считать, что массы покоя нейтрино равны нулю. Возможность существования ненулевой массы у нейтрино в течение последних десятилетий составляет одну из наиболее интригующих проблем физики частиц и астрофизики, связанную со свойствами слабых взаимодействий и эволюцией Вселенной [21]. С нулевыми значениями нейтринных масс согласовывались результаты многих экспериментов, в которых эти массы определялись, исходя из кинематики слабых распадов, вероятности безнейтринного 2β -распада, также из анализа нейтринных сигналов от сверхновой SN1987A. Точно также предполагалось, что каждое из лептонных чисел, определяющих тип нейтрино (L_e , L_μ , L_τ) сохраняется во всех процессах. Если же 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. Смешивание нейтрино должно приводить к явлению нейтринных осцилляций. Гипотеза о возможности нейтринных осцилляций была предложена Б. М. Понтекорво в 1957 г.

Нейтринные осцилляции представляют собой периодический процесс полного или частичного изменения аромата движущегося нейтрино. Недавние эксперименты с солнечными нейтрино (см. [22]), в которых наблюдались переходы электронных нейтрино в нейтрино других ароматов, дали достаточно надежное доказательство существования нейтринных осцилляций, и, следовательно, ненулевых масс нейтрино.

Основной задачей эксперимента OPERA (*Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus*) является поиск и изучение осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. Как

отмечено выше, данные по атмосферным нейтрино дают указание на осцилляции $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. Однако подтверждение осцилляционного механизма в атмосферном секторе, в частности, прямое наблюдение появления ν_τ в пучке ν_μ до сих пор отсутствует.

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. Трудность регистрации нейтрино связана с тем, что эти частицы чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом. Проникающая способность нейтрино колоссальна, поскольку сечение взаимодействия чрезвычайно мало. По этой причине установки для регистрации нейтрино должны иметь большие размеры и массу, измеряемую тысячами тонн. Чтобы снизить фон посторонних заряженных частиц, нейтринные детекторы располагают под большими толщами вещества (подземные и подводные установки).

Таким образом, возникает необходимость обрабатывать огромное количество эмульсионных данных. В связи с этим, первостепенное значение приобретают методики, обеспечивающие быструю и качественную обработку информации из данных, получаемых с помощью трековых детекторов, в частности, ядерной фотоэмульсии. Просмотр больших площадей эмульсии, как правило, со значительным увеличением, представляет собой достаточно сложную техническую проблему. Обработка треков в ядерной фотоэмульсии, проводимая 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 (например, потери следов частиц и другие ошибки). Проверка же получаемых результатов на возможные сбои, возникающие в процессе обработки материала затруднительна.

В последние годы этот недостаток в значительной мере был преодолен благодаря прогрессу в создании прецизионной измерительной техники и оптических столов с высокой точностью перемещения по командам от компьютеров, широкому применению современных CCD- и CMOS-видеокамер для регистрации и оцифровки оптических изображений, а также 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 видеокамер, 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 тем, что даёт использование так называемых полуавтоматов. Новый метод позволяет обрабатывать большие массивы экспериментальных данных и существенно увеличивать статистику событий, что прежде было практически нереально. Создание подобных автоматизированных комплексов имеет большое значение, поскольку оно обеспечивает более высокий уровень проведения экспериментов, в которых применяется трековая техника регистрации частиц, и существенно расширяет круг задач, где эта техника может быть эффективно использована.

Современные эмульсионные эксперименты, такие как OPERA или эксперименты по мюонной радиографии требуют быстрой и высокоэффективной обработки ядерной фотоэмульсии с восстановлением треков в широком диапазоне углов, а, следовательно, разработки специальных

сканирующих систем и программного обеспечения для быстрой обработки и анализа отсканированных эмульсионных данных.

Целью диссертационной работы было создание системы сканирования, обработки, и хранения данных эксперимента OPERA на высокотехнологичном комплексе ПАВИКОМ (Полностью АВтоматизированный Измерительный КОМПлекс), развитие методов обработки данных различных трековых детекторов и разработка 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. Разработанное автором с учетом нужд сканирующих систем нового поколения 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.

Комплекс ПАВИКОМ изначально создавался для обработки событий, зарегистрированных с помощью ядерных фотоэмульсий (ЯФЭ), облученных пучком ядер свинца с энергией 158 ГэВ/нуклон на ускорителе SPS (CERN) в рамках эксперимента EMU-15. Основной целью этого эксперимента, предложенного и осуществленного физиками ФИАН, был поиск возможных сигналов образования кварк-глюонной плазмы при сверхвысоких температурах и сверхплотных состояниях материи. Именно для обработки данных этого эксперимента, в первую очередь, создавался комплекс ПАВИКОМ.

Однако потенциально большие возможности ПАВИКОМ – его универсальность, быстрдействие и постоянно обновляемое программное обеспечение, 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.

Установка ПАВИКОМ-3 создана при непосредственном прямом и решающем участии автора на всех этапах, начиная от приобретения элементов оборудования, создания комплекса, его освоения, разработки программного обеспечения. Она предназначена, в первую очередь, для сканирования эмульсионных данных эксперимента OPERA, однако успешно используется также для сканирования полимерных детекторов CR-39 и кристаллов оливина [23], а также эмульсий тестовых экспериментов по мюонной радиографии.

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, который используется не только на ПАВИКОМ, но также и в итальянских лабораториях, в частности для сканирования эмульсионных данных экспериментов по мюонной радиографии.

Свидетельством международного признания высокого потенциала группы ПАВИКОМ служит то, что ПАВИКОМ стал первой российской группой, включенной в число европейских автоматизированных центров по обработке эмульсии эксперимента OPERA, а программный пакет PAVICOM, развитие которого для нужд сканирующих станций нового поколения является частью

данной работы, успешно используется не только в ФИАН, но и в лабораториях Национального Института Ядерной Физики (Италия).

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 ОЛИМПИЯ, 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 бóльшим 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.

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)

Глава 1. ТРЕКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Краткий обзор свойств трековых детекторов

В 1895 году, исследуя катодные лучи, В. Рентген обнаружил неизвестный вид излучения [24], впоследствии названный в его честь лучами Рентгена. Уже в следующем году А. Беккерель, вдохновлённый успехом Рентгена, случайно открыл явление радиоактивности. При подготовке эксперимента по наблюдению фосфоресценции солей урана он завернул флюоресцирующий уранилсульфат калия в непрозрачный материал вместе с фотопластинками и обнаружил, что они были полностью засвечены [1]. Фактически с этого момента и началось развитие метода трековых детекторов. С тех пор уже более ста лет трековая методика в физике успешно развивается и применяется для широкого класса задач при изучении элементарных частиц.

Элементарные частицы могут быть зарегистрированы благодаря их взаимодействию со средой. Заряженные частицы взаимодействуют с веществом, в первую очередь, через процессы ионизации и возбуждения атомов и молекул. Регистрация нейтральных (незаряженных) частиц производится посредством детектирования заряженных вторичных частиц – продуктов их распада или взаимодействия со средой.

Первые трековые детекторы были чрезвычайно просты: это были обычные фотографические пластинки, применяемые фотографами того времени. В 1911-1913 годах В. Гесс провел серию азростатных экспериментов с использованием фотопластинок и электроскопов [10] с целью подтвердить существовавшую тогда гипотезу о том, что излучение, разряжающее электроскопы, имеет земное происхождение. Он ожидал, что эффект «проникающих лучей» будет уменьшен из-за увеличения расстояния до возможных источников излучения, но, к его удивлению, эффект не только не уменьшился, но увеличился. За эту работу, доказавшую существование космических лучей, Виктор Гесс в 1936 году был удостоен Нобелевской премии.

При подходящих условиях ионизация, произведенная в веществе заряженной частицей, может вызвать в нем фазовый переход. В так называемой камере Вильсона используется конденсация жидкости из пересыщенного пара. Прибор был изобретен в 1912 г. Ч. Вильсоном [11], в течение многих лет изучавшим физику образования облаков в атмосфере. Вильсон установил, что пересыщенный пар конденсируется в капельки вокруг центров зародышеобразования, которыми служат положительные и отрицательные ионы. Проходя через пересыщенный пар, заряженная частица оставляет за собой след из капелек, которые вырастают до видимых размеров за время порядка 1 мс.

Пузырьковая камера была изобретена в начале 1950-х годов Д. Глезером [12], и в ней также существует возможность визуализации следов частиц: используется перегретая жидкость, которая вскипает вблизи центров зародышеобразования, которыми служат локальные участки энерговыделения ≥ 0.1 кэВ на траектории частицы в перегретой жидкости. Таким образом, проходя через эту среду, частица оставляет за собой след из пузырьков.

Оба этих прибора принесли их создателям Нобелевские премии и дали исследователям возможность почти что «воочию» наблюдать ядерные процессы. В таких камерах положение частицы может быть определено с точностью до размера капельки или пузырька, т.е. примерно, до 1 мм. Камеры Вильсона и пузырьковые камеры часто помещают в магнитное поле. Это приводит к искривлению траекторий заряженных частиц, кривизна которых обратно пропорциональна их импульсу. При этом положительно и отрицательно заряженные частицы отклоняются в разных направлениях, и в дополнение к пространственной картине, которую дают эти приборы, они позволяют измерить импульс частицы и определить знак ее заряда.

Существенными недостатками термодинамических камер являются их малое быстродействие, невысокое пространственное разрешение и, главное,

невозможность автоматизации сбора и обработки данных в режиме реального времени. Эти недостатки преодолены в детекторах другого (электронного) типа – газоразрядных счётчиках с газовым усилением, пропорциональных и дрейфовых камерах, сцинтилляционных и черенковских детекторах, твердотельных детекторах.

Газоразрядные детекторы представляют собой воздушный или газовый электрический конденсатор, между электродами которого создаётся постоянное или импульсное электрическое поле. При попадании ионизирующих частиц в пространство между электродами там образуются электроны и ионы газа, которые либо дают начало газовому разряду, либо, дрейфуя в электрическом поле, собираются на электродах и фиксируются регистрирующей аппаратурой. Существуют следующие основные режимы работы таких детекторов: (1) режим ионизационной камеры (без усиления); (2) режим пропорционального газового усиления; (3) режим ограниченной пропорциональности; (4) режим гейгеровского счётчика, (5) стримерный или искровой режим.

В 1968 году Ж. Шарпак [13] применил принцип пропорционального счётчика к детектору большой площади. Его разработка – многопроволочная пропорциональная камера (МПК) представляет собой систему многих тонких (~10 мкм) параллельных проволочек, расположенных в одной плоскости и являющихся анодами, которые находятся в газовом объёме между двумя плоскими катодами. Параметры МПК обеспечивают газовое усиление 10^4 - 10^5 и пропорциональность амплитуды сигнала энергии, оставленной частицей в объёме газа. Таким образом, МПК это, по существу, система многих пропорциональных счётчиков. При прохождении заряженной частицы через МПК образовавшиеся вдоль следа частицы свободные электроны дают начало лавинам, приходящим на анодные проволочки, ближайšie к этим первичным электронам. Электроника регистрирует сигнал с каждой проволочки. Таким образом, координаты собираемых сигналов указывают положение (координаты) частицы в МПК. Использование набора десятков МПК дает

возможность восстановления пространственной картины следов частиц. Типичное пространственное разрешение современной МПК 50-300 мкм. Временное разрешение – несколько наносекунд. Энергетическое разрешение пропорциональной камеры ~10%. МПК применяют главным образом в исследованиях элементарных частиц на ускорителях высоких энергий. За разработку МПК Шарпак был награжден Нобелевской премией 1992 г.

Модификацией МПК является дрейфовая камера (МДК), в которой координата частицы определяется по времени дрейфа электронов ионизации в газе от места их появления (точки пролёта частицы) до сигнальных анодных проволочек. В отличие от пропорциональной камеры, в дрейфовой камере создаётся однородное электрическое поле. Отсчет времени дрейфа начинается по стартовым сигналам внешних детекторов (чаще всего сцинтилляционных счётчиков), фиксирующих пролёт частицы через камеру. Далее появившиеся в объёме МДК свободные электроны дрейфуют в однородном и постоянном электрическом поле к ближайшим проволочкам. В непосредственной близости от анодных проволочек происходит образование лавин (газовое усиление достигает 10^6) и по времени задержки прихода лавин на анодные проволочки относительно стартового сигнала определяются координаты частицы. Пространственное разрешение дрейфовой камеры порядка ~50 мкм, временное – ~1 нс.

Времяпроекционная камера (ВПК), разработанная Д. Найгреном [25], представляет собой усовершенствованную ионизационную камеру большого размера. Как правило, это цилиндрический сосуд объёмом несколько кубических метров, заполненный рабочим газом или смесью газов. Весь цилиндрический сосуд помещается в соленоидальный магнит, создающий магнитное поле, параллельное оси камеры. Система электродов, расположенная вне чувствительного объёма, создаёт внутри цилиндра аксиально-симметричное электрическое поле, в котором электроны, образовавшиеся в газе вдоль пути заряженной частицы, дрейфуют к основаниям цилиндра. На

основаниях цилиндра располагаются газоразрядные проволочные камеры для регистрации двух координат события. Координата вдоль оси цилиндра определяется по времени дрейфа электронов до оснований цилиндра. Именно с большим расстоянием дрейфа связаны основные недостатки ВПК. Времяпроекционные камеры обладают рекордной прозрачностью, так как в чувствительном объёме камеры находится только рабочий газ, который может служить и мишенью.

К числу газоразрядных трековых детекторов относятся искровые и стримерные камеры. На электроды этих детекторов подается высоковольтное импульсное напряжение, а характер разряда регулируется длительностью импульса τ . При $\tau \approx 10$ нс развитие разряда на электронах ионизации быстро обрывается и трек представляет собой цепочку светящихся точек. При $\tau \approx 1$ мкс возникает яркий искровой разряд, распространяющийся по треку. В искровой камере, помещенной в магнитное поле, искровые следы имеют криволинейную форму. Изображения следов частиц в стримерных и искровых камерах напоминают фотографии, полученные в пузырьковых камерах и камерах Вильсона.

Применение автоматизированных систем сбора данных позволяет визуализировать картину регистрации заряженных частиц в электронных детекторах, поэтому различие между ними и «классическими» трековыми детекторами в наши дни стирается.

Полупроводниковые детекторы известны с середины 20-го века. В одной из пионерских работ [26] показано, что α -частицы, пролетающие сквозь обратно смещённый p - n -переход в германии, порождают заметный сигнал. На этом принципе основаны фактически все современные полупроводниковые детекторы. Вследствие способности работать при комнатной температуре, в экспериментах по физике высоких энергий, за небольшим исключением, предпочтение было отдано кремниевым детекторам. Полупроводниковый

детектор – это, в сущности, твёрдотельная ионизационная камера. Если заряженная частица пересекает кристалл, обладающий проводимостью *n*- или *p*-типа, то она образует вдоль своего пути электронно-дырочные пары. Принцип работы полупроводникового детектора состоит в собирании свободных носителей заряда в приложенном внешнем дрейфовом поле до того, пока они не рекомбинируют с дырками. Если это удаётся, измеренный заряд пропорционален энергии частицы, выделенной в объеме детектора. Главное достоинство твердотельных детекторов состоит в том, что средняя энергия, необходимая для образования электронно-дырочной пары, мала по сравнению с энергией образования электрон-ионной пары в газах. В кремнии (германии) для образования электронно-дырочной пары необходимо 3.6 (2.8) эВ, в то время как в газе эта величина составит приблизительно 15 – 20 эВ [27]. Для точного определения координат частиц используют полупроводниковые микростриповые детекторы. Они представляют собой пластины монокристалла кремния, на одну из поверхностей которых наносятся тонкие электроды (стрипы), отстоящие друг от друга на расстояние ~20 мкм, а другая поверхность покрывается тонким металлическим слоем. На электроды подается напряжение несколько вольт. Электронно-дырочные пары, образованные пролетающей заряженной частицей в кристалле, движутся к ближайшим электродам и регистрируются в виде импульсов тока. Пространственное разрешение микростриповых детекторов уступает только ядерным фотоэмульсиям и достигает 2 мкм, а временное разрешение составляет около 1 нс.

В трековых детекторах следы частиц наблюдаются визуально. В электронных детекторах (МПК, МДК, полупроводниковых микростриповых детекторах и др.), где координаты треков частиц фиксируются с высокой точностью, пространственная картина события восстанавливается путем компьютерной обработки. Микростриповые детекторы, а также прецизионные МПК и МДК используют в качестве центральных (или вершинных) детекторов, непосредственно окружающих мишень (или место столкновения пучков в

коллайдерах). Центральные детекторы играют важную роль в современных экспериментах на ускорителях высоких энергий. Они фиксируют с почти 100%-ной вероятностью продукты взаимодействия пучка с мишенью практически в точке их зарождения, и определяют направления их вылета. Внешние детекторы большего размера, окружающие центральный детектор, предназначены для идентификации частиц как генерированных в мишени, так и вторичных частиц и определения их характеристик (координат, импульсов, энергий и др.).

Сцинтилляционные и черенковские счетчики, как правило, не относятся к числу трековых детекторов и используются в физике высоких энергий для спектрометрии и идентификации частиц. Однако и они в некоторых случаях совместно с оптическими волокнами могут использоваться в качестве трековых детекторов. Пространственное разрешение таких детекторов определяется диаметром оптоволоконных нитей, который обычно составляет 20 – 1000 мкм.

Существует еще один тип твердотельных трековых детекторов. Регистрация частицы в нем происходит из-за того, что частицы, имеющие электрический заряд, разрушают локальную структуру твёрдого тела вдоль своей траектории [27]. Это локальное разрушение можно интенсифицировать последующим травлением, благодаря чему след удастся визуализировать. Для этой цели можно использовать твёрдые материалы типа неорганических кристаллов, стёкол, пластмасс, минералов и даже металлов. Повреждённые части материала реагируют с травящим агентом более интенсивно, чем неповреждённые. В результате этой реакции образуются характерные конусы травления. Радиационное повреждение материала, как и удельные энергетические потери заряженных частиц, пропорциональны квадрату их заряда и зависят также от скорости частицы. В пластиковых детекторах проявляется пороговый эффект: минимального радиационного повреждения, вызванного протонами и α -частицами, часто бывает недостаточно для образования конусов травления. Следовательно, интенсивный фон протонов и α -частиц не будет мешать

регистрации и измерению характеристик тяжёлых ионов, присутствующих, например, в первичных космических лучах. Размер конусов травления, при фиксированном времени травления, является мерой энергетических потерь частиц. Если скорость частиц известна, то можно определить заряд ядер. Стопка пластиковых детекторов, поднятых на воздушном шаре на большую высоту, позволяет определять распространённость химических элементов в первичных космических лучах [27,28]. Пластиковые детекторы используются также при поиске магнитных монополей, которые, согласно теории, должны вызывать сильную ионизацию. Подобные эксперименты могут также проводиться на протонных накопительных кольцах, потому что высокий фон однозарядных частиц не мешает поиску монополей из-за порогового поведения материала пластиковых детекторов.

Минералы, входящие в состав метеоритов, подобно пластиковым детекторам накапливают радиационные повреждения в течение длительного времени пребывания в космосе и используются для поиска трансурановых элементов в составе космических лучей [23].

Ядерная фотоэмульсия

Ядерная фотоэмульсия (ЯФЭ) является трековым детектором с уникально высоким (<1 мкм) пространственным разрешением (Таблица 2, [29]). Как уже отмечалось выше, первым ее применением в ядерной физике стали исследования А. А. Беккереля, который в 1896 обнаружил радиоактивность солей урана по вызываемому ими почернению фотопластинки. В 1910 году японский физик С. Киношита [30] показал, что зёрна галогенида серебра обычной фотоэмульсии становятся способными к проявлению, если через них прошла хотя бы одна α -частица. В 1927 году Л. В. Мысовский с сотрудниками в Ленинграде изготовил пластинки с толщиной эмульсионного слоя 50 мкм и наблюдал с их помощью рассеяние α -частиц на ядрах атомов, входящих в состав эмульсии. В 1930-х гг. было начато изготовление ЯФЭ со стандартными

свойствами, с помощью которых можно было регистрировать следы медленных α -частиц и протонов. В 1937—1938 гг. М. Блау и Г. Вомбахер (Австрия) и А. П. Жданов с сотрудниками (СССР) наблюдали в ЯФЭ расщепления атомных ядер, вызванные космическим излучением. В 1945—1948 гг. появились ЯФЭ, пригодные для регистрации слабоионизирующих (однозарядных релятивистских) частиц. Таким образом, метод ЯФЭ стал точным количественным методом ядерных исследований.

Таблица 2. Характеристики различных трековых детекторов.

Название	Пространственное разрешение, мкм	Временное разрешение	Время восстановления
Ядерная фотоэмульсия	1	—	—
Камера Вильсона	1000	10 мс	10 с
Пузырьковая камера	10 – 150	10 мкс	50 мс
Искровая камера	100	1 мкс	1 мс
Пропорциональная камера	50 – 300	2 нс	200 нс
Стримерная камера	300	2 мкс	100 мс
Дрейфовая камера	50 – 300	2 нс	100 нс
Полупроводниковый детектор	2	10 нс	10 нс
Сцинтилляционные (черенковские) волоконно-оптические детекторы	20 – 30	1 – 10 нс	1 – 10 нс

Ядерные фотоэмульсии стали одними из первых трековых детекторов, использованных в физике высоких энергий. Создание современных ЯФЭ явилось большим научно-техническим достижением. По словам известного английского физика С. Пауэлла, «разработка улучшенных эмульсий как бы открыла новое окно в природу, через которое мы впервые увидели следы, странные и неожиданные, еще не известные физикам...». Всеобщее признание фотоэмульсионный метод получил после открытия π -мезона в 1947 по цепочке распада $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ [30].

С 1945 по 1955 методом ЯФЭ были сделаны важнейшие открытия в физике

элементарных частиц: зарегистрированы π -мезоны (пионы) и последовательности распадов $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$, $\mu \rightarrow e + \nu_e + \nu_\mu$ в фотоэмульсионных пластинах, экспонированных космическим излучением, а также обнаружены ядерные взаимодействия π^- - и K^- -мезонов. С помощью ЯФЭ удалось оценить время жизни π^0 -мезона (10^{-16} с), обнаружить распад K -мезона на 3 пиона, открыть Σ -гиперон и обнаружить существование гипер-ядер, открыть $\bar{\Lambda}$ -гиперон. Методом ЯФЭ был исследован состав первичного космического излучения [31]; кроме протонов, в нём были обнаружены ядра He и более тяжёлых элементов, вплоть до Fe. Для увеличения скорости просмотра эмульсионных слоёв проводились гибридные эксперименты, где ЯФЭ служили и мишенью, и вершинным детектором, а вслед за эмульсией располагался электронный детектор, который использовался для получения целеуказания о нужном событии [32]. Эта информация позволяла быстрее завершить визуальную обработку ЯФЭ, поскольку использовалась для нахождения примерного местоположения исследуемого события, что существенно облегчало его поиск. Вершинная информация затем объединялась с информацией от электронного детектора, и, в результате, получалась полная картина события.

ЯФЭ отличается от обычной фотоэмульсии двумя особенностями: в ЯФЭ отношение массы галогенида серебра к массе желатины в 8 раз больше, а толщина слоя, как правило, в 10—100 раз больше, чем у обычной фотографической эмульсии. Толщина ЯФЭ достигает 1000—2000 *мкм* и более (стандартная толщина фирменных ЯФЭ — 50 - 600 *мкм*).

Ядерная фотоэмульсия состоит из большого числа мелких кристаллов галоидного серебра ($AgBr$) сферической или кубической формы, распределённых в желатиновой основе. Линейные размеры кристаллов колеблются в пределах от ~ 0.1 до 1.0 *мкм*. $AgBr$ представляет собой полупроводник с шириной зоны 2.6 эВ. Если кристалл подвергается воздействию света или через него пролетает ионизирующая частица, то в нем

рождаются электронно-дырочные пары. Возбужденные электроны захватываются дефектами решетки на поверхности кристалла, создавая атомы металлического серебра. Эти атомы являются латентными центрами пока еще скрытого изображения. После физико-химического процесса проявки эмульсии раствором специального восстановителя (проявителя), через эти латентные центры изображения ядра серебра из кристалла заполняются недостающими электронами, превращаясь в атом серебра. Этот процесс увеличивает на много порядков количество атомов металлического серебра ($10^8 - 10^{10}$), создавая уже зерна атомов серебра размера, видимого в оптический микроскоп. Основная функция желатины, входящей в состав эмульсии, состоит в том, что она образует некоторую трёхмерную основу, в которой распределяются кристаллы галоидного серебра и которая препятствует их смещению во время проявления и фиксирования. Желатина представляет собой сложное органическое вещество, способное поглощать значительные количества воды (при этом объем желатины может увеличиваться в 10 раз). Вода и различные соли могут диффундировать через набухшую желатину, тогда как кристаллы галоидного серебра, так же как и зёрна металлического серебра, замещающие их после проявления, остаются в фиксированном положении. Эти свойства желатины являются весьма существенными при регистрации следов в эмульсии и определяют беспрецедентно высокое (≤ 1 мкм) пространственное разрешение фотоэмульсионных детекторов.

В ядерной физике ЯФЭ обычно используют в виде слоев, нанесённых на стеклянные или пленочные подложки. При исследовании частиц высоких энергий (на ускорителях или в космическом излучении) ЯФЭ часто укладывают в стопки из нескольких сотен слоев, что создаёт практически сплошную фоточувствительную массу. После экспозиции (перед обработкой) отдельные слои обычно наклеивают на стеклянные подложки. Положение слоев точно маркируется, благодаря чему траекторию частиц прослеживают по всей стопке, переходя от слоя к слою. Достоинства метода ЯФЭ — высокое пространственное разрешение (можно различать события и явления,

отделённые расстояниями <1 мкм, что для релятивистской частицы соответствует временам пролёта $<10^{-16}$ с). При этом возможно длительное накопление редких событий.

Заряженные частицы или электромагнитное излучение, связанное с ядерными реакциями (γ -кванты), вызывают в ЯФЭ действие, аналогичное свету. Процесс проявления заметно усиливает первоначальный слабый эффект (скрытое фотографическое изображение), подобно тому, как лавинный разряд в газоразрядном детекторе или бурное вскипание пузырьков на треке частицы в пузырьковой камере многократно увеличивают слабые эффекты, связанные с начальной ионизацией, производимой заряженной частицей. Удельные потери энергии ядерных частиц достаточны для ионизации лежащих на их пути молекул в зёрнах галогенида серебра и, тем самым, создания в них дефектов, которые становятся центрами проявления. После проявления и фиксирования ЯФЭ, вдоль следа частицы образуется цепочка чёрных зёрен металлического серебра. Следы частиц наблюдают с помощью микроскопа.

Одной из наиболее примечательных характеристик ЯФЭ является высокая эффективность образования в толще желатины треков заряженных частиц, состоящих из цепочек зёрен серебра. Так, например, в эмульсии высокой чувствительности, однозарядные релятивистские частицы создают на 100 мкм следа 30—40 зёрен серебра [33]. Эти следы хорошо видны, если их рассматривать в микроскоп. Они различаются своими параметрами, в частности, длиной, характеризующей путь, пройденный частицей. Так как нередко заряженная частица попадает в эмульсию, уже пройдя часть пути в воздухе (или в какой-либо другой среде), то её полный путь остаётся неизвестным. Поэтому обычно путь, пройденный частицей, измеряют в обратном направлении (от места, где частица остановилась) и называют остаточным пробегом. Остаточный пробег R частицы зависит от её заряда z , массы m и энергии T в данной точке траектории. Измерения, проведённые с протонами разных энергий, дали следующую зависимость T_p от R_p :

$$T_p = \alpha R_p^n \quad (1)$$

Здесь T_p измеряется в МэВ; R_p – в мкм (индекс p отвечает протонам), а α и n – постоянные коэффициенты: для стандартной ЯФЭ: $\alpha = 0.25$, $n = 0.58$. Таким образом, измерив пробег протона, можно при помощи формулы (1) определить его энергию. Формула (1) легко обобщается на частицы любой массы m и заряда z :

$$T = \alpha \left(\frac{m}{m_p} \right)^{1-n} z^{2n} R^n \quad (2)$$

Чем больше ионизирующая способность частицы (dT/dR), тем больше создаётся на её пути центров скрытого изображения и, следовательно, тем больше будет плотность зёрен $g = dN/dR$ на соответствующем участке следа частицы:

$$g = \frac{dN}{dR} \sim \frac{dT}{dR} = z^2 f(v) \sim \frac{z^2}{v^2} \quad (3)$$

Плотность зёрен g , т.е. среднее число зёрен на единицу длины трека (например, на длине 100 мкм), является второй важной характеристикой следа заряженной частицы. Для релятивистской однозарядной частицы эта плотность обычно составляет 30-40 зёрен на 100 мкм. Формула (3) показывает, что при известном z по значению плотности зёрен можно найти скорость частицы. Плотность зёрен g максимальна при $R = 0$, т.е. в конце пути частицы, и уменьшается с ростом скорости (остаточного пробега R) до одного и того же минимального значения g_{\min} которое достигается при скорости частицы близкой к скорости света (лоренц-фактор $\gamma \approx 4$). Величина g_{\min} зависит от заряда частицы z и имеет наименьшее значение для $z = 1$. Сравнивая кривые $g(R)$ для двух частиц, можно найти отношение их масс. Легко показать, что:

$$\frac{m_1}{m_2} = \left(\frac{R_1}{R_2} = \frac{N_1}{N_2} \right) \Bigg|_{\substack{v_1=v_2 \\ z_1=z_2}}, \quad (4)$$

где R_1 и R_2 – длины остаточных пробегов частиц с массами m_1 и m_2 с одинаковыми скоростями и зарядами, а N_1 и N_2 – полное число зёрен на этих остаточных пробегах. Из формулы (2) следует, что при равной энергии двух частиц (с одинаковыми зарядами) частица с меньшей массой имеет большую длину пробега. Очевидно, что это связано с большей начальной скоростью лёгкой частицы и, следовательно, с меньшей ионизирующей способностью.

Таким образом, измерение остаточного пробега частицы и подсчёт числа зёрен на её следе позволяют определить пройденный путь, направление движения (по градиенту плотности зёрен), массу и энергию частицы. Различие в следах частиц с разными зарядами столь существенно, что по виду следа во многих случаях удается оценить и заряд частицы.

Однако описанный метод пригоден только тогда, когда можно измерить остаточный пробег, т.е. когда частица в эмульсии останавливается. Для частиц, не останавливающихся в эмульсии, понятие остаточного пробега, теряет смысл. В подобных случаях для анализа свойств частицы наряду с плотностью зёрен используется третья характеристика следа – степень его прямолинейности. Сравнение следов различных частиц показывает, что некоторые из них остаются прямолинейными практически до конца пути, другие же испытывают рассеяние и к концу пути он становится извилистым. Особенно это заметно для следов самых лёгких заряженных частиц – электронов, которые к концу пути в эмульсии начинают описывать причудливые траектории. Для более тяжёлых частиц эффект искривления траектории также имеет место, однако в гораздо меньшей степени, так что для измерения пробега требуются специальные методы. Описанное явление объясняется многократным кулоновским рассеянием, испытываемым заряженной частицей при её прохождении через вещество. При каждом акте рассеяния частица несколько изменяет направление своего движения, так что для достаточно большого пробега суммарное отклонение от первоначального направления может оказаться довольно значительным. Средний угол отклонения θ (в градусах) при многократном рассеянии в эмульсии равен:

$$\theta = \frac{2.5\sqrt{x}}{p\beta c}, \quad (5)$$

где x – длина (в мкм) отрезка траектории, на котором измеряется угол; p – импульс ($p\beta c$ измеряется в МэВ). Из формулы (5) следует, что из двух заряженных частиц с разными массами и одинаковыми скоростями тяжёлая будет испытывать меньшее рассеяние, чем лёгкая. Сопоставление среднего угла θ многократного рассеяния, зависящего от массы и скорости, с плотностью зёрен g , являющейся функцией только скорости, даёт второй способ определения массы и энергии частицы. Этот способ сравнения масс частиц с одинаковым зарядом особенно ценен тем, что он, как уже указывалось выше, применим и в тех случаях, когда исследуемая частица не остановилась в эмульсии и, следовательно, её остаточный пробег не известен.

Зависимость сечения образования δ -электронов от заряда ионизирующей частицы позволяет определить его методом подсчёта числа δ -электронов N_δ на единице длины пути частицы с массой M и энергией T в веществе. Число δ -электронов с энергией в интервале от T_e^{\min} до T_e^{\max} равно:

$$\begin{aligned} N_\delta &= n_e \sigma_\delta = \frac{2\pi z^2 e^4}{m_e v^2} n_e \int_{T_e^{\min}}^{T_e^{\max}} \frac{dT_e}{T_e^2} = \\ &= \frac{2\pi \pi^4 z^2}{m_e v^2} n_e \left[\frac{1}{T_e^{\min}} - \frac{1}{T_e^{\max}} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где n_e – концентрация электронов в среде, а T_e^{\max} равно:

$$T_e^{\max} = \frac{4m_e M}{(M + m_e)^2} T \approx \frac{4m_e}{M} T. \quad (7)$$

Ядерные фотоэмульсии могут быть помещены в магнитное поле. При этом траектория заряженных частиц перестаёт быть прямолинейной. Под действием силы Лоренца частицы движутся по круговой или спиральной траектории вокруг направления магнитного поля. Радиус кривизны траектории частицы определяется напряжённостью магнитного поля и компонентой импульса

частицы, перпендикулярной направлению поля. При этом направление отклонения зависит от знака заряда частицы. Ввиду эффекта многократного рассеяния измерение отклонения частицы непосредственно в эмульсии связано с большими трудностями и возможно только в сильных магнитных полях. Вместо этого обычно применяют метод нормального падения: частицы отклоняются магнитным полем при их движении в воздухе или в вакууме, а фотоэмульсионные слои используются для регистрации направления движения этих частиц до и после прохождения магнитного поля. Угол θ поворота траектории частицы с зарядом e и импульсом p в магнитном поле H равен:

$$\theta \approx \frac{x}{p} eH, \quad (8)$$

где x – длина отрезка траектории, на котором измеряется угол поворота.

Ядерная фотоэмульсия используется в физике частиц на протяжении уже многих десятилетий. Столь продолжительная долговечность метода, безусловно связана с уникальным пространственным разрешением и возможностью разделения близких треков частиц. Ни один из известных детекторов элементарных частиц не может обеспечить пространственное разрешение, которое даёт эмульсия: отклонение от восстановленной траектории движения частицы, в среднем, не превышает 0.8 мкм , а при определённых условиях может быть уменьшено до 0.2 мкм . Использование двухсторонней эмульсии позволяет определять углы пролёта частицы с погрешностью менее 1 мрад . Отсутствие возможности управления ЯФЭ в гибридных экспериментах частично компенсируется системой целеуказания, когда местонахождение вершины взаимодействия или отдельного трека можно предсказать, используя информацию от разного рода электронных детекторов. Анализируя траектории продуктов реакции, можно реконструировать кинематику исследуемой реакции, определить энергии и углы вылета всех частиц, и, следовательно, получить полную информацию, необходимую для определения дифференциальных сечений исследуемых реакций.

Возможность проводить экспозиции в отсутствие экспериментатора, надёжность, энергонезависимость, незначительные размеры и вес ЯФЭ позволяют использовать её как в экспериментах по физике космических лучей на спутниках и стратосферных аэростатах, так и в ускорительных экспериментах. Кроме того, из-за своей простоты, дешевизны, и наглядности эмульсионные детекторы имеют большие преимущества перед другими системами детектирования, особенно при изучении реакций, для которых характерны сложные топологии распадов, а также для прямого детектирования частиц с малыми временами жизни (до 10^{-16} с). Применение ЯФЭ особенно полезно при изучении процессов с очень малыми поперечными сечениями, когда электронные методы неприменимы из-за своей низкой эффективности.

Развитие методики автоматизированной обработки эмульсионных данных позволило физикам осуществлять эксперименты, использующие тонны ЯФЭ. При этом современные сканирующие станции позволяют обрабатывать в автоматическом режиме до 20 см^2 ЯФЭ в час.

Глава 2. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР РАБОТ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ НЕЙТРИННОЙ ФИЗИКЕ

Одной из проблем ядерной физики 20-30-х годов XX века была проблема бета-распада: спектр электронов, образующихся при β -распаде, измеренный английским физиком Джеймсом Чедвиком ещё в 1914 г., имеет непрерывный характер.

Однако, развитие квантовой механики в 1920-х годах привело к пониманию дискретности энергетических уровней в атомном ядре: спектр вылетающих при распаде ядра частиц должен быть дискретным, и соответствовать энергии, равной разнице энергий уровней, между которыми происходит переход при распаде.

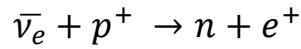
Гипотезу о существовании чрезвычайно слабо взаимодействующей с веществом частицы выдвинул 4 декабря 1930 г. Паули — не в статье, а в неформальном письме участникам физической конференции в Тюбингене, по его выражению, «предприняв отчаянную попытку спасти «обменную статистику» и закон сохранения энергии» [34].

На Сольвеевском Конгрессе 1933 г. в Брюсселе Паули выступил с рефератом о механизме β -распада с участием лёгкой нейтральной частицы со спином $1/2$, в котором, со ссылкой на предложение Ферми, назвал гипотетическую частицу «нейтрино». Это выступление было фактически первой официальной публикацией, посвящённой нейтрино.

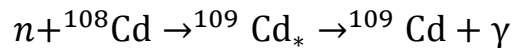
Таким образом, было предположено существование некой нейтральной частицы, со спином $1/2$, с помощью которой можно было бы объяснить непрерывный характер спектра электронов при бета-распаде.

Поскольку нейтрино участвует только в слабых взаимодействиях, экспериментальное наблюдение нейтрино усложнено. Впервые оно было обнаружено Клайдом Коуэном и Фредериком Райнесом в 1956 году [35] в

эксперименте по захвату протоном электронного антинейтрино $\bar{\nu}_e$ от бета-распада:



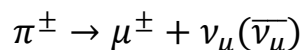
При этом, родившийся позитрон быстро аннигилирует с электроном из среды, рождая два легко детектируемых гамма-кванта. Авторы использовали нейтрино от реактора, их поток составлял 5×10^{13} нейтрино в секунду на квадратный сантиметр. Нейтрино попадали в резервуар с водой, где они взаимодействовали с протонами воды, а излученный свет детектировался сцинтилляционным детектором. Для большей достоверности в резервуар был добавлен хлорид кадмия, являющийся отличным поглотителем нейтронов.



Расположение детекторов было таким, что гамма-квант от захвата нейтрона испускался спустя 5 мкс после гамма-квантов от электрон-позитронной аннигиляции, если он был вызван попаданием нейтрино.

Они наблюдали примерно 3 нейтринных события в час. Для достоверности, реактор был выключен, чтобы показать изменение в количестве реакций.

После экспериментов Райнеса и Коуэна по наблюдению антинейтрино, образующихся при β -распаде, существование этой частицы сомнения не вызывало. Однако были обнаружены нейтрино, образующиеся и в других процессах, и, в частности, при распаде π -мезонов:



Поэтому возник вопрос – тождественны ли нейтрино, образующееся при распаде π -мезонов, и нейтрино, образующееся при β -распаде.

Были и другие проблемы, связанные с нейтрино. Был предсказан ряд процессов, которые в действительности не происходили. Типичный пример таких ненаблюдаемых процессов – так называемый радиационный распад мюона, т.е. испускание мюоном электрона и фотона: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$. В течение долгого времени физики безуспешно пытались обнаружить этот процесс. Для объяснения этого факта был введен новый закон сохранения лептонного числа.

В 1957 г. М. А. Марков, а также параллельно ему Ю. Швингер и К. Нишиджим высказали предположение о существовании двух типов нейтрино. Существование двух типов нейтрино означало бы, что нейтрино, участвующие в разных реакциях совместно с электроном, отличаются от нейтрино, участвующих в реакциях совместно с мюоном.

Схема опыта по доказательству тождественности или не тождественности этих 2 типов нейтрино похожа на доказательство различия нейтрино и антинейтрино. В качестве источника мюонных нейтрино можно использовать реакцию распада пиона. В данном процессе вероятность распада по мюонному каналу в 1000 раз больше, чем по электронному.

В опытах Л. Ледермана, М. Шварца и Дж. Стейнбергера в 1962 году было показано, что нейтрино, образующиеся при распаде π -мезона, не является электронным. Нейтрино, образующиеся при распаде π -мезона, были названы мюонными нейтрино, т.к. они всегда образуются совместно с мюоном.

В результате взаимодействия пучка протонов с энергией 15 ГэВ с бериллиевой мишенью в большом количестве образуются вторичные π^+ и π^- -мезоны. Детектирование π^+ и π^- -мезонов осуществлялось с помощью черенковских счетчиков (Рис. 1). Мюонные нейтрино образовывались в результате последующего распада π^+ и π^- -мезонов: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ и $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

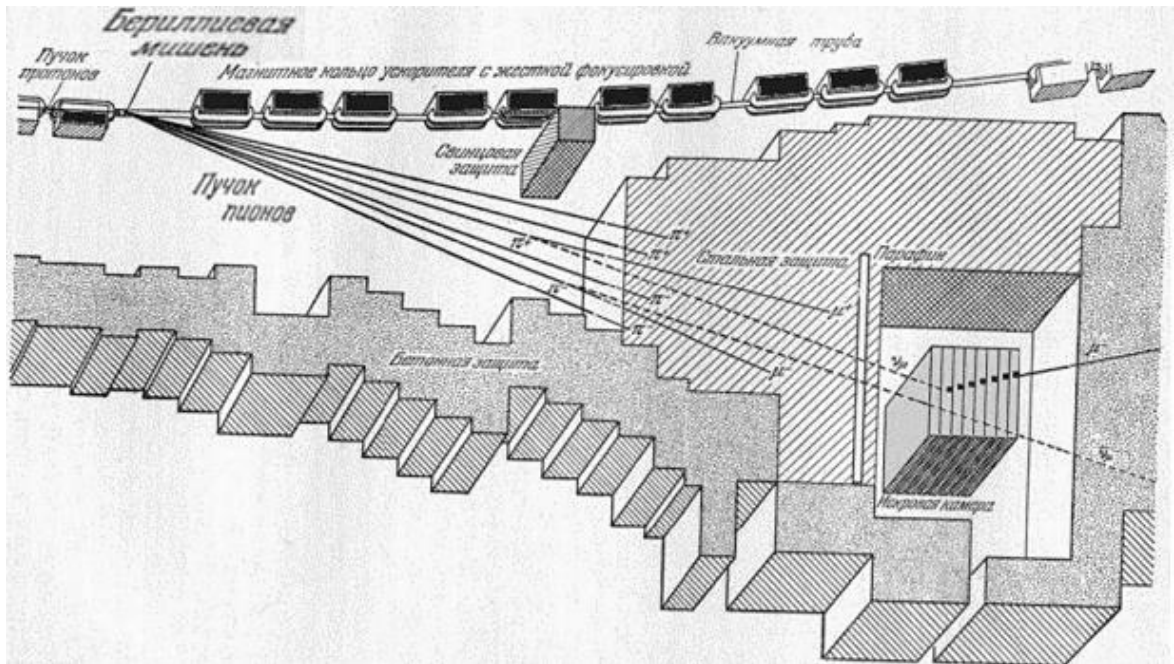
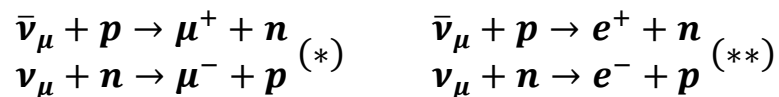


Рис. 1. Схема установки в эксперименте Л. Ледермана, М. Шварца и Дж. Стейнбергера [36]

На пролетном расстоянии между черенковским счетчиком и железной защитной стеной происходил распад π^- -мезонов. Все частицы, кроме нейтрино, поглощались в защитной стене. Интенсивность фона адронов при этом уменьшалась примерно на 20 порядков. Взаимодействия с нейтронами и протонами регистрировались в детекторе, состоящем из набора искровых камер, между которыми располагались сцинтилляционные счетчики, регистрирующие появление заряженной частицы в детекторе. При появлении в детекторе заряженной частицы подавался импульс высокого напряжения на искровые камеры. Тип заряженной частицы (мюон или электрон) определялся по характеру искрового пробоя в искровых камерах.



В результате этих экспериментов было показано, что при взаимодействии нейтрино, образующихся при распаде π -мезонов, с протонами и нейтронами, наблюдаются только мюоны (*), и не было обнаружено ни одного случая образования электронов или позитронов (**). А если бы

мюонные и электронные нейтрино были тождественными частицами, то реакции (*) и (**) происходили бы с равной вероятностью.

Таонное нейтрино было экспериментально открыто в 2000 году в эксперименте DONUT. В этом эксперименте протоны, ускоренные на Теватроне, использовались для рождения таонного нейтрино посредством распада чармированных мезонов. После устранения фоновых частиц, системой магнитов, железных и бетонных поглотителей, пучок проходил через несколько

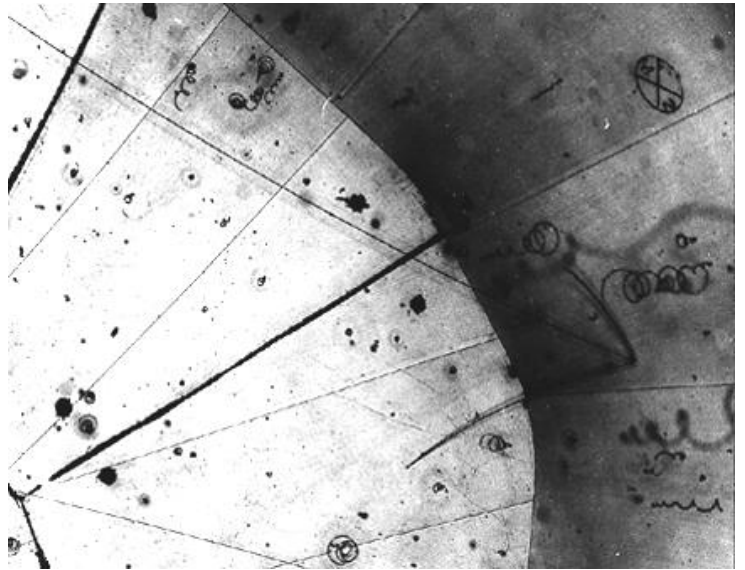


Рис. 2. Первое наблюдение взаимодействия мюонного нейтрино в пузырьковой камере. Длинный трек – трек мюона, короткий – протон. Третий трек – от π -мезона, родившегося при столкновении.

слоев ядерной эмульсии. В очень редких случаях, одно из этих нейтрино взаимодействовало с детектором, создавая заряженные частицы, оставляющие видимые треки в эмульсии и которые могли быть зарегистрированы системой сцинтилляторов и дрейфовых трубок.

Используя информацию от электроники, нейтринные события идентифицировались и выделялись для дальнейшего анализа. Эмульсия проявлялась и оставленные в ней частицами треки реконструировались в трехмерную картину. Характерной особенностью таонного нейтрино являются те несколько треков, появляющихся «из ниоткуда» в толще эмульсии, без следа начальной частицы, и что у одного из этих треков есть характерный излом через несколько миллиметров от места рождения частицы, означающий распад тау-лептона.

В июле 2000-го года коллаборация DONUT заявила о первом наблюдении взаимодействий таонного нейтрино. Хотя эти результаты основаны всего на четырех событиях, сигнал намного превосходил ожидаемый фон (< 0.2 событий) и был признан достоверным. Важность этого события заключалась в том, что до этого момента таонное нейтрино было единственной частицей стандартной модели, кроме бозона Хиггса, существование которой не было экспериментально подтверждено.

В 1957 г. Бруно Понтекорво предсказал квантово-механическое явление нейтринных осцилляций, когда нейтрино одного аромата, пройдя некоторое расстояние, может иметь уже другой аромат. Он предположил, что электронные нейтрино, возникающие в центре Солнца, по пути к Земле могут преобразовываться частично в мюонные, а частично в таонные. Идея нейтринных осцилляций проста:

- лептонные квантовые числа не сохраняются;
- массы нейтрино не равны нулю, хотя и очень малы – при этом противоречий с проведенными экспериментами по измерению массы нейтрино нет, т.к. все они дают лишь ограничение на верхний предел массы нейтрино;
- электронное, мюонное и таонное нейтрино – является суперпозицией трех состояний (ν_1, ν_2, ν_3), имеющих массы m_1, m_2, m_3 , заданные матрицей Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{e1} & u_{e2} & u_{e3} \\ u_{\mu1} & u_{\mu2} & u_{\mu3} \\ u_{\tau1} & u_{\tau2} & u_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Рассмотрим упрощенную ситуацию, когда происходит смешивание двух типов нейтрино – ν_e и ν_μ . Этом случае матрица U_{ij} является унитарной и ее элементы можно выразить через один параметр – угол смешивания θ :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}, \text{ откуда } \begin{cases} \nu_1 = \nu_e \cos(\theta) - \nu_\mu \sin(\theta) \\ \nu_2 = \nu_e \sin(\theta) + \nu_\mu \cos(\theta) \end{cases}.$$

Предположим, в начальный момент имеется моноэнергетический пучок нейтрино, полностью состоящий из ν_e , т.е. $\nu_e(0)=1$, а $\nu_\mu(0)=0$. Тогда

$$\begin{aligned} \nu_1 &= \nu_e \cos(\theta) \\ \nu_2 &= \nu_e \sin(\theta) \end{aligned}$$

Но $\nu_1(t) = \nu_1(0)\exp(-iE_1t)$
 $\nu_2(t) = \nu_2(0)\exp(-iE_2t)$, и соответственно,

$$\begin{aligned} \nu_e(t) &= \nu_1(0) \exp(-iE_1t) \cos \theta + \nu_2(0) \exp(-iE_2t) \sin \theta = \\ &= [\cos^2 \theta \exp(-iE_1t) + \sin^2 \theta \exp(-iE_2t)]\nu_e(0) \\ &+ \cos \theta \sin \theta [\exp(-iE_2t) - \exp(-iE_1t)]\nu_\mu(0) \end{aligned}$$

Тогда вероятность обнаружить ν_e :

$$|\nu_e(t)|^2 = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m^2 L}{4E} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\pi L}{L_0}$$

Говорят, что нейтрино проосциллировало в нейтрино другого аромата. Ситуация принципиально не меняется, если рассматривать смешивание не двух, а трех ароматов.

Таким образом, нейтринные осцилляции представляют собой периодический процесс полного или частичного изменения аромата движущегося в вакууме или веществе нейтринного пучка. Эксперименты с солнечными нейтрино [22], в которых наблюдались переходы электронных нейтрино в нейтрино других ароматов, дали достаточно надежное доказательство существования нейтринных осцилляций, и, следовательно, ненулевых масс нейтрино. Большой вклад в современное понимание смешивания нейтрино внесли эксперименты с атмосферными нейтрино (эксперименты Super-Kamiokande, Kamiokande, MACRO и SOUDAN2) и реакторными дальними нейтрино (K2K [37] в Японии и MINOS [38] в США). В таблице 3 приведен список экспериментов по поиску нейтринных осцилляций и их основные характеристики.

Таблица 3

Эксперимент	Исследуемый поток нейтрино	Основной канал осцилляций	Длина базы
MACRO	Атмосферные	$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$	10-20 км
Сamiokande-II	Атмосферные	$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$	10-20 км
Supercamiokande	Атмосферные	$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$	10-20 км
KamLAND	Реакторные	$\nu_e \rightarrow \nu_{\mu}$	180 км
Double Chooze	Реакторные	$\nu_e \rightarrow \nu_{\mu}$	300 м, 1000 м
RENO	Реакторные	$\nu_e \rightarrow \nu_{\mu}$	100 м 1500 м
Daya Bay	Реакторные	$\nu_e \rightarrow \nu_{\mu}$	360-2000 м
MINOS	Нейтринный пучок	$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$	735 км
LSND	Нейтринный пучок	$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$	30 м
MiniBooNE	Нейтринный пучок	$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$	500 м
T2K	Нейтринный пучок	$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$	295 км

Глава 3. Эксперимент OPERA

Физическая постановка эксперимента

Эксперимент OPERA стал первым экспериментом по прямому наблюдению появления нейтрино ν_τ в пучке ν_μ по непосредственному обнаружению τ -лептона родившегося при взаимодействии ν_τ с веществом детектора. Факт появления τ -лептона станет прямым доказательством существования нейтринных осцилляций в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$.

В значительном проценте каналов распада τ -лептон имеет весьма специфическую топологию распада, по которой его можно относительно легко детектировать. Однако ввиду его малого времени жизни ($t_\tau = 291 \times 10^{-15}$ с, $ct_\tau = 87$ мкм) для обнаружения особенностей топологии распада требуется высокое пространственное разрешение. Именно поэтому основным детектором эксперимента была выбрана ядерная фотоэмульсия.

Рассмотрим подробнее основные каналы распада τ -лептона. Они представлены в таблице 4.

Таблица 4

Канал распада	Тип распада	Количество дочерних заряженных частиц	Вероятность
$\tau^- \rightarrow \nu_\tau + e^- + \nu_e$	лептонный	1	17.8%
$\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \mu^- + \nu_\mu$	лептонный	1	17.3%
$\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \pi^-$	полулептонный	1	11.1%
$\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \rho^-$	полулептонный	1	25.3%
$\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \pi^- + 2 \pi^0$	полулептонный	1	9.4%
$\tau^- \rightarrow \nu_\tau + h^- + h^+ + h^-$	полулептонный	3	9.6%

Помимо представленных есть еще множество других мод. Распады с рождением К-мезона имеют малую вероятность ввиду «Каббибо-подавленности».

Характерная топология событий с рождением тау-лептона и взаимодействия мюонного нейтрино по заряженному току имеет вид, показанный на рис. 3.

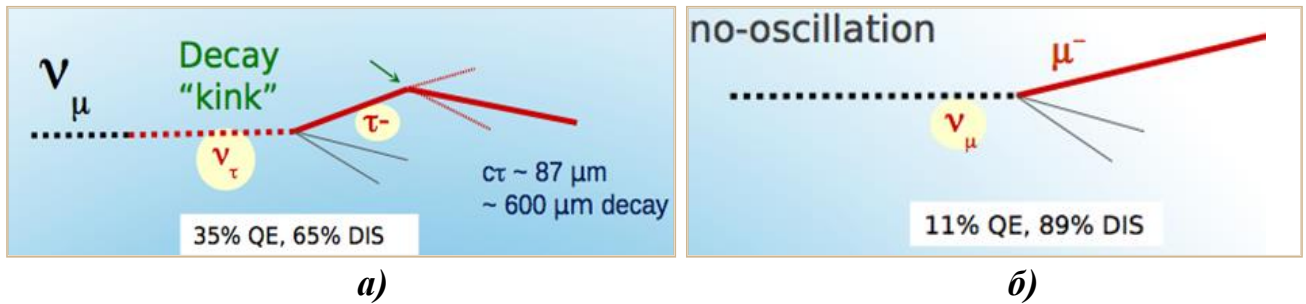


Рис. 3. Топология нейтринных взаимодействий по заряженному току. а) рождение тау лептона и его последующий распад с характерным изломом трека ("kink"). б) рождение мюона.

Самым «чистым» каналом является распад $\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \mu^- + \nu_\mu$. Мюон хорошо детектируется и идентифицируется мюонным спектрометром, а пространственное разрешение эмульсии в большинстве случаев позволяет установить относится ли он к первичной вершине, или ко вторичной, и соответственно является продуктом распада тау-лептона.

Основным фоном являются события, в которых топология схожа с топологией рождения тау-лептона:

1. рождение очарованных мезонов при взаимодействии электронного или мюонного нейтрино, в которых невозможно правильно идентифицировать лептон (Рис. 4, а);
2. излом на треке мюона из-за множественного кулоновского рассеяния. (Рис. 4, б)
3. фоновый события по отношению к адронному распаду тау-лептона показан на рис. 4, в.

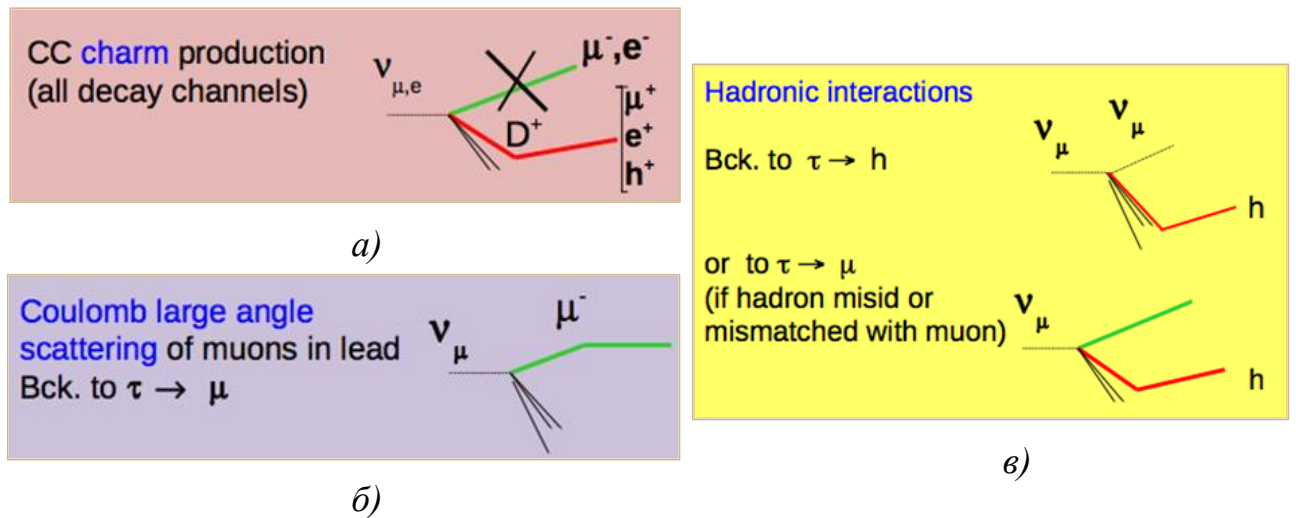


Рис. 4. Фоновые события по отношению к распаду тау лептона по заряженному току (а, б) и адронному распаду тау-лептона.

Исследование и оценка различных фоновых процессов подробно представлены в [39].

Для анализа первичной вершины производится объемное сканирование 1 см^2 как минимум двух пластин против направления пучка и шести по направлению пучка от свинцовой пластины, в которой расположена вершина. Для детектирования заряженных и нейтральных распадов, а также вершин вторичных взаимодействий и конверсии гамма-лучей вблизи первичной вершины, существует специальная процедура, подробно описанная в [40]

Когда найдена вторичная вершина, проводится кинематический анализ всего события. В этом анализе используются значения углов треков, измеренные в эмульсионных пластинах, импульсы, определенные по множественному кулоновскому рассеянию в кирпиче, импульс, определенный магнитным спектрометром, и полная энергия, выделенная в мишени, как в калориметре [41-43]. Энергия гамма-квантов и электронов оценивается алгоритмом нейронной сети, использующим количество сегментов треков в каждой пластине, форму электромагнитного ливня, а также информацию о множественном кулоновском рассеянии основных треков.

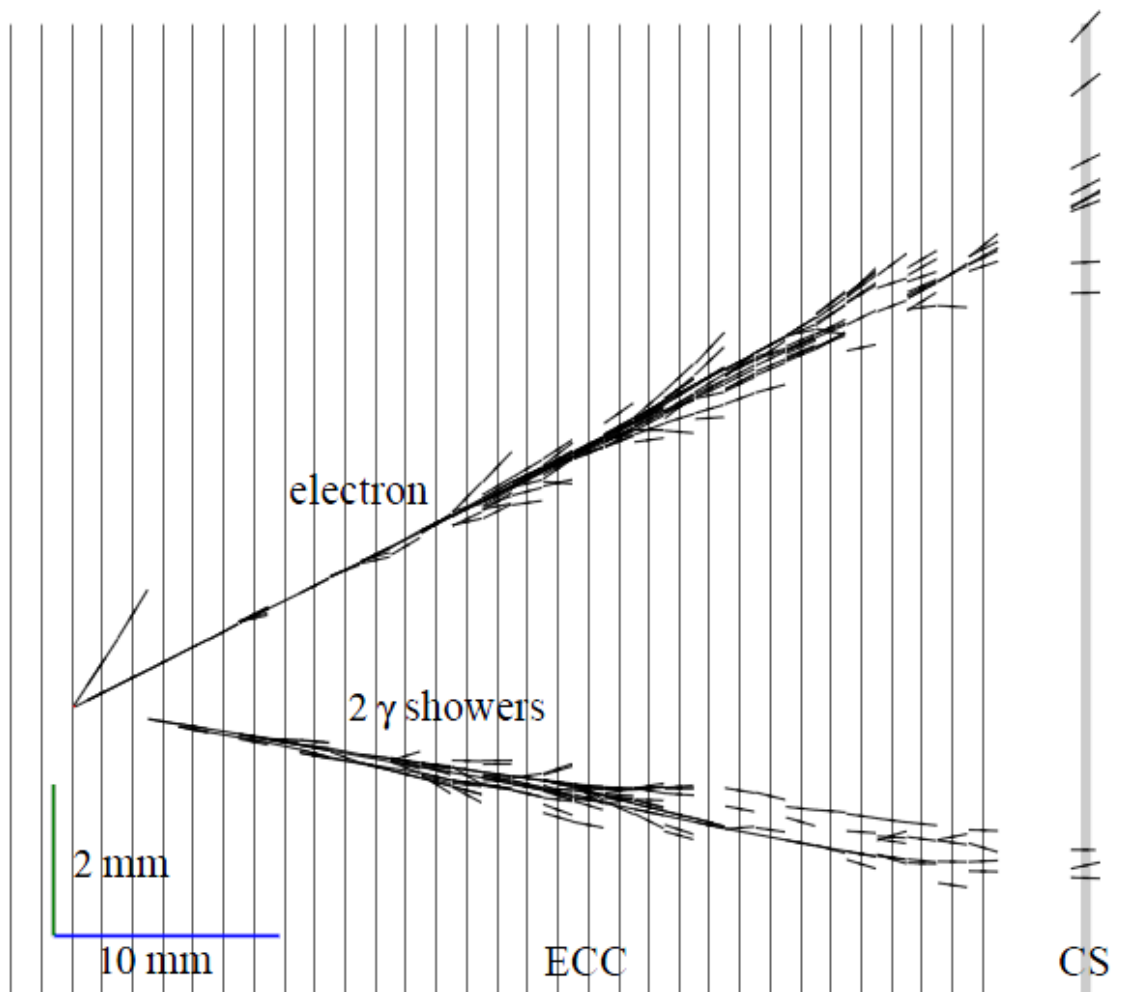


Рис. 5. Вид треков одного из реконструированных кандидатов событий ν_e . Два трека найдено возле вершины нейтринного взаимодействия, один из них рождает электромагнитный ливень, и был идентифицирован как электрон. Кроме того, было найдено два ливня от γ -конверсии (в этой проекции они пересекаются)

Помимо поиска осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ также производится исследование осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$. Был разработан специальный подход для поиска ν_e : для каждого найденного события первичный трек экстраполировался на CS, где производился поиск ливня. Если на CS обнаруживались треки соответствующие ливню, в кирпиче сканировался дополнительный объем для поиска ливня. Затем отделялись события, в которых ливень был рожден одной заряженной частицей, а не вследствие конверсии γ -кванта от распада π^0 мезона. Из 505 событий по нейтральному току данных за 2008-2009 гг. с

использованием этой процедуры было отобрано 96 событий. В общей сложности было подтверждено 19 событий ν_e (Рис. 5) [44].

Фон по отношению к ν_e событиям составляют события, в которых γ рождает e^+e^- пару, в которой был детектирован только один электрон. Это может быть, например, в случае, когда один электрон имеет низкую энергию, и сильное рассеяние делает невозможным привязать его к γ -вершине.

Пучок CNGS

Нейтринный пучок CNGS (CERN Neutrino to Gran Sasso – Нейтрино из ЦЕРН в Гран Сассо) создается протонным пучком с энергией 400 ГэВ из ускорителя SPS, которые проходя по тоннелю длиной 840 м, попадают в углеродную мишень, рождая каоны и пионы (Рис. 6). Положительно заряженные π/K мезоны определенной энергии направляются на фокусирующую систему из двух линз, называемых «горн» и «отражатель» в направлении Гран Сассо. Эти частицы распадаются на ν_μ и μ в 1000-метровом распадном тоннеле. Все адроны, т.е. протоны, не проваимодействовавшие с мишенью, пионы и каоны, не распавшиеся в тоннеле, поглощаются дополнительной мишенью. Только нейтрино и мюоны проходят через этот блок, составленный из графита и стали, длиной 18 м. Мюоны, поглощаемые в основном в последующих 500 м скалы, детектируются двумя мюонными установками. Это позволяет измерять интенсивность нейтринного пучка и его профиль.

Протонный пучок выходит из SPS с помощью того же канала экстракции, что и для одного из двух пучков LHC. Примерно через 100 м от места экстракции набор переключающих магнитов используется для направления пучка на LHC или к мишени CNGS. Протонная линия CNGS состоит из части окружности длиной 620 м для направления пучка в сторону Гран Сассо под наклоном 5,6% , за которой следует фокусирующая система длиной 120 м, формирующая пучок требуемого размера на мишени. Система фокусировки

позволяет варьировать размер пучка от $\sigma=0.25$ мм до 1.0 мм. В течение цикла CNGS (6 секунд) происходят две экстракции протонов (10.5 мкс каждая, с промежутком 50 мс) по 2.4×10^{13} протонов с энергией 400 ГэВ.

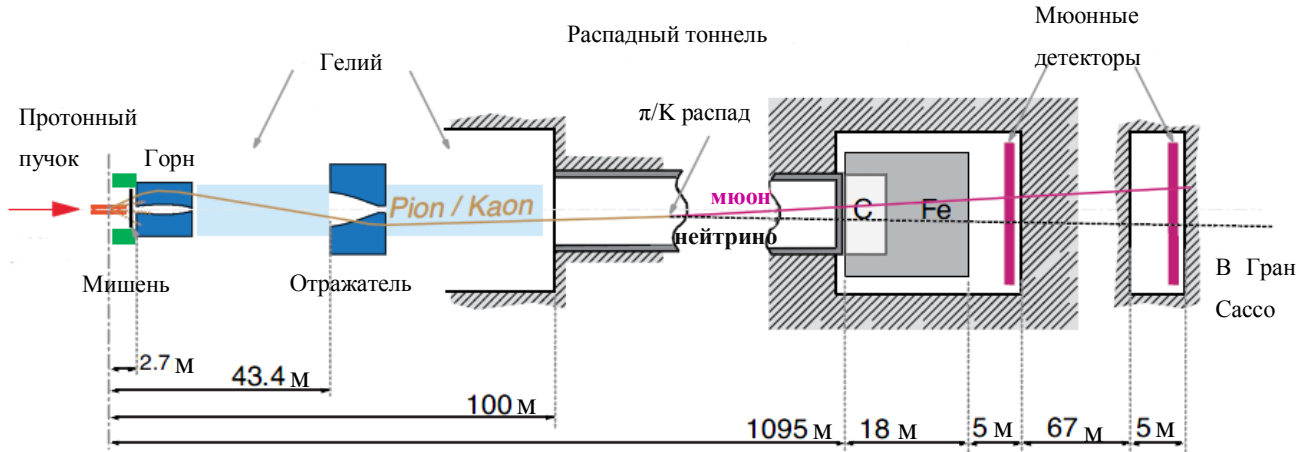


Рис. 6. Схема установки нейтринного пучка CNGS

На системе CNGS (CERN Neutrino to Gran Sasso) установлено две системы детектирования мюонов, расположенных дальше по ходу пучка от адронной мишени, разделенные 67 метрами скальной породы. На каждой системе установлено 42 мюонных детектора. Такая система позволяет измерять интенсивность и профили по вертикальной и горизонтальной оси мюонов, рождающихся вместе с мюонными нейтрино при распаде пионов и каонов.

Нейтринный пучок состоит преимущественно из ν_μ . Примесь $\bar{\nu}_\mu$ составляет 2.1%, ν_e и $\bar{\nu}_e$ составляют менее 1%. Энергетические распределения для каждой оставляющей показаны на рис 7.

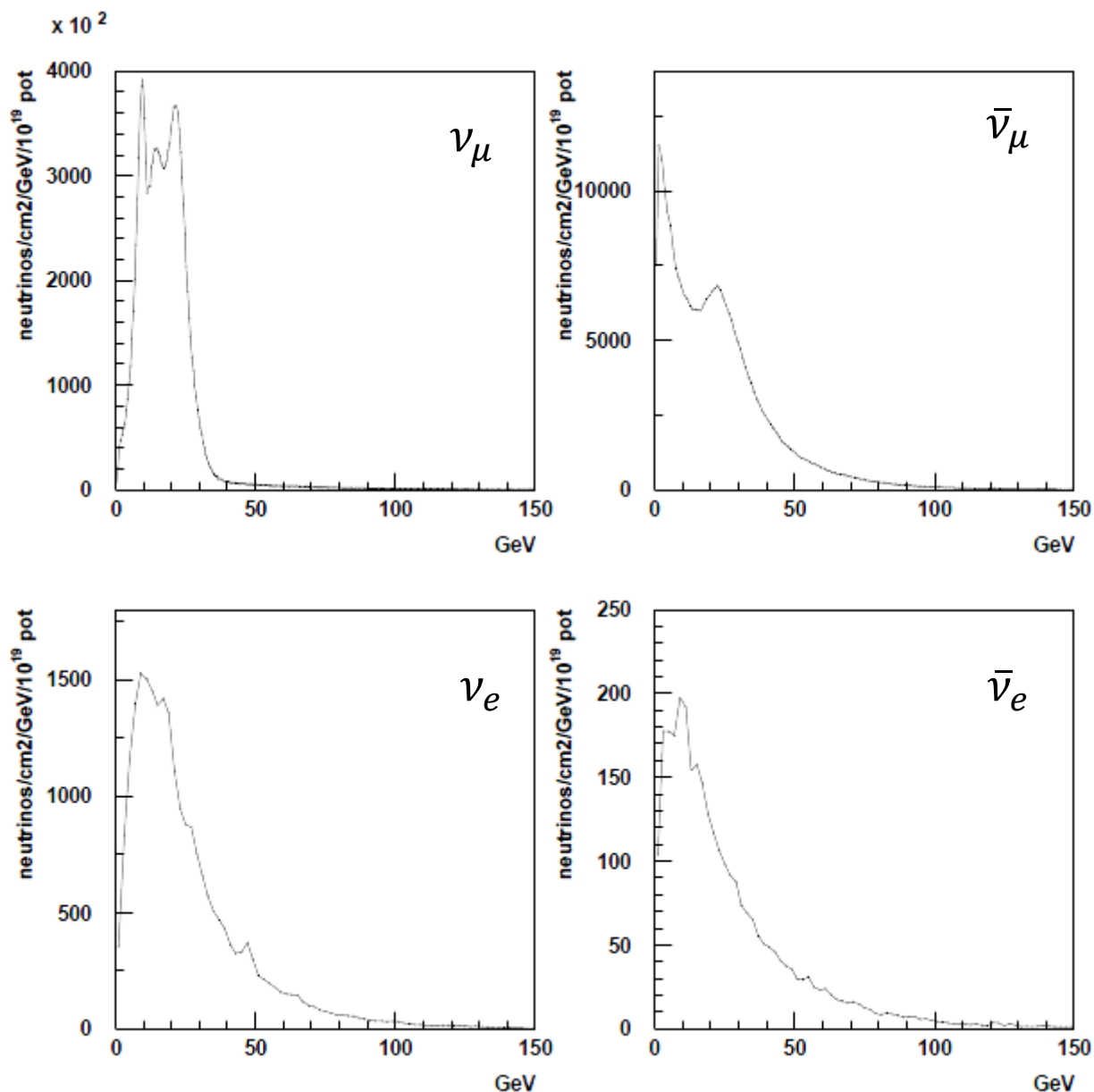


Рис. 7. Энергетическое распределение составляющих пучка CNGS.

Детектор эксперимента OPERA

Детектор эксперимента OPERA состоит из двух супермодулей. Со стороны пучка расположена вето система. Каждый супермодуль состоит из мишенной области и мюонного спектрометра. Мишенная область состоит из стен фотоэмульсионных «кирпичей» и электронной системы целеуказания Target Tracker. Общая схема детектора эксперимента приведена на рис. 8.

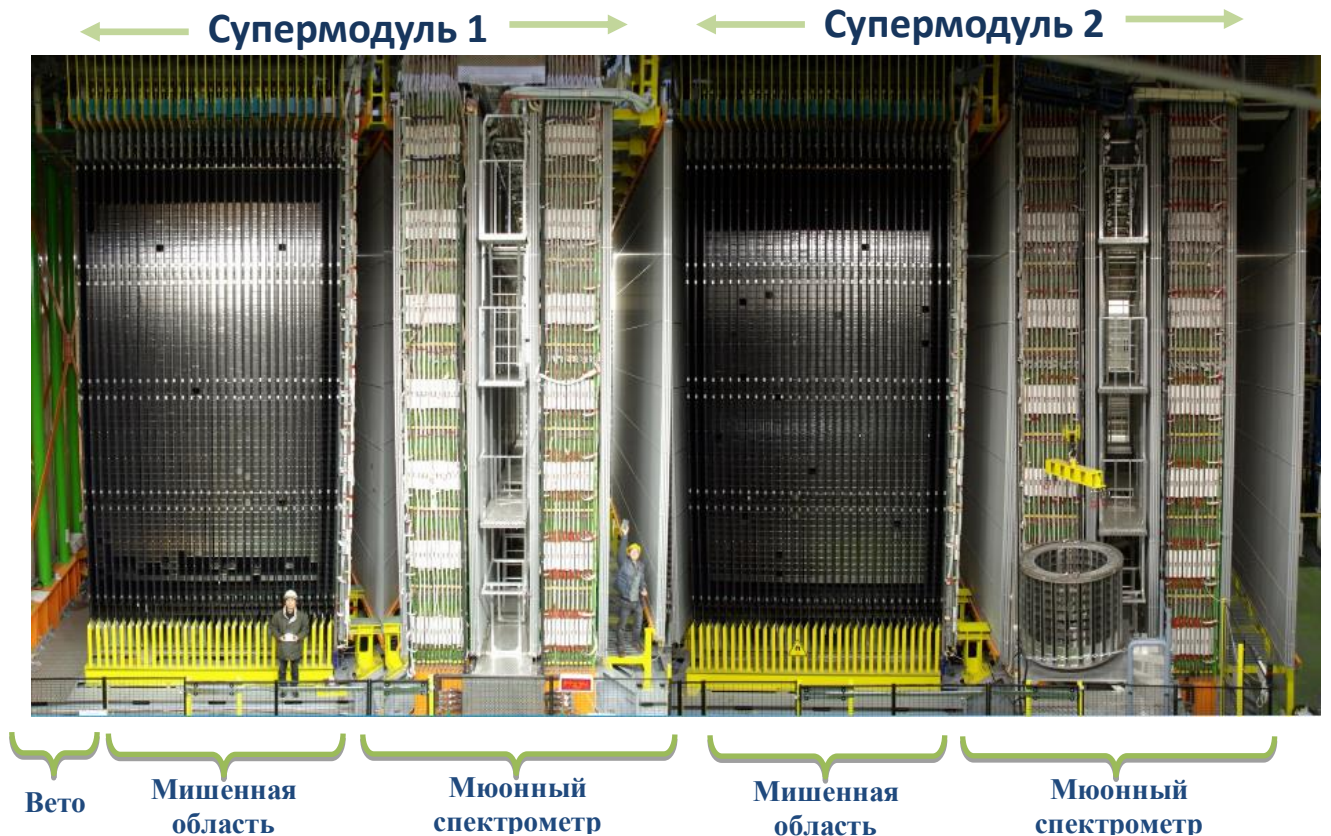


Рис. 8. Фотография детектора эксперимента OPERA.

Ядерная фотоэмульсия в эксперименте OPERA

Эффективность кристаллов AgBr в ядерной эмульсии, используемой в эксперименте OPERA, составляет ~ 0.16 для минимально ионизирующих частиц, при этом на 100 мкм эмульсии частица проходит примерно через 230 кристаллов. Таким образом, чувствительность эмульсии составляет ~ 36 зерен/100 мкм эмульсии.

Суммарная площадь эмульсии, используемой в эксперименте OPERA, составляет $100\,000\text{ м}^2$. Нанесение такого количества эмульсионного геля на подложку не может быть выполнено вручную, как это делалось в предыдущих экспериментах. Например, самый большой эмульсионный эксперимент, проведенный до этого (CHORUS), использовал 300 м^2 [45]. Поэтому эмульсия для эксперимента производилась в промышленных масштабах фирмой Fuji. Детальное описание характеристик этой эмульсии дано в [46].

Основным регистрирующим элементом детектора OPERA является пластина, имеющая два эмульсионных слоя толщиной 44 мкм, нанесенных с двух сторон на прозрачную триацетилцеллюлозную подложку толщиной 205 мкм. Общая толщина пластины 293 ± 5 мкм. Поперечный размер составляет 124.6 ± 0.3 мм \times 99.0 ± 0.2 мм. Пространственное разрешение эмульсионного геля при использовании стандартного проявителя составляет 50 нм, что соответствует угловому разрешению 0.35 мрад при использовании двухслойной эмульсии. Плотность геля 2.7 г/см³, радиационная длина X_0 составляет 5 см.

Ядерная эмульсия накапливает все треки (космические лучи, радиационный фон) с момента изготовления до проявки. При этом за все время производства (около одного месяца), каждая пленка накапливает примерно 3000 треков на квадратный сантиметр. Но максимальная плотность для нормального анализа экспериментальных данных должна составлять не более 100 треков на квадратный сантиметр. Для уменьшения накопленного фона была разработана специальная процедура обновления, в процессе которой уже готовые эмульсионные пластины держат в течение нескольких суток в среде с высокой относительной влажностью и температурой. Например, при обработке эмульсий при относительной влажности 98% и температуре 27° плотность уже накопленных треков уменьшается с 36 до 10 блобов на 100 мкм. Эта процедура не влияет дальнейшую чувствительность эмульсии.

Случайно распределенные зерна в эмульсии (вуаль), обусловленные термальным возбуждением, составляют фон для поиска треков. Уровень фона выражается в количестве фоновых зерен на 1000 мкм³ эмульсии. Измерения показывают, что процедура обновления, уменьшая фон от космических лучей, увеличивает фон от вuali с 3 до 6 зерен на 1000 мкм³. Проведенные оценки показали, что через 5 лет хранения в подземной лаборатории Гран Сассо чувствительность эмульсии будет составлять 34 зерна/100 мкм, а вуаль 14 ± 1 зерен/1000 мкм³.

Пленки были доставлены в Италию морем, на корабле, чтобы уменьшить общее число накопленных за время транспортировки низкоэнергетичных космических лучей, особенно электронов. Транспортировка длилась около одного месяца, при этом эмульсия находилась в контейнере, где поддерживалась температура 15° . Пластины находились в вертикальном положении. Тем не менее, суммарное количество накопленных космических лучей составило около 1000 на см^2 . Для подавления этого фона эмульсии были помещены в вакуумную упаковку, без промежутков между ними. Одна упаковка используется для сборки одного эмульсионного «кирпича», так что когда между пластинами укладывали пластины свинца, взаиморасположение пластин менялось, и накопленные при транспортировке треки как бы исчезали на уровне анализа данных (Рис. 9). Специальные тесты подтвердили это «виртуальное стирание». Начальный фон перед транспортировкой составлял

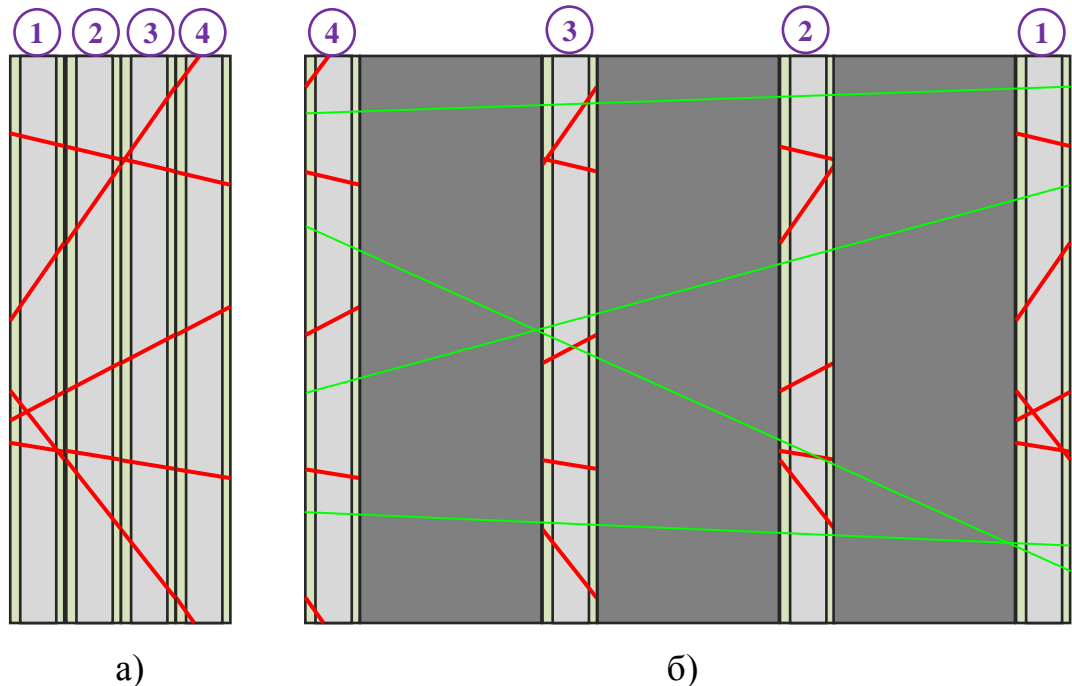


Рис. 9. Эффект виртуального стирания: а) расположение пластин при транспортировке и накопленные треки; б) расположение в кирпиче. Видно, что накопленные при транспортировке треки не имеют продолжения в последующих пластинах и фактически исчезают из обработки.

43 ± 4 треков/см², после транспортировки 1000 ± 50 треков/см², а с учетом «виртуального стирания» 113 ± 20 треков/см².

Эмульсионная мишень детектора разделена на отдельные «кирпичи», что обеспечивает возможность извлечения каждого из них по отдельности, проявку и обработку вскоре после того, как в кирпиче произошло взаимодействие. Размер отдельного кирпича должен быть достаточно большим, чтобы в нем поместилась первичная вершина и вершина распада, была обеспечена возможность идентификации частиц и кинематический анализ события. Каждый кирпич состоит из 57 эмульсионных слоев, прослоенных 56-ю свинцовыми пластинами толщиной 1 мм, образуя, таким образом, т.н. Эмульсионно-Облачную Камеру (Emulsion Cloud Chamber – ECC). Размер кирпича 128 мм×102 мм×79 мм, его масса 8.3 кг, радиационная длина $10 X_0$ (Рис. 10), всего в детекторе OPERA используется 150 тысяч кирпичей.

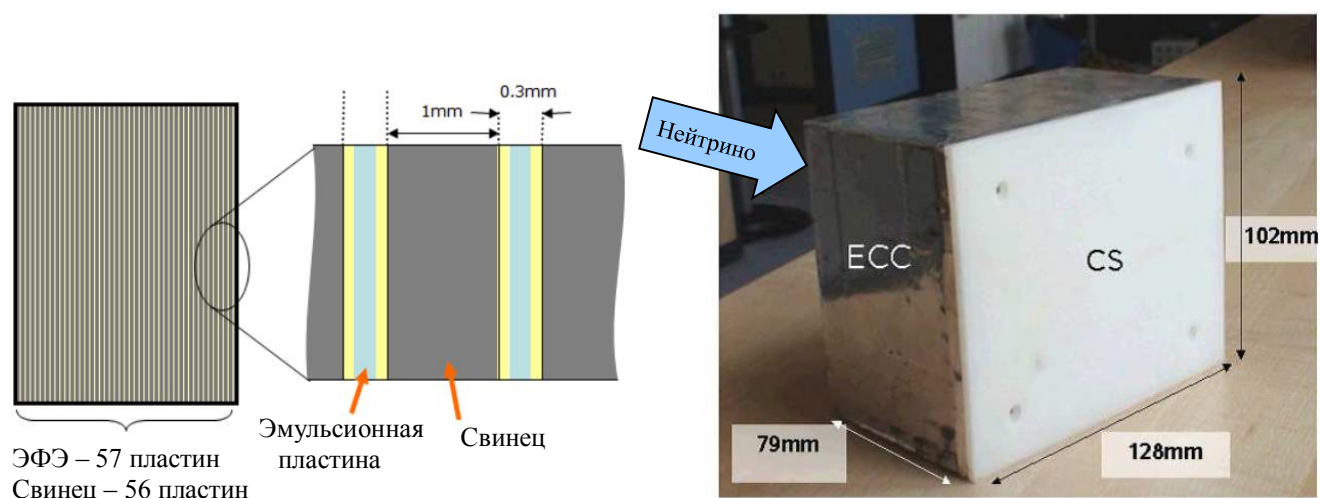


Рис. 10. Слева: схематическое изображение эмульсионного кирпича. Посередине: увеличенный вид двух эмульсионных пластин и пластины свинца между ними. Справа: фотография кирпича, устанавливаемого в детектор OPERA. CS – коробка содержащая две дополнительные интерфейсные эмульсионные пластины.

Для анализа события требуется знать с большой точностью взаимное расположение пластин. Для этого после извлечения кирпича и перед его

проявкой, для последующей «сшивки» эмульсионных слоев, ставятся рентгеновские метки, и проводится экспозиция атмосферными мюонами. Совокупность таких маркировок позволяет с высокой точностью восстановить взаимное расположение пластин. Тем не менее, невысокая точность электронного детектора ТТ затрудняет поиск трека от события среди треков космических лучей. Специальный двухслойный эмульсионный интерфейсный детектор CS (Changeable Sheets – сменные пластины) позволяет во многом облегчить поиск нужного события.

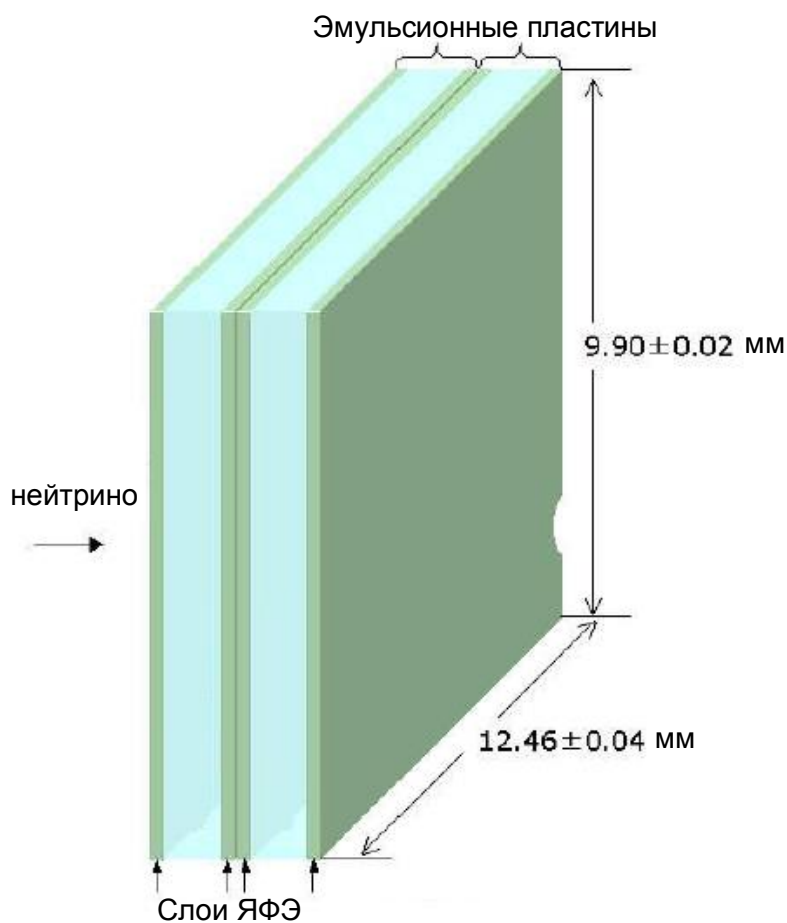


Рис. 11. Сменные пластины.

Концепция CS уже применялась ранее в гибридных эмульсионных экспериментах, таких как E531, CHORUS и DONUT. CS (Рис. 11) состоит из двух таких же эмульсионных пластин, которые используются в кирпичах, однако с низким фоном [47]. Они собраны непосредственно в подземной лаборатории LNGS, предварительно пройдя процедуру обновления, чтобы избавиться от накопленных

за время транспортировки треков космических лучей. Фон в этих пластинах составляет 100 треков/см², а использование двух пластин обеспечивает «виртуальное стирание» до уровня 10^{-4} треков/см². Две пластины упакованы в непрозрачную вакууммированную упаковку и помещены в пластиковую

коробку, которая крепится непосредственно к эмульсионному кирпичу со стороны вылета продуктов взаимодействия (см. Рис. 10, справа).

Точное взаимное расположение пластин, как уже говорилось выше, обеспечивается также маркировкой гамма-источником. Маркировка производится, пока CS еще прикреплен к кирпичу, таким образом, на 2 пластины CS и последний слой кирпича наносятся 5 круглых точек диаметром 150 мкм. Достигаемая при этом точность восстановления взаимного расположения пластин составляет 10 мкм.

Электронный сцинтилляционный детектор Target Tracker

Вся мишень детектора эксперимента OPERA состоит из 62 стен (по 31 в каждом супермодуле), чувствительная площадь, определяемая стенами эмульсионных кирпичей, имеет размер $6.7 \times 6.7 \text{ м}^2$. Основной задачей электронного ТТ (Target Tracker) детектора является определение кирпича, в котором произошло нейтринное взаимодействие и предоставление калориметрической информации о событии. ТТ представляет собой сплошные стены из сцинтилляторов, находящиеся между стенами эмульсионных кирпичей. Каждая стена состоит из набора четырех горизонтальных модулей, за которыми следует набор вертикальных модулей, создающих, таким образом, двухмерную картину. Каждый модуль состоит из 64 сцинтилляционных полос размером $6.86 \text{ м} \times 10.6 \text{ мм} \times 26.3 \text{ мм}$. Считывание производится с обеих сторон с помощью WLS световодов и мультианодного фотоумножителя. Схематическое изображение полосы представлено на рис. 12. ТТ обеспечивает точность позиционирования трека мюона $\pm 4 \text{ см}$.

Вето система

Нейтрино CNGS могут взаимодействовать в скальных породах и бетоне вокруг детектора OPERA. Вторичные продукты взаимодействия могут попасть в детектор и вызвать ложное срабатывание триггерной системы. Чтобы

исключить такие события, перед детектором установлена вето-система. Ее детектор – специально разработанная стеклянная резистивная плоская камера (РПК) [48]. Суммарная площадь около 200 м^2 , ширина стрипов 2.5 см.

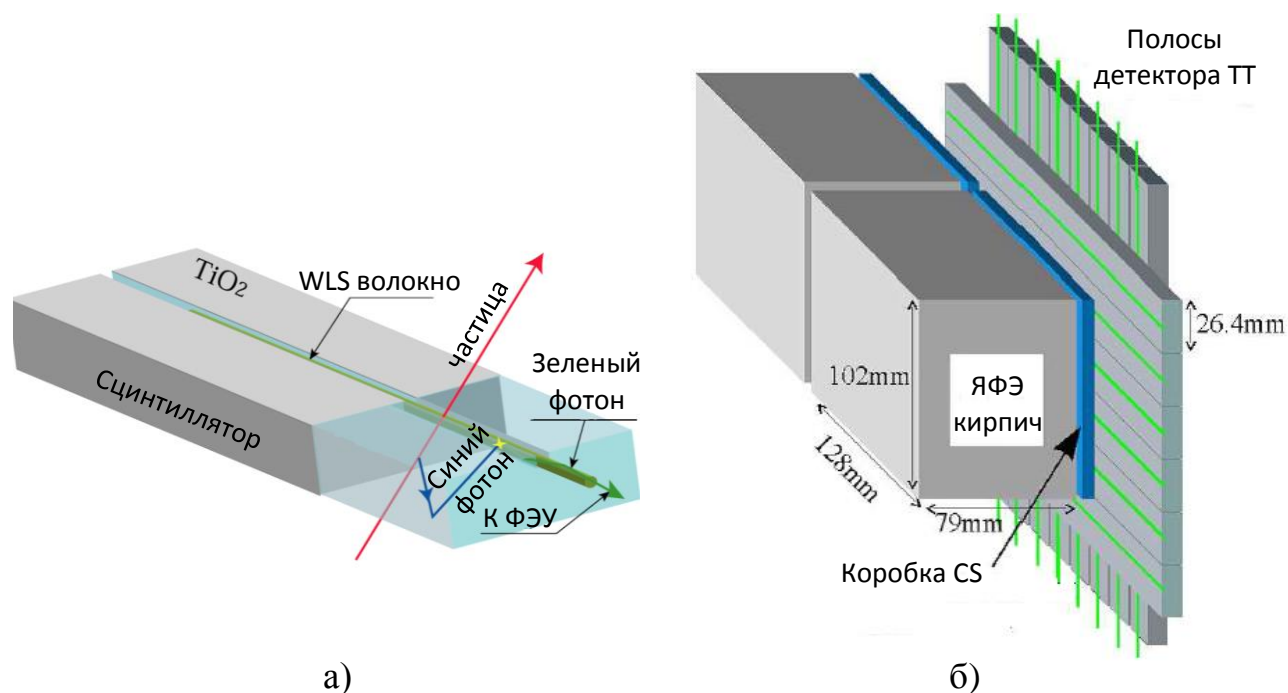


Рис. 12. Сцинтилляционный детектор Target Tracker. а)Схема одной полосы б)расположение полос ТТ по отношению к эмульсионным кирпичам в детекторе OPERA.

Магнитный спектрометр

На каждом супермодуле детектора установлен магнитный спектрометр, обеспечивающий точное измерение импульса и заряда пролетающих частиц, в частности мюонов. Магнитный спектрометр состоит из тороидального магнита, РПК детектора и прецизионного детектора из дрейфовых трубок.

Магнит (Рис. 13) состоит из двух плоских вертикальных стен, сверху и снизу замкнутых ярмом. На нижнем и верхнем ярмах расположены катушки, по 20 витков каждая, создающая магнитное поле. Средняя напряженность магнитного поля при токе 1600 А (суммарный эффективный ток 64 кА) составляет 1.53 Т. Каждая стена составлена из 12 стальных пластин толщиной

5 см с промежутком в 2 см. В эти промежутки помещены детекторы РПК (Рис. 13, справа).

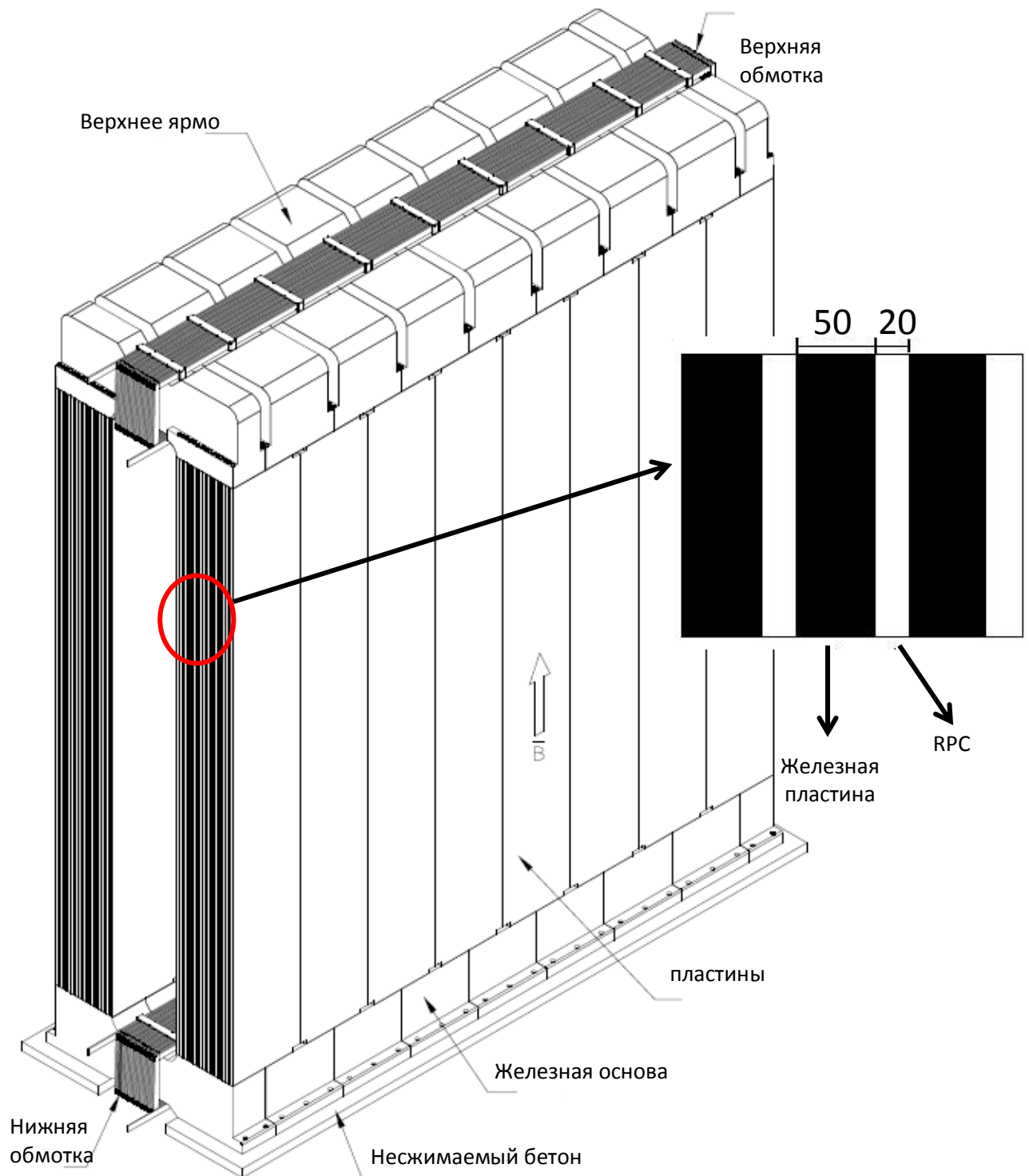


Рис. 13. Магнит мюонного спектрометра.

Система РПК состоит из 22 детекторов РПК расположенных внутри магнита и двух т.н. ХРС, или X-RPC (X-Resistive Plate Chamber, X-РПК), РПК в

котором полосы расположены под углом $\pm 42.6^\circ$ к горизонтали. Технология РПК такая же, как разработанная для экспериментов LHC, ВаВаг и Argo.

Прецизионный трекер (ПТ), представленный на рис. 14, используется вместе с другими частями мюонного спектрометра для идентификации мюона, определения знака его заряда и измерения импульса. Два плеча магнита с противоположным направлением магнитного поля



Рис. 14. Прецизионный трекер.

отклоняют мюон в горизонтальной плоскости. ПТ измеряет координаты трека в горизонтальной плоскости как показано на рис. 15.

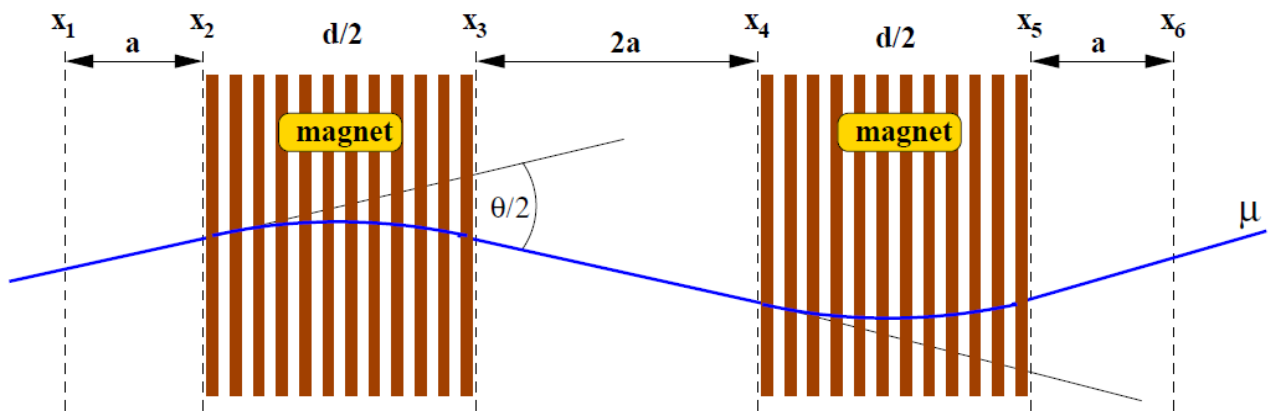


Рис. 15. Схематическое изображение мюона пролетающего через систему мюонного спектрометра. Шесть камер дрейфовых трубок ПТ обозначены x_1 - x_6 .

ПТ состоит из 12 камер (стенок дрейфовых трубок, по 6 в каждом супермодуле), каждая площадью $8 \times 8 \text{ м}^2$. В общей сложности в ПТ используется 10000 вертикальных дрейфовых трубок длиной 8 м, внешним диаметром 38 мм, с толщиной стенок 0.85 мм и чувствительной проволокой диаметром 45 мкм. Пространственное разрешение, обеспечиваемое ПТ составляет 300 мкм.

Извлечение и проявка кирпичей

Как только событие зарегистрировано в электронном детекторе, кирпич, с наибольшей вероятностью содержащий вершину взаимодействия, идентифицируется по специальному алгоритму, извлекается с помощью BMS (Brick Manipulator System – Система Манипулирования Кирпичами) и маркируется гамма-лучами. Маркировочный аппарат создает пять круглых меток диаметром 150 мкм на двух пластинах CS и последнем слое кирпича, обеспечивая взаимное позиционирование пластин CS и всего интерфейсного детектора CS с кирпичом. Затем CS отсоединяется, кирпич помещается в комнату, экранированную 5 см сталью, уменьшающей радиационный фон от бетона в 20 раз. CS передается на проявку, где конверт открывается, пластины маркируются компьютеризированным оптическим устройством, и проявляются. Химический процесс длится около трех часов на партию. Всего проявляется до 60 CS в сутки.

Затем проявленные CS сканируются с целью поиска треков в соответствии с предсказанием ТТ. Если треков не найдено, новый CS крепится к кирпичу и кирпич возвращается обратно в детектор. Но может быть решено продолжить поиск этого события, тогда будут извлечены один или несколько близлежащих кирпичей. Для них вся процедура повторяется. Если результат сканирования положительный – на кирпич наносятся боковые метки для возможности восстановления геометрии кирпича после того как он будет разобран на отдельные пластины для сканирования.

После этого кирпич облучается атмосферными мюонами, проявляется и отправляется в сканирующие лаборатории для обработки. Экспозиция длится 12 часов и соответствует плотности треков $1/\text{мм}^2$. Эти этапы производятся уже в наземной лаборатории LNGS.

Сканирующие системы

В начале 90-х годов разработка автоматических сканирующих систем привела к возрождению эмульсионной методики. Полностью автоматические сканирующие системы впервые были разработаны в Японии. С тех пор скорость сканирования постоянно улучшается, благодаря передовым разработкам в электронике и обработке изображений.

Поскольку в эксперименте OPERA обработка предполагалась в квази-реальном времени, потребовались специальные разработки сканирующих систем. В результате было создано два типа сканирующих систем, со сравнимой производительностью, но отличающихся по программной и аппаратной архитектуре.

Европейская Сканирующая Система (ЕСС), являющаяся результатом совместных разработок нескольких европейских лабораторий, представлена на рис. 16, а). Она создана на базе разработанной в Салерно в конце 90-х сканирующей системы, описанной в [49-52].

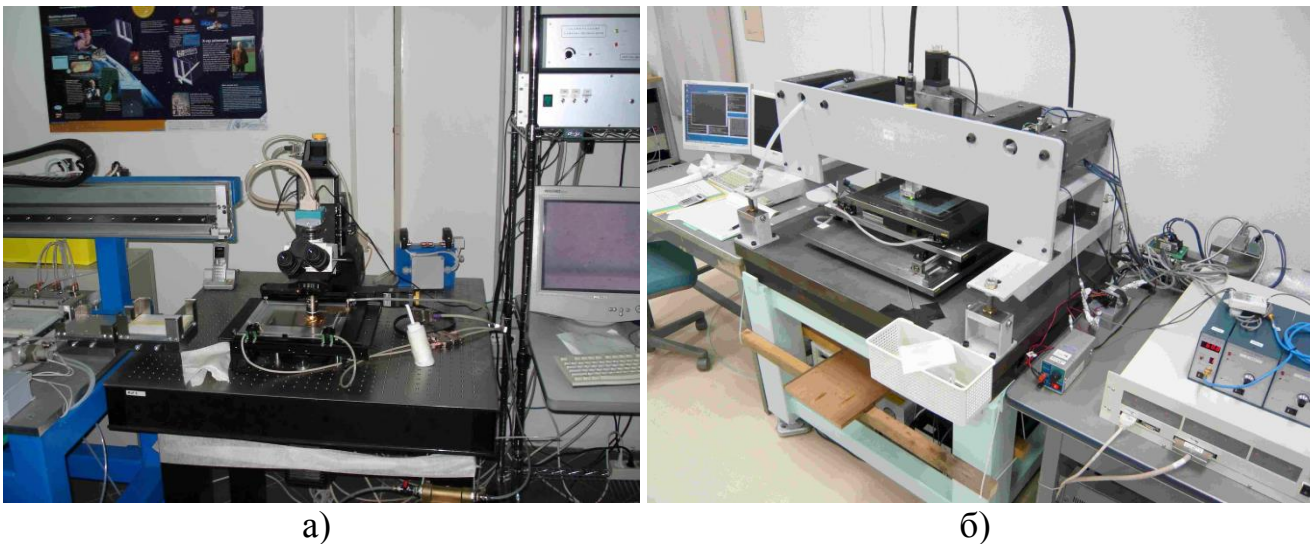


Рис. 16. Современные сканирующие системы. а) ESS б) S-UTS

В ЕСС используются коммерческие подсистемы в программно-ориентированном комплексе. Такой подход позволяет легко производить модификацию системы при появлении на рынке более производительных подсистем.

Микроскоп представляет собой декартовый робот, на подвижном вдоль осей X-Y столике которого закреплена эмульсия, и CMOS камеру, закрепленную по направлению оптической оси (Z), вдоль которой она может перемещаться для изменения положения фокальной поверхности с шагом примерно соответствующим половине глубины фокуса (3 мкм). Управляющая рабочая станция содержит контроллер движения, перемещающий эмульсию в место, которое требуется отсканировать, и направляет камеру вдоль оси Z для создания томографической последовательности изображений вдоль ее глубины. Для обработки площадей больших размера одного поля зрения (около 300×400 мкм²) производится последовательное сканирование соседних полей зрения так, чтобы покрыть всю необходимую площадь. Изображения захватываются с мегапиксельной камеры, работающей на скорости 376 кадра в секунду, при неподвижном столике X-Y, при равномерном движении вдоль оси Z (так называемый stop-and-go алгоритм). Благодаря маленькой выдержке ($< 1/3000$ сек) захватываемые изображения практически неподвижны. Далее они отправляются на плату обработки изображения на рабочей станции, где производится усиление сигнала от проявленных зерен в эмульсии и устранение эффекта оптических аберраций. Трехмерное множество кластеров обрабатывается online на центральном процессоре, при этом восстанавливаются цепочки зерен в одном слое эмульсии, т.н. микротреки. Микротрек может содержать от 6 до 16 кластеров.

Таким образом получают "сырые" данные – набор микротреков и зерен, из которых они составлены. Эти данные отправляются по локальной сети на локальный вычислительный кластер для дальнейшей обработки, контроля качества данных и сохранения в локальную базу данных.

В результате сшивки двух микротреков из двух слоев получают так называемые базовые треки.

Вся система может работать на постоянной скорости 20 см²/час 24 часа/сутки при этом объем выходных данных составляет примерно 5 Гб/день/микроскоп.

Есть две модификации этой системы, использующие иммерсионный и безиммерсионный объектив.

Также в некоторых лабораториях используется робот для автоматической смены пластин.

Японская система сканирования, S-UTS (Super-UltraTrackSelector) [53], разработанная в Нагойе, использует специально разработанные аппаратные компоненты (Рис. 16, б). Главной особенностью этой системы является отсутствие остановки столика при захвате изображений, что является узким местом традиционных систем. Чтобы избежать остановок, столик движется с постоянной скоростью вдоль одной из осей при захвате изображения, и при этом во время захвата изображений объектив также движется с такой же постоянной скоростью вдоль этой оси вместе с перемещением вдоль оси Z для захвата изображений на требуемой глубине. Движение объектива осуществляется пьезоэлектрическими приводами. Камера имеет разрешение 512×512 точек, работает на частоте 3000 Гц. Для достижения требуемого пространственного разрешения поле зрения покрывает площадь 120×120 мкм². Поток данных, ввиду такой высокой скорости камеры, составляет 1.3 Гб/с, он обрабатывается специальным front-end процессором, уменьшающим поток до 150-300 Мб/с. Специально разработанная плата производит распознавание треков, и сохраняет их во временное устройство хранения на скорости 2-10 Мб/с.

Далее уже на компьютере обрабатываются микротреки, восстанавливаются базовые треки, информация сохраняется в базу данных, из которой данные впоследствии извлекаются для физического анализа.

Практическая скорость сканирования составляет 55 см²/час, однако есть модификации, использующие большее поле зрения и достигающие 72 см²/час [53].

Все данные хранятся в центральной базе данных эксперимента в Гран Сассо (Италия) имеющей зеркало в вычислительном центре IN2P3 в Лионе (Франция).

С ее помощью обеспечивается сохранность и эффективность обмена данными внутри коллаборации.

Методы сканирования эмульсии

В зависимости от полученного целеуказания есть два разных подхода к сканированию. В одном случае, т.н. общего сканирования, производится поиск всех треков в заданной области эмульсии, при этом ограничение по углу, как правило, составляет ± 400 мрад от перпендикуляра к эмульсии. В случае, когда есть априорная информация об угле искомого трека, треки реконструируются только в ограниченной области по углу, и таким образом повышается скорость обработки, а также, в некоторых случаях, эффективность.

Рассмотрим подробнее основной цикл анализа сканируемых событий. Сканирование CS производится в двух лабораториях имеющих ферму сканирующих станций, одна из которых находится в Национальной Лаборатории Гран Сассо, а другая в Нагойе.

Электронный детектор дает целеуказание на кирпич, где произошло нейтринное взаимодействие. Более того, в случае события с мюоном в конечном состоянии он дает наклон трека мюона и прицельный параметр по отношению к кирпичу с точностью, показанной на рис. 17.

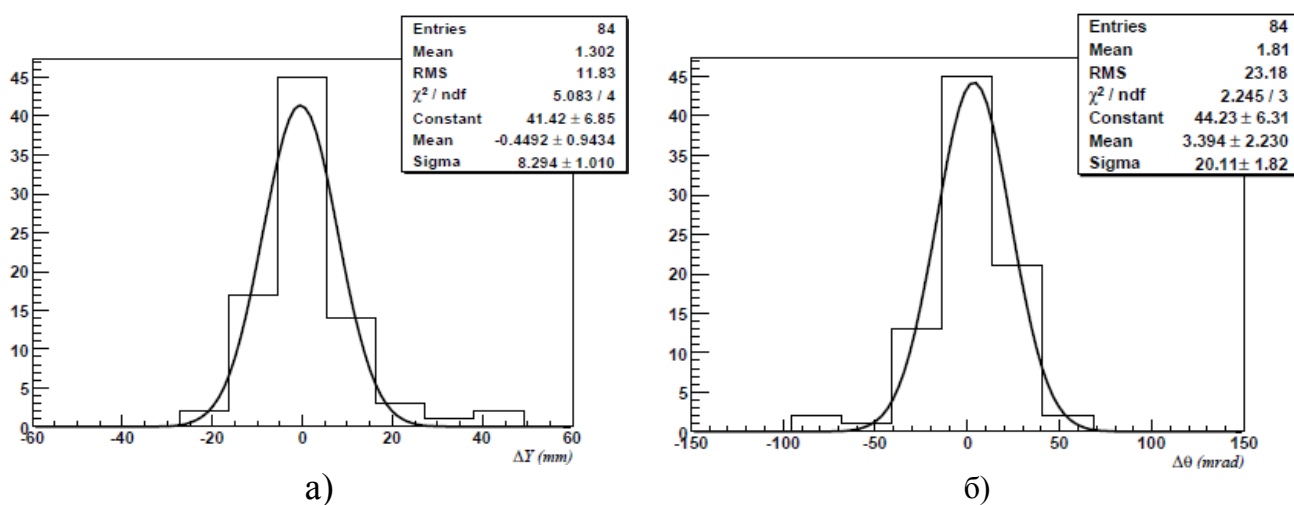


Рис. 17. Распределение координатных (а) и угловых (б) отклонений между предсказанием мюона и треками, найденными в CS.

Для событий по нейтральному току среднее значение координат хитов детектора ТТ указывает на середину зоны сканирования с точностью, сравнимой с точностью предсказания для событий с мюоном. Таким образом, зона сканирования на CS составляет 50 см^2 . С целью повышения эффективности сканирование производится независимо для двух пластин CS. С учетом восстановления геометрии по рентгеновским меткам, восстановленные треки по двум пластинам хорошо согласуются. Внутренняя точность составляет менее 2 мкм, в то время как систематическая ошибка в измерении меток составляет порядка 10 мкм. Все найденные кандидаты треков проверяются оператором с целью исключить случайные совпадения зерен, которые могут образовать ложный трек.

Далее подтвержденные в CS кандидаты треков экстраполируются в объем кирпича, 4.5 мм обратно к направлению пучка. Рентгеновские метки также видны на последней (57-й) пластине кирпича, по ним производится привязка системы координат кирпича к CS, и, соответственно, и экстраполяция треков. При обнаружении кандидатов треков, реконструированных в CS в объеме кирпича хотя бы на одной из последних трех пластин (55-57), производится прослеживание этих треков вдоль кирпича, пока они не исчезнут. Эта процедура прослеживания называется Scan Back (дословно сканирование назад). Такое прослеживание требует знания о взаимном расположении пластин с хорошей точностью, в то время как механический относительный сдвиг пластин может составлять несколько сот микрон. Боковые рентгеновские метки, описанные выше, дают точность относительного позиционирования 12 мкм. Такой точности достаточно для быстрой процедуры прослеживания, поскольку область поиска трека составляет одно поле зрения. Остановка частицы и, соответственно, окончание трека определено как отсутствие следа частицы на трех последовательных пластинах.

Эмульсионный кирпич также облучается космическими лучами перед проявкой. Точность восстановления относительного положения пластин по трекам космических лучей на нескольких квадратных миллиметрах вокруг

интересующего трека лучше, чем 2 мкм. Такая точность важна для физического анализа, например, при поиске малых изломов треков или измерении импульсов частиц по множественному кулоновскому рассеянию с точностью выше 20% при 2 ГэВ и 40% при 4 ГэВ.

Окончание трека может соответствовать как первичной, так и вторичной вершине. Для изучения вершины взаимодействия производится сканирование объема 1 см^2 на 5 пластинах обратно к направлению пучка и 10 пластинах по направлению пучка вокруг точки остановки. Данные обрабатываются затем offline, при этом восстанавливается взаимное расположение пластин и треки во всем объеме 16 пластин (Рис. 18, а). Далее по трекам восстанавливается вершина взаимодействия и топология события (Рис. 18, б).

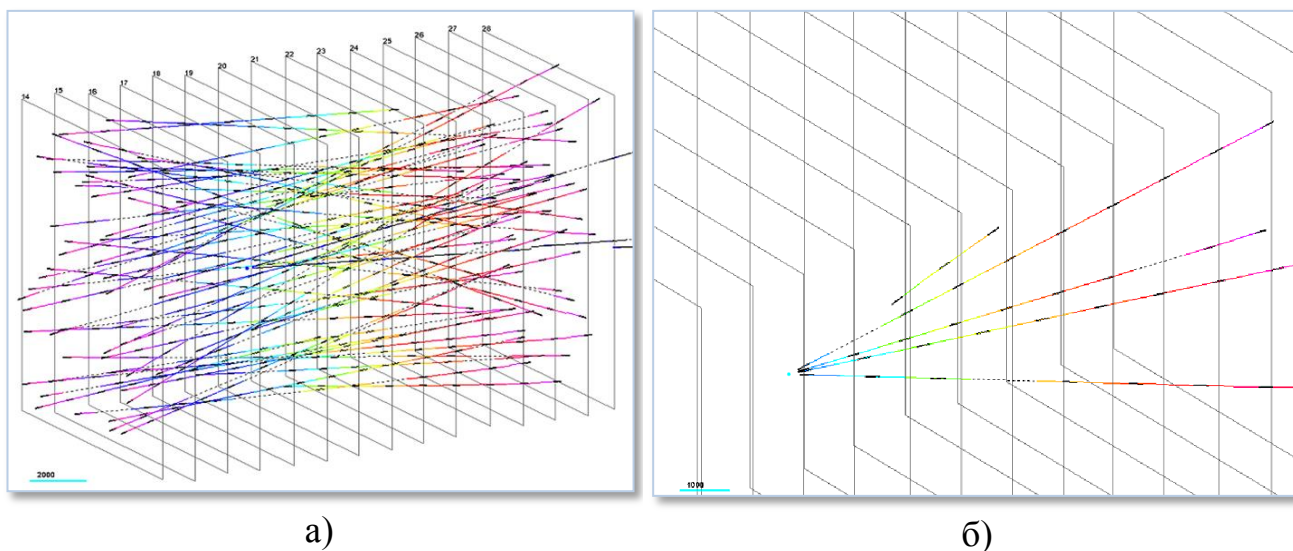


Рис. 18. Реконструкция треков в 15 эмульсионных пластинах кирпича на площади 1 см^2 . а) большинство треков составляют треки космических лучей, по которым производится восстановление взаимного расположения пластин. б) треки события

Глава 4. КОМПЛЕКС ПАВИКОМ

Описание установки

В ФИАНе создан и успешно эксплуатируется не имеющий аналогов в России многоцелевой уникальный измерительный комплекс ПАВИКОМ (Полностью АВтоматизированный Измерительный КОМПлекс). Главным его отличием от всех других подобных систем в мире (всего в мире существует около 40 подобных автоматизированных комплексов) и достоинством является универсальность – на автоматизированных установках комплекса обрабатываются данные, полученные с использованием и ядерных эмульсий, и пластиковых детекторов, и кристаллов оливинов из метеоритов. Ни одна аналогичная установка в мире не используется для решения столь широкого класса задач [33, 54, 55].

На ПАВИКОМе в режиме полной автоматизации осуществляется:

- поиск и оцифровка треков заряженных частиц в материале детектора;
- распознавание и прослеживание треков с помощью компьютера;
- систематизация и первичная обработка данных.

Принцип работы: изображение на CMOS-матрице создает объектив микроскопа. Видеосигнал, формируемый видеокамерой, передается на вход карты оцифровки и захвата изображения. Карта передает эти данные в память компьютера, а также выводит оцифрованный видеосигнал в “живом окне” на монитор.

Комплекс состоит из трех сканирующих установок, отличающихся допустимыми размерами сканируемых детекторов. Для обработки данных эксперимента OPERA используется ПАВИКОМ-3 (Рис. 19).

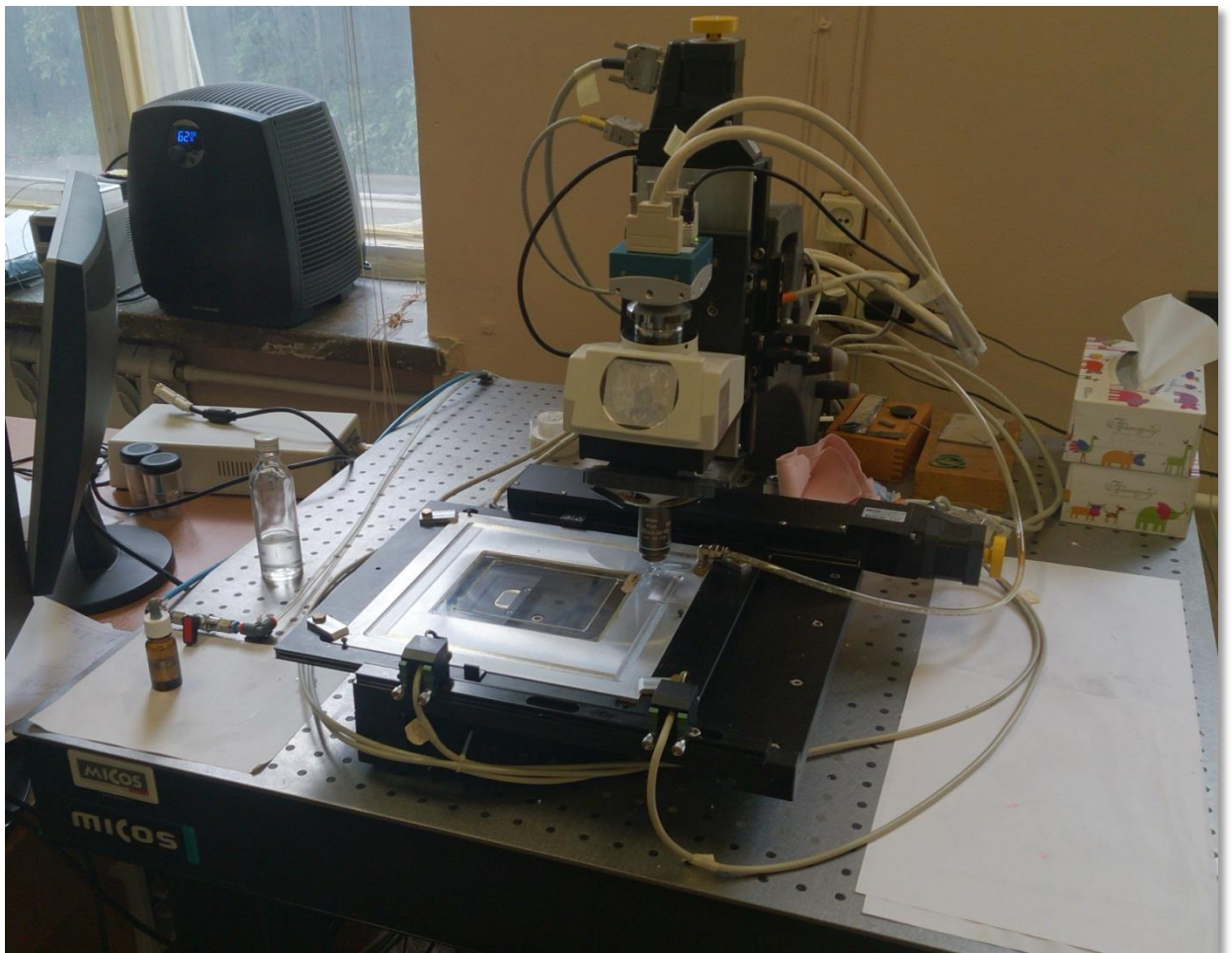
Автоматизированный микроскоп ПАВИКОМ-3 состоит из следующих основных узлов:



а)



б)



в)

Рис. 19. Установки комплекса ПАВИКОМ. а) ПАВИКОМ-1 б) ПАВИКОМ-2 в) ПАВИКОМ-3

- оптический стол с кронштейном для микроскопа и система подвижных столов немецкой фирмы MiCos: MS-8 (рабочий диапазон 205×205 мм, точность 0.5 мкм) и LS-110 с (рабочий диапазон 305 мм, точность 0.2 мкм);

- усилитель (драйвер) двигателей MiCos MPA-5;
- микроскоп и система подсветки с возможностью автоматического управления Nikon, набор объективов Nikon 40-100x;
- цифровая CMOS-камера Mikrotрон MC1310 (разрешение 1280×1024 пикс, максимальная частота кадров – 500 fps при глубине цвета 8 бит);

Микроскоп управляется через рабочую станцию, оборудованную платой захвата и обработки изображений Matrox ODYSSEY Xpro и контроллером движения National Instruments PCI-7344. На рабочей станции установлен процессор Intel Core2Quad Q8400 2.66 ГГц, 4 Гб оперативной памяти и жесткий диск объемом 1 Тб.

Для автоматического управления уровнем света, автором изготовлен специальный кабель с делителем напряжения, обеспечивающий сопряжение контроллера с блоком питания лампы подсветки. Выходное напряжение аналогового выхода контроллера составляет $-10 \div +10$ В, а входное управляющее напряжение блока питания должно составлять $0 - 5,6$ В. Кабель с встроенным делителем напряжения был изготовлен для обеспечения управления с максимальной точностью и предотвращения выхода из строя блока питания лампы (Рис. 20). Он подключается разъемом DE-15 к усилителю MPA-5, а разъемом HR12-10R-8SC к блоку питания лампы.

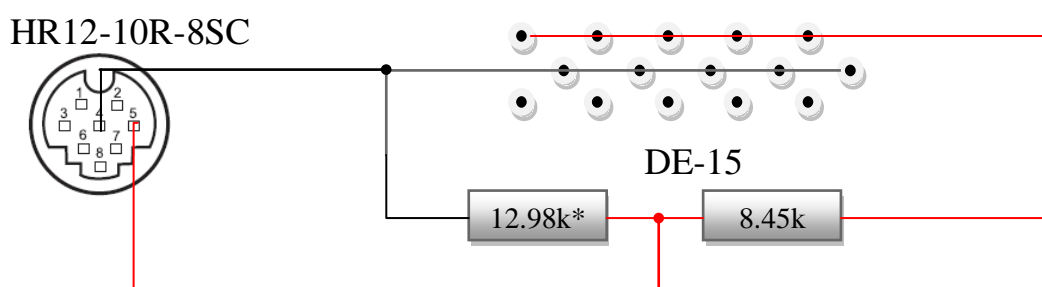


Рис. 20. Схема кабеля управления лампы подсветки. *Сопротивление 12.98 кОм составлено из двух 6.49 кОм

Фиксация эмульсии на столе производится вакуумным прижимом (Рис. 21). Вакуум создается насосом Bucsh Seco SV 1003 D, обеспечивающим давление до 150 мбар с производительностью до 3 м³/час. Для уменьшения износа насоса

и уровня шума в рабочей комнате автором была спроектирована система автоматического поддержания давления в системе в пределах 250-500 мбар. В начале работы насос откачивает воздух из ресивера объемом 50 л. 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. Эта система была изготовлена в ФИАН и введена в эксплуатацию. Автоматическая система поддержания давления в системе вакуумного прижима эмульсий позволила уменьшить время работы насоса на 87%. Фотография системы приведена на Рис. 22. Схема представлена на рис. 23.

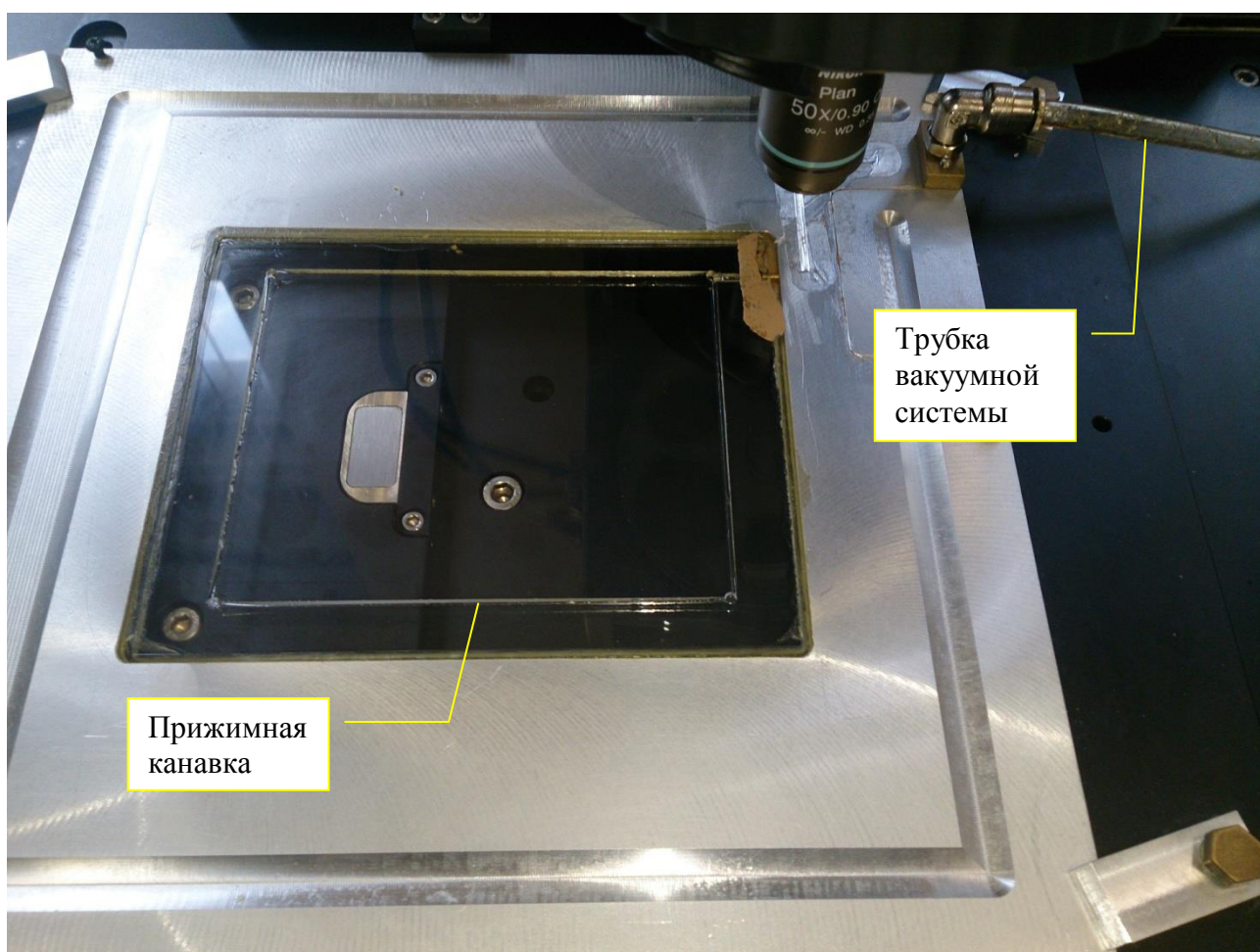


Рис. 21. Предметный стол с вакуумным прижимом.

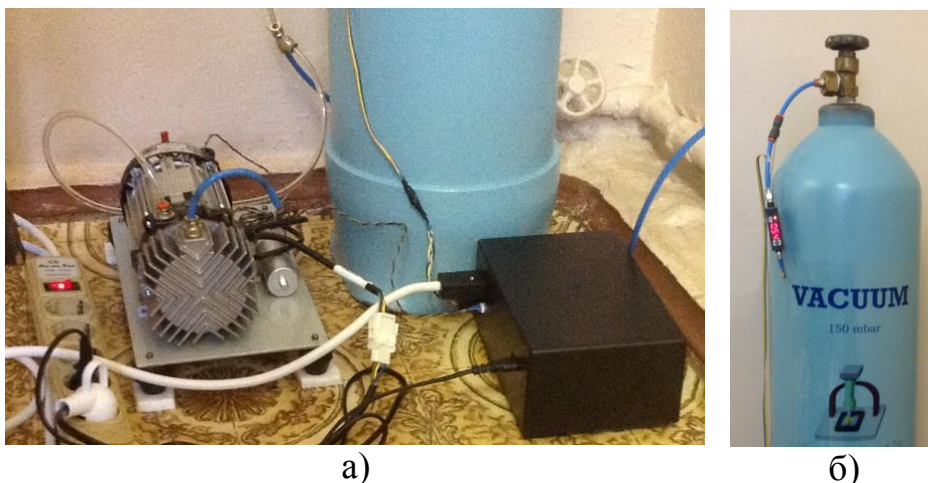


Рис. 22. Вакуумный насос и устройство поддержания давления в системе а) насос и блок управления; б) электронный датчик давления и вакуумный ресивер.

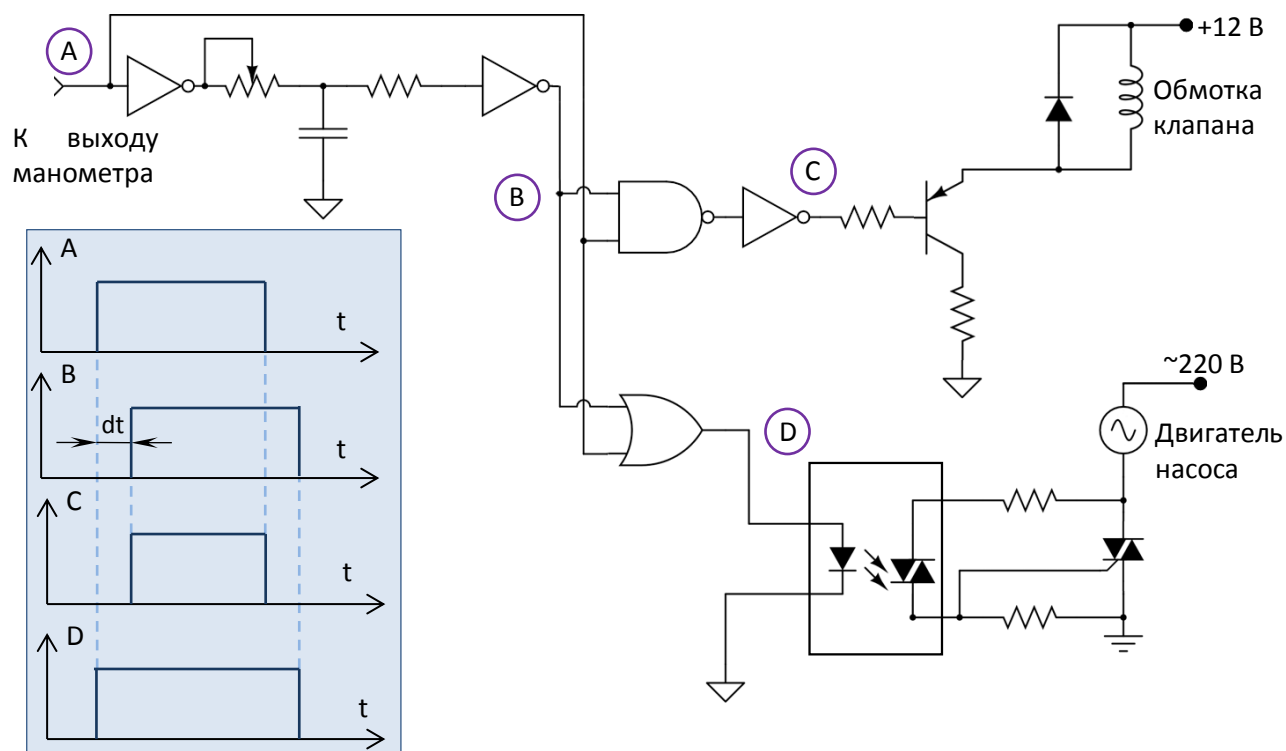


Рис. 23. Принципиальная схема контроллера давления вакуумной системы. В углу показаны зависимости сигналов от времени в ключевых точках схемы: A – сигнал датчика давления. B – сигнал на выходе схемы задержки. C – сигнал управления открытием клапана. D – сигнал управления включением насоса.

Помимо управляющей рабочей станции вычислительная инфраструктура, необходимая для обработки данных эксперимента OPERA, включает в себя следующие узлы:

- Рабочая станция для трекинга, в т.ч. на GPU (Graphical Processing Unit – графический процессор) – обеспечивает реконструкцию треков в режиме online в большом диапазоне углов ($\tan \theta < 1$) в режиме быстрого сканирования. Используется программным комплексом PAVICOM (см. главу 6). На рабочей станции установлен четырех-ядерный процессор Intel Core-i7 2600 3.4 ГГц, 8 Гб оперативной памяти, видеокарта NVIDIA GTX690, 2 Тб дискового пространство + 10 Тб RAID5 массив для хранения данных.
- Рабочая станция для реконструкции в режиме offline и физического анализа (процессор Core2Duo 3,2 ГГц, 2 Гб оперативной памяти, 750 Гб дискового пространства).
- Сервер базы данных ORACLE для хранения отсканированных данных и синхронизации с центральной базой данных эксперимента.

На рабочей станции трекинга также производится разработка и тестирование программного обеспечения использующего вычислительные мощности GPU.

Настройка

Для прецизионных измерений недостаточно одного только точного оборудования. Первостепенную роль в получении качественных результатов и эффективности реконструкции событий играет точная настройка оптики и устранение систематических ошибок путем ряда коррекций, поскольку требуемая точность определения угла наклона для реконструируемых треков составляет единицы миллирадиан. При этом несоосность системы подсветки и оптики микроскопа может приводить к искажениям изображений кластеров, соответственно уменьшая эффективность и точность их распознавания, неправильному восстановлению зерен, а, следовательно, и микротреков, и т.д. Например, из-за неверного наклона кронштейна микроскопа, на котором установлен объектив, по отношению к сканируемой эмульсии может

деформироваться прямоугольное поле зрения и, как следствие, реконструируемый объем эмульсии станет непрямоугольным параллелепипедом. Неверный наклон оси Z (движение объектива по глубине), приведёт к появлению у микротреков систематической ошибки в угле наклона.

В первую очередь настраивается соосность микроскопа и системы подсветки.

Кронштейн микроскопа устанавливается по отвесу напротив отверстия в столе для системы подсветки. После этого на кронштейн монтируется оптическая система, и на стол крепится система подсветки.

Лампа в системе подсветки устанавливается так, чтобы центр изображения лампы на поверхности линзы совпадал с центром линзы системы подсветки. Изображение получают при максимально закрытой диафрагме поля зрения без установленного рассеивающего фильтра. Это обеспечивает равномерность и параллельность светового потока, падающего на конденсор.

Далее производится настройка конденсора. Микроскоп фокусируется на диафрагме поля зрения. Положение конденсора относительно системы подсветки выставляется таким образом, чтобы при смещении конденсора по вертикали центр светлого пятна не смещался в плоскости. При смещении конденсора приходится также корректировать положение системы подсветки, чтобы световой поток попадал в объектив микроскопа.

Далее настраивается параллельность оптической оси и направления движения подвижного стола оси Z , требуется установить подвижной стол с точностью ± 5 мрад. Это самая трудоемкая часть работы по настройке микроскопа, она выполняется итерационно. Сначала сканируется определенная область эмульсии, и восстанавливаются базовые треки. Затем эмульсия поворачивается на 180° вокруг оси, перпендикулярной поверхности эмульсии, и повторяется процедура сканирования и восстановления базовых треков на

том же участке. Текущий наклон оси z можно определить по относительному положению (наклону) треков, найденных в обоих сканированиях. После этого корректируется положение стола оси Z, настраивается соосность системы, наклон кронштейна микроскопа выставляется так, чтобы оптическая ось микроскопа была перпендикулярна плоскости стола XY и процедура повторяется, пока не будет достигнута требуемая точность. На рис. 24 показано достигнутое относительное угловое смещение базовых треков при сканировании в двух положениях эмульсии.

Важным этапом настройки аппаратуры является тестовое сканирование для определения переменного порога для бинаризации изображения. Применение переменного порога компенсирует эффект снижения эффективности восстановления кластеров у краев поля зрения. В режиме тестового сканирования производится обработка примерно 1 см² эмульсии, измеряется

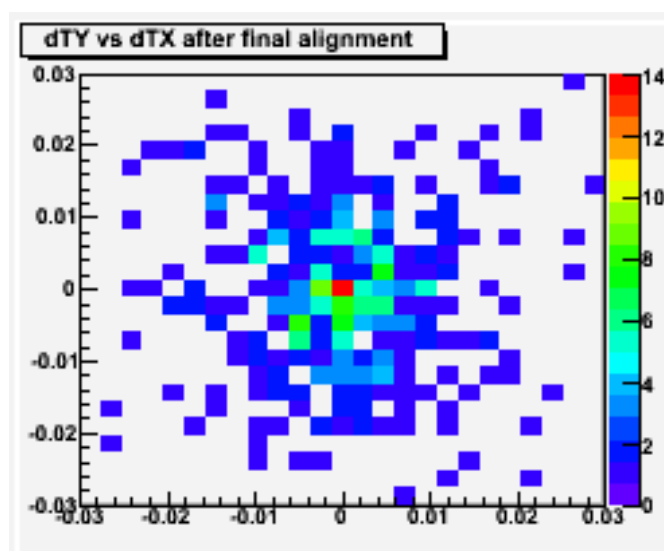


Рис. 24. Угловое отклонение базовых треков, найденных в двух последовательных сканированиях одного участка эмульсии, повернутого на 180°

распределение количества микротреков от положения на поле зрения. По этим данным строится карта выравнивания, представляющая собой матрицу коэффициентов α_{ij} для каждой области 10×10 мкм. Порог бинаризации для каждой области $U_{ij} = \alpha_{ij} U_0$, где U_0 – общий порог. Коэффициенты α_{ij} определяются по количеству реконструированных микротреков в данной области по формуле

$$\alpha_{ij} = \frac{n_{mt\ ij} - n_{mt\ min}}{n_{mt\ max} - n_{mt\ min}} \alpha_0,$$

где $n_{mt ij}$ – количество реконструированных треков в области (i,j) , $n_{mt min}$, $n_{mt max}$ – минимальное и максимальное значение $n_{mt ij}$ на поле зрения, а коэффициент α_0 определяет «силу» коррекции, и подбирается вручную. Когда α_0 слишком маленький коррекция недостаточна, и ближе к краю находится меньше треков, чем в центре, а когда слишком большой – слишком много, т.е. находимые треки включают в себя слишком много фоновых. Распределение количества микротреков по полю зрения без коррекции, и для $\alpha_0 = 0.73$, $\alpha_0=0.78$ и $\alpha_0=0.82$ представлено на рис. 25.

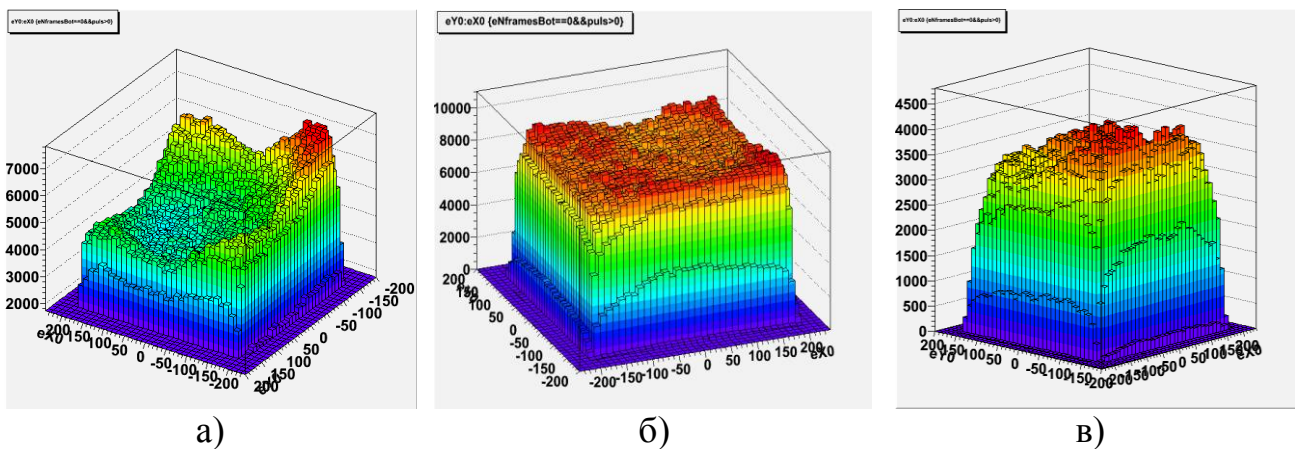


Рис. 25. Распределение количества реконструированных микротреков на поле зрения для разных значений параметра силы коррекции а) $\alpha_0 = 0.64$; б) $\alpha_0=0.74$; в) $\alpha_0=0.80$

Далее производится измерение коррекций.

Коррекция оптических искажений позволяет устранить искривление поля зрения. Она измеряется следующим образом: производится сканирование эмульсии на одной глубине 40×30 полей зрения с шагом 10 мкм. Это означает, что при размере поля зрения $\sim 300 \times 400$ мкм один и тот же участок эмульсии будет отсканирован во всех ячейках размером 10×10 мкм поля зрения. После нахождения кластеров и определения их центров производится вычисление коррекций оптического искажения:

$$\Delta x_{ij} = x_0 - y_{fov ij} + x_{fov 0} - x_{ij},$$

$$\Delta y_{ij} = y_0 - y_{fov ij} + y_{fov 0} - y_{ij},$$

где x_0, y_0 координаты кластера на том поле зрения, где он находился в центральной ячейке (центральная ячейка находится на оптической оси, соответственно искажения в ней минимальны); $x_{fov 0}, y_{fov 0}$ – координаты этого поля зрения; x_{ij}, y_{ij} – координаты того же кластера, найденные на смещенном поле зрения с координатами $x_{fov ij}, y_{fov ij}$.

Карта найденных таким образом коррекций и схема деформации представлены на рис. 26. Коррекция применяется следующим образом: для каждого найденного в процессе обработки кластера определяется, в какой ячейке (i,j) поля зрения он расположен, и его координаты вычисляются по формуле:

$$x_{corr} = x + \Delta x_{ij}$$

$$y_{corr} = y + \Delta y_{ij}$$

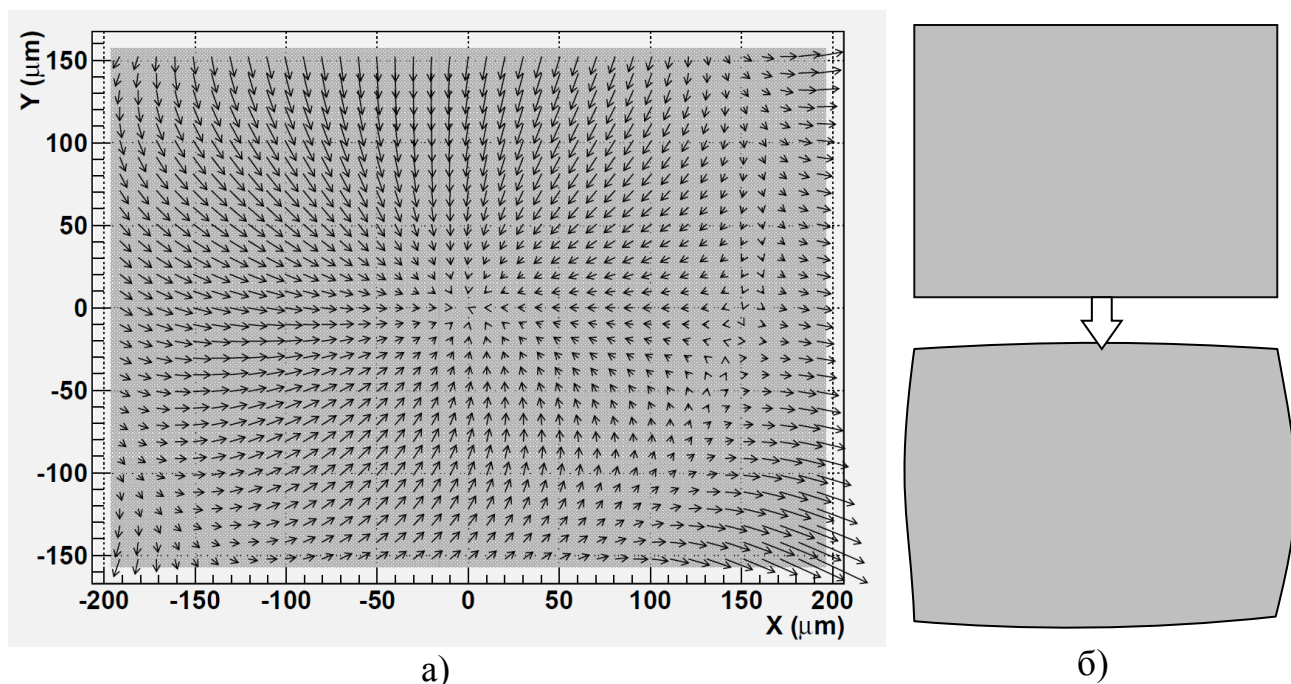


Рис. 26. Оптическая дисторсия изображений. а) карта дисторсий. Стрелками показаны смещения кластеров на поле зрения относительно реального положения в масштабе $\sim 15:1$ б) схема деформации поля зрения. Вверху – изображение на камере, внизу – реально видимая область.

Далее проводится процедура определения коррекции наклона зерен (или т.н. грейнов, от англ. grain, как компьютерное представление зерен кристаллического

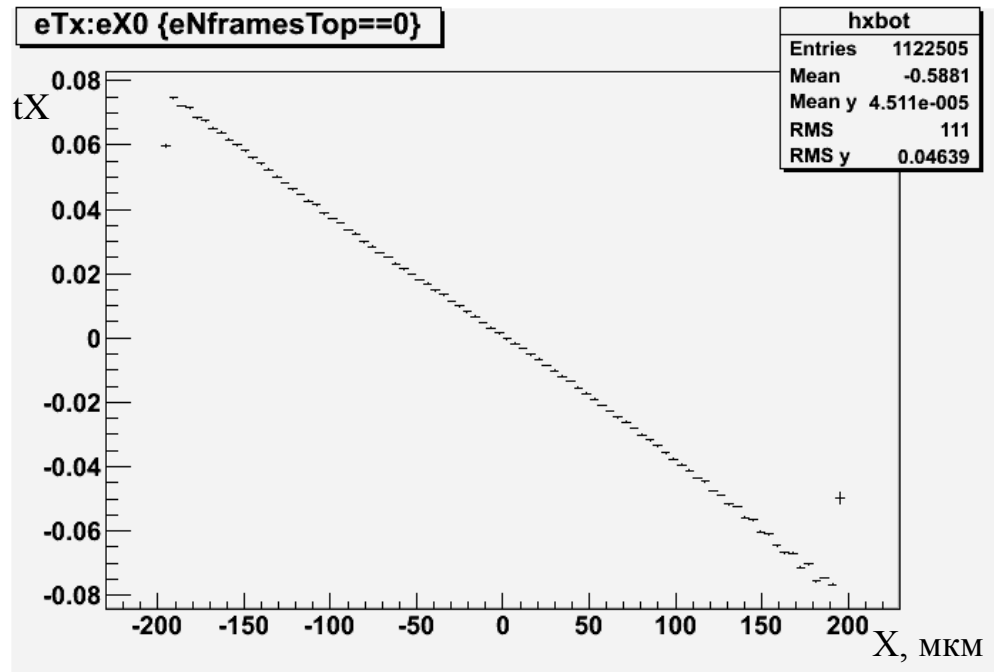
серебра в эмульсии). Каждое реальное зерно за счет конечности глубины фокуса видно, и реконструируется как кластер, на нескольких глубинах. При этом за счет оптических искажений, кластеры, находимые на разных глубинах и соответствующие одному зерну, находятся не вертикально друг под другом, а имеют некоторый систематический наклон, зависящий от положения зерна на поле зрения.

На площади 4 мм^2 эмульсии, отсканированной с мелким (1 мкм) шагом по глубине, реконструируются грейны, после чего зависимость тангенса угла наклона грейнов (t_x, t_y) с осями x и y аппроксимируется линейной зависимостью от координат на поле зрения:

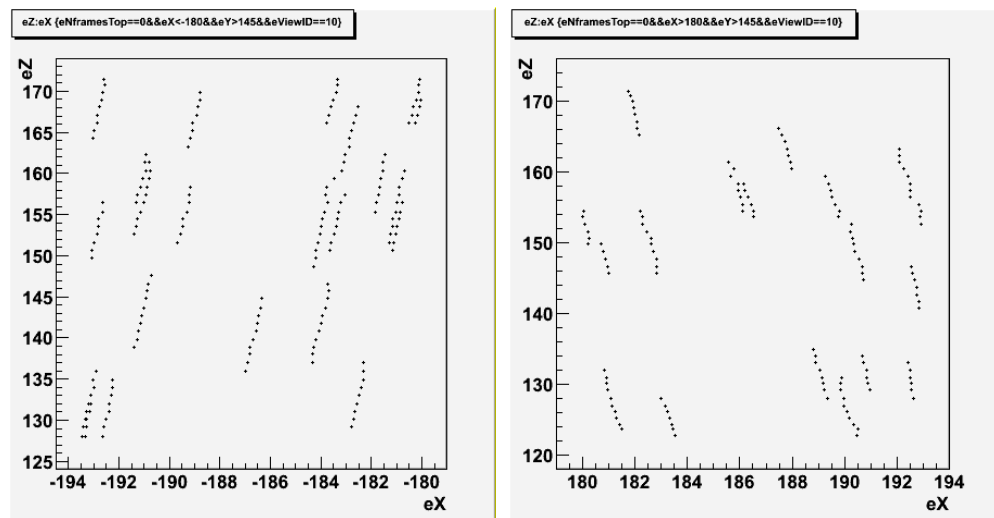
$$\begin{aligned} t_x &= t_{x0} + x k_x \\ t_y &= t_{y0} + y k_y \end{aligned}$$

Эта коррекция учитывается в процедуре поиска грейнов, исключая возможность ошибочной идентификации треков с малым углом наклона как грейнов. На рис. 27, а) представлена зависимость наклона грейнов от положения на поле зрения вдоль оси x . Видно, что здесь уместна линейная аппроксимация. На рис. 27, б) показаны цепочки кластеров, образующих грейны в пространстве.

Далее производится измерение коррекции кривизны фокальной поверхности. На площади 4 см^2 эмульсии, отсканированной с мелким шагом по глубине 1 мкм , реконструируются грейны. При таком мелком шаге, возможно точно определить положение поверхности и среднего нечувствительного слоя эмульсии. Усреднением по ~ 4000 полей зрения можно избавиться от неоднородностей толщины эмульсии и определить форму фокальной поверхности. Она представлена на рис. 28. Матрица коррекций представляет собой набор величин смещения видимого положения кластеров по оси Z от координат на поле зрения. Применение этой коррекции позволяет «выпрямить» поле зрения, улучшая сшивку соседних полей зрения и точность восстановления треков с большим углом наклона.



а)



б)

Рис. 27. Наклон грейнов. а) зависимость тангенса угла наклона грейнов по отношению к оси Z от положения на поле зрения вдоль оси X ; б) цепочки кластеров, образующие грейны, слева и справа поля зрения.

Применение коррекций оптических искажений особенно важно при сканировании в режиме непрерывного движения, в котором смещение кадров относительно друг друга значительно – порядка 10 мкм (см. Главу 6).

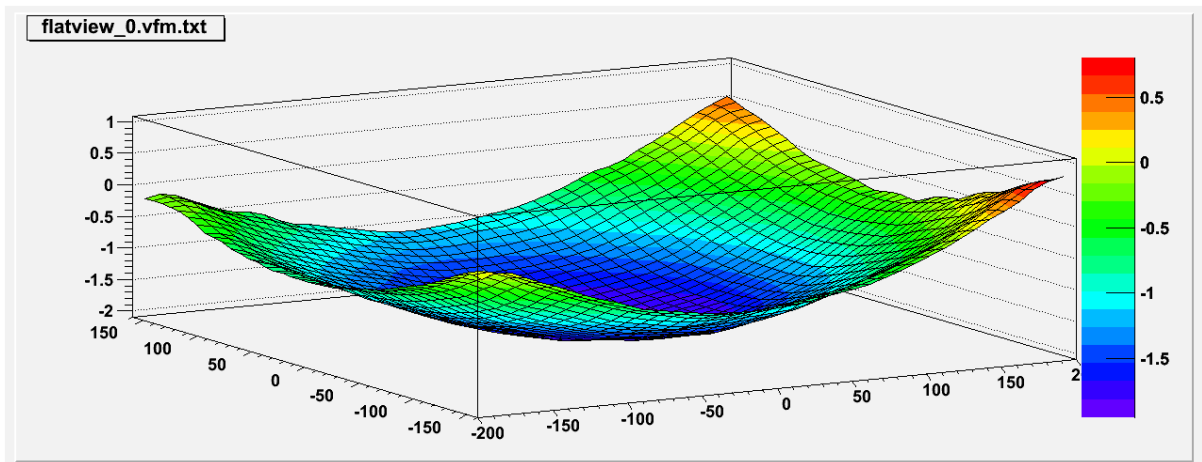


Рис. 28. Форма фокальной поверхности на поле зрения.

Финальным тестом качества настройки системы является сканирование пластин тестового облучения, по которому находится эффективность реконструкции треков. Это обычные пластины ЯФЭ, используемые в эксперименте, которые были облучены пионами с энергией 1 ГэВ под девятью разными углами. На 12 пластинах была отсканирована площадь 1 см^2 . Эффективность находится для всех треков пучка (по угловому кату) по формуле:

$$E = \frac{1}{N} \sum_i \frac{n_{\text{segm } i} - 2}{n_{\text{plate } i} - 2},$$

где N – количество треков, $n_{\text{segm } i}$ – количество базовых треков, из которых состоит i -й трек, $n_{\text{plate } i}$ – количество пластин, которое пересекает i -й трек (от первого до последнего реконструированных в треке базовых треков). Угловое распределение треков, реконструированных в

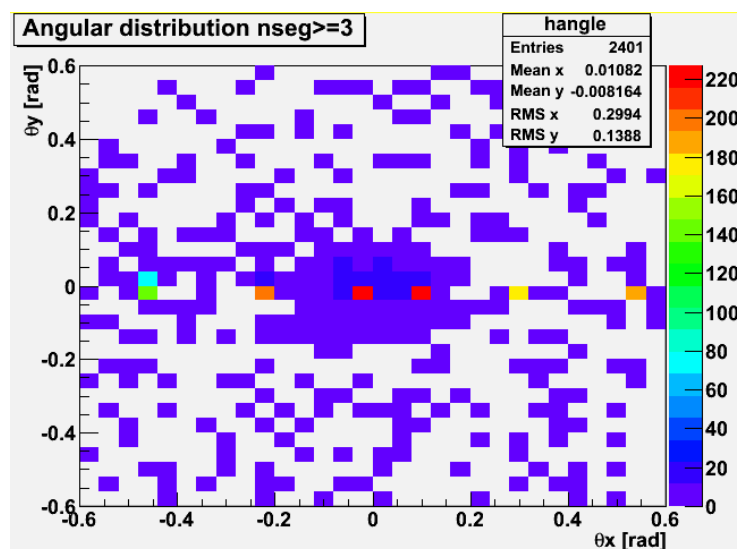


Рис. 29. Угловое распределение треков в тестовых пластинах. Пики соответствуют углам пучка пионов.

тестовых пластинах, показано на рис. 29, распределение эффективности для разных углов на рис. 30. Видно, что средняя эффективность составляет 91.7%.

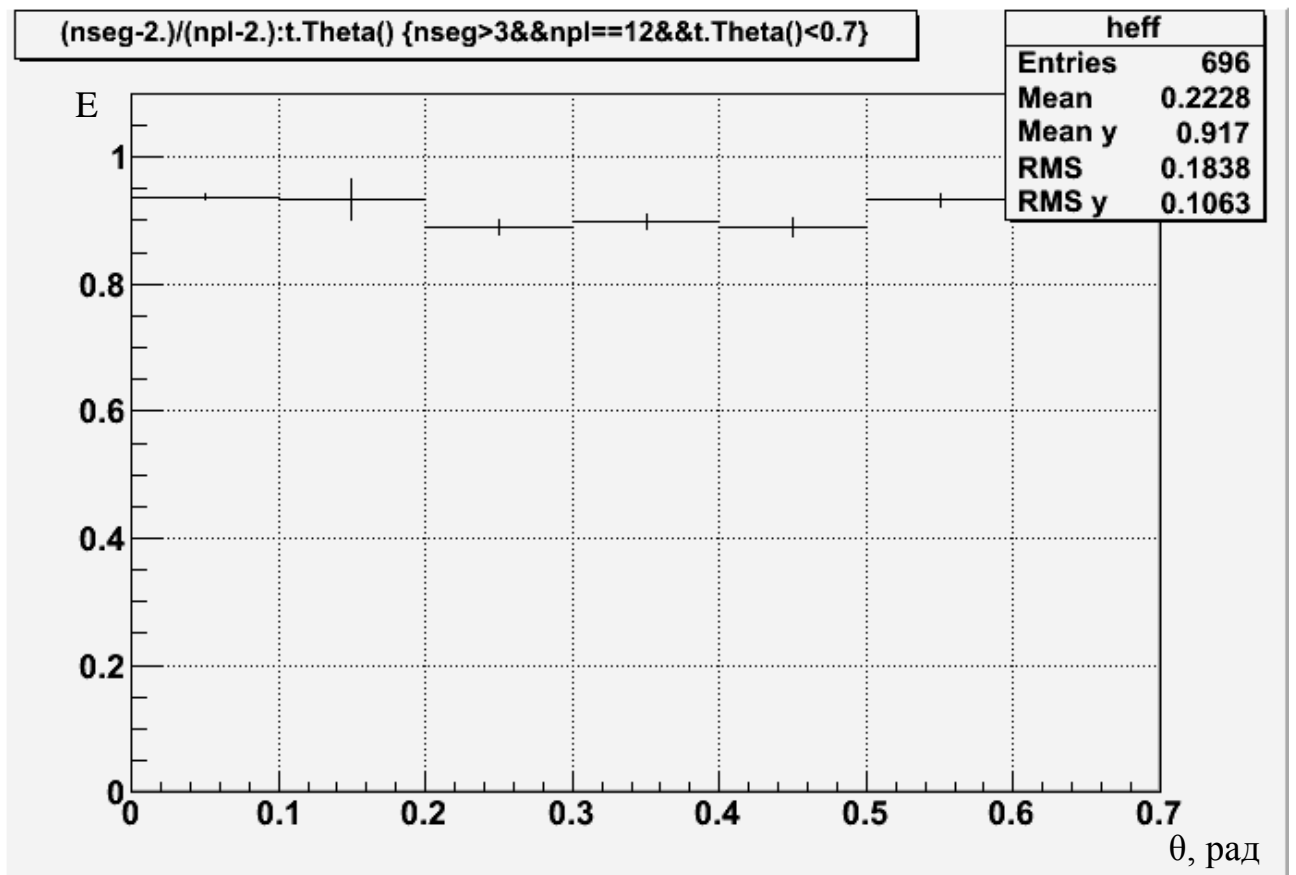


Рис. 30. Распределение эффективности восстановления треков на тестовых пластинах.

Для упрощения процедуры измерения всех коррекций автором был разработан скрипт, производящий в автоматическом режиме весь цикл необходимых сканирований. При этом найденные параметры коррекций извлекаются и применяются на каждом последующем этапе сканирования коррекций. Также сразу производится построение и сохранение в файл всех необходимых гистограмм и графиков, что упрощает последующую визуальную инспекцию.

Программное обеспечение.

Для сканирования и online обработки ядерных фотоэмульсий эксперимента OPERA на ПАВИКОМ используются два набора программного обеспечения.

Первый из них, SySal, разработан группой Национального Института Ядерной Физики г.Салерно. SySal позволяет производить сканирование и реконструкцию микротреков в фотоэмульсии. Максимальная скорость сканирования составляет $20 \text{ см}^2/\text{час}$ [50], при максимальном угле наклона реконструируемых треков 30° . Эффективность реконструкции значительно падает для треков с углом наклона $> 20^\circ$. Программа также позволяет производить ручную проверку найденных треков.

Долгое время SySal являлся единственным программным обеспечением, обеспечивающим нужды сканирования эмульсий эксперимента OPERA. В ФИАН было разработано программное обеспечение PAVICOM, имеющее все необходимое для сканирования эмульсий эксперимента OPERA, одним из разработчиков которого является автор. Главным отличием от SySal является значительно увеличенная скорость сканирования без необходимости замены оборудования и реконструкция треков в диапазоне углов $\theta < 70^\circ$ с высокой эффективностью (89-95%). При этом реконструкция треков с углами до $\theta < 45^\circ$ может производиться в реальном времени, т.е. непосредственно во время сканирования. PAVICOM спроектирован так, чтобы также работать на сканирующих станциях нового поколения (см. главу 6).

Offline обработка выполняется при помощи пакета FEDRA (Framework for Emulsion Data Reconstruction and Analysis) [56]. Этот пакет написан в виде набора библиотек для пакета ROOT. Он позволяет производить весь дальнейший цикл обработки и анализа: реконструировать базовые треки, взаимное расположение эмульсионных пластин в пространстве и треки во всем объеме отсканированных данных, оценивать их импульс, искать вершины распадов, имеется возможность визуализации реконструированных данных (Рис. 31).

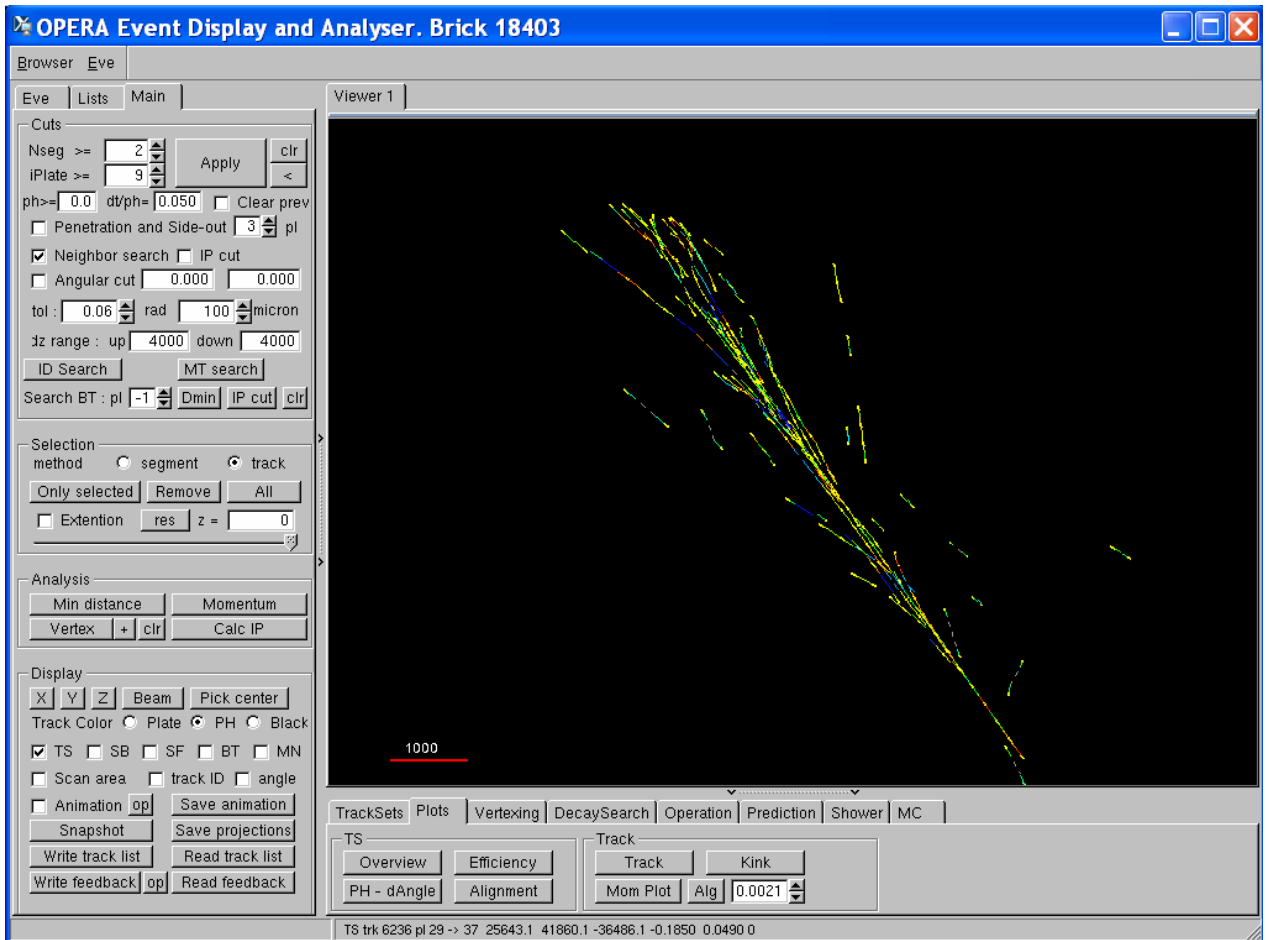


Рис. 31. Снимок экрана при работе с приложением для визуализации реконструированных в ядерной эмульсии событий из пакета FEDRA

Для хранения данных отсканированных в ФИАН событий и синхронизации с центральной базой данных эксперимента используется система управления базами данных ORACLE.

Глава 5. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЯДЕРНО- ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА КОМПЛЕКСЕ ПАВИКОМ

Результаты обработки событий эксперимента OPERA на комплексе ПАВИКОМ.

Подтверждением того, что группа ПАВИКОМ может обрабатывать эмульсионные «кирпичи» эксперимента стала тестовая обработка кирпича, обработанного до этого в Неапольской лаборатории.

Исходными данными для поиска события является набор параметров треков, найденных в сменных пластинах (CS) и согласующихся с предсказаниями электронного детектора ТТ. По этим данными производится поиск соответствующих треков в эмульсионных пластинах «кирпича». Для тестового кирпича №26418 в CS было найдено 8 треков. Их параметры (координаты и тангенсы углов наклона в плоскостях xOz и yOz) представлены в таблице 5.

Таблица 5. Параметры треков найденных в CS

Id	x, мкм	y, мкм	tx	ty
1	3686.35	53618.60	-0.1250	-0.0600
4	17493.43	62767.45	0.6685	-0.1278
5	16869.13	63545.79	0.0746	0.0867
6	17069.55	63590.50	0.1510	0.1200
7	12352.55	63432.73	0.0130	0.1217
8	8666.18	61073.58	0.0196	0.2036
10	15806.87	65965.90	0.1527	0.1636
17	13590.00	52427.38	0.0432	-0.0889

Во время процедуры прослеживания, так называемой ScanBack, эти треки прослеживаются в кирпиче до места остановки (фактически – это место появления, а не остановки, вершина взаимодействия). По исходным данным строится предсказание местоположения трека на последней, 57-й пластине. На

ней производится поиск треков с максимальным отклонением от положения предсказания ± 300 мкм, и ± 50 мрад по углу. После автоматического поиска оператор проверяет результат вручную, и если трек по каким-то причинам не был найден автоматически, или есть неточность в определении его параметров, оператор может провести измерение его параметров и откорректировать результаты автоматического поиска. Если трек на текущей пластине найден, строится предсказание для следующей пластины и процедура повторяется. Если же трек не был найден – предсказание на следующую пластину строится по последнему найденному треку. Процедура повторяется, пока трек не будет обнаружен на трех последовательных пластинах – это означает, что найдена точка остановки трека.

Начиная с 54-й пластины, область поиска сужается до ± 50 мкм. Это обусловлено тем, что 50 мкм – достаточный размер области поиска для нахождения треков со значительным кулоновским рассеянием при точности привязки системы координат между пластины по боковым меткам 10 мкм. Однако, при переходе от CS к пластинам кирпича проходимость частицами расстояние больше, поэтому появляется большее перерассеяние, а точность привязки координат по X-меткам меньше и для перехода от CS к пластинам кирпича требуется увеличить область поиска до ± 300 мкм.

В таблице 6 показано, на каких пластинах находятся найденные точки остановки треков в процедуре ScanBack.

Фактически треки 4,6,8,10 – не были найдены в эмульсиях кирпича. В точке остановки трек мюона (№7) имел координаты $x=12443$ мкм, $y=57061$ мкм, и углы наклона $t_x=0.002350$, $t_y=0.128687$. Вокруг этой точки производилось сканирование большой площади – 1 см^2 на 15 пластинах вокруг предполагаемой вершины взаимодействия нейтрино. Это процедура «объемного сканирования», т.н. Volume Scan, или Total Scan. При этой процедуре восстанавливаются все треки в отсканированном объеме, и

производится поиск вершины взаимодействия. В найденном объеме найдено 325 треков, из них 255 включают больше трех базовых треков. Эффективность реконструкции треков представлена на рис. 32.

Таблица 6

Id	№ пластины
1	29
4	57
5	53
6	56
7	19
8	-
10	57
17	19

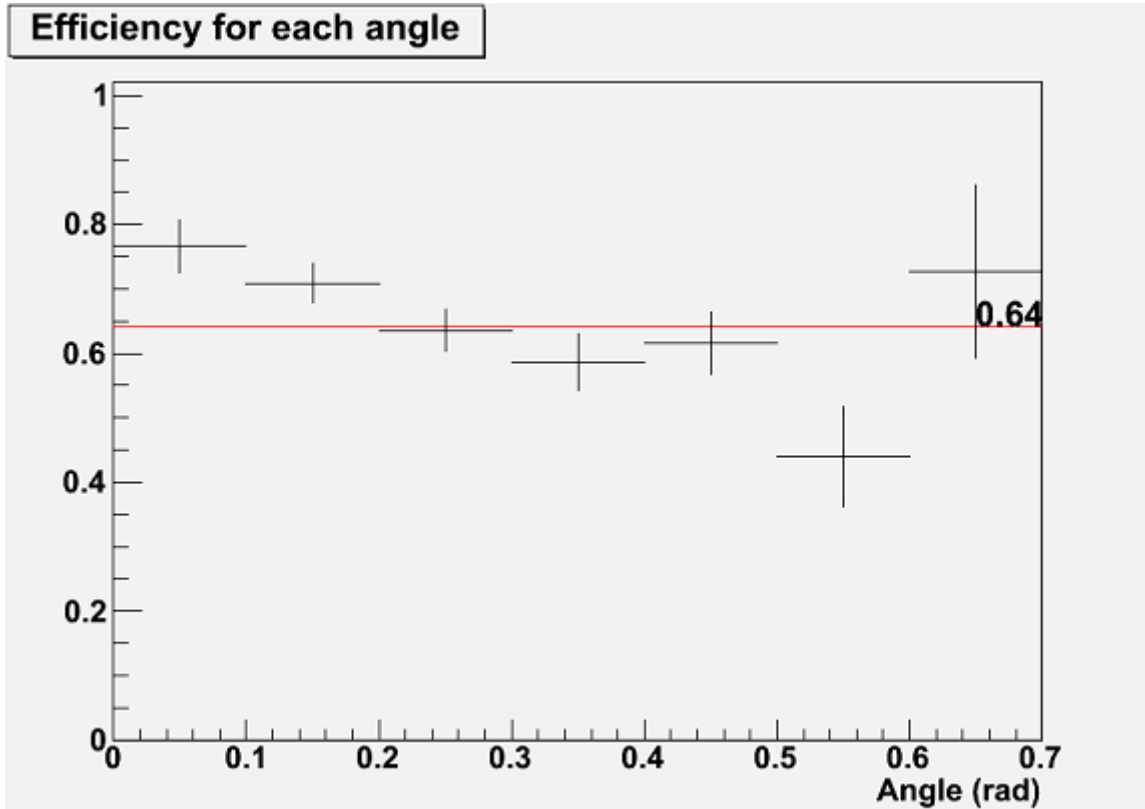


Рис. 32. Эффективность реконструкции треков тестового кирпича

Далее производился поиск вершины, т.е. определялась точка пересечения нескольких треков. Была найдена вершина с тремя треками на расстоянии 368 мкм от 19-й пластины. В таблице 7 указаны параметры (углы наклона у вершины) треков и минимальное расстояние до вершины.

Таблица 7. Параметры треков возле вершины взаимодействия

Id	Tx, мрад	Ty, мрад	Прицельный параметр, мкм
17	0.0219	-0.0875	0.17
1	-0.1874	-0.0458	1.35
7	-0.3373	-0.2227	2.34

Далее производился поиск распада. При этом в автоматическом режиме во всем объеме ищутся все треки с прицельным параметром к вершине меньше чем 300 мкм. Было обнаружено еще 3 трека, два из которых e^+e^- пара от γ -конверсии. Для всех треков, найденных автоматически, производится ручная проверка и измерение углов и координат на ближайшей к вершине пластине. Таким образом проверяется, не продолжается ли трек дальше вершины и, соответственно, относится ли он к этому взаимодействию. Измерение параметров трека позволяет уточнить положение вершины и прицельные параметры треков, и соответственно, обнаружить есть ли в событии больше одной вершины взаимодействия.

Как было показано во введении, по параметрам множественного перерасеяния частицы в эмульсии можно оценить импульс частицы. При этом можно использовать как координатное смещение трека от пластины к пластине, так и угловое. Поскольку точность измерения относительных координат базовых треков в процедуре Scan Back определяется точностью измерения боковых меток, определение импульса по координатному смещению невозможно. В коллаборации была разработана специальная процедура определения импульса частицы по смещениям угловых координат от пластины к пластине, и при этом учитывающая все возможные комбинации пластин, для

которых рассчитывается смещение [57]. Это позволяет определять импульс частиц с энергией порядка нескольких ГэВ с высокой точностью по данным всего 10-20 пластин. На рис. 33. показаны графики координат треков 1, 7, 17 и 5. В таблице 8 представлены параметры треков, импульс, определенный по множественному кулоновскому рассеянию, а также, где это возможно, тип частицы.

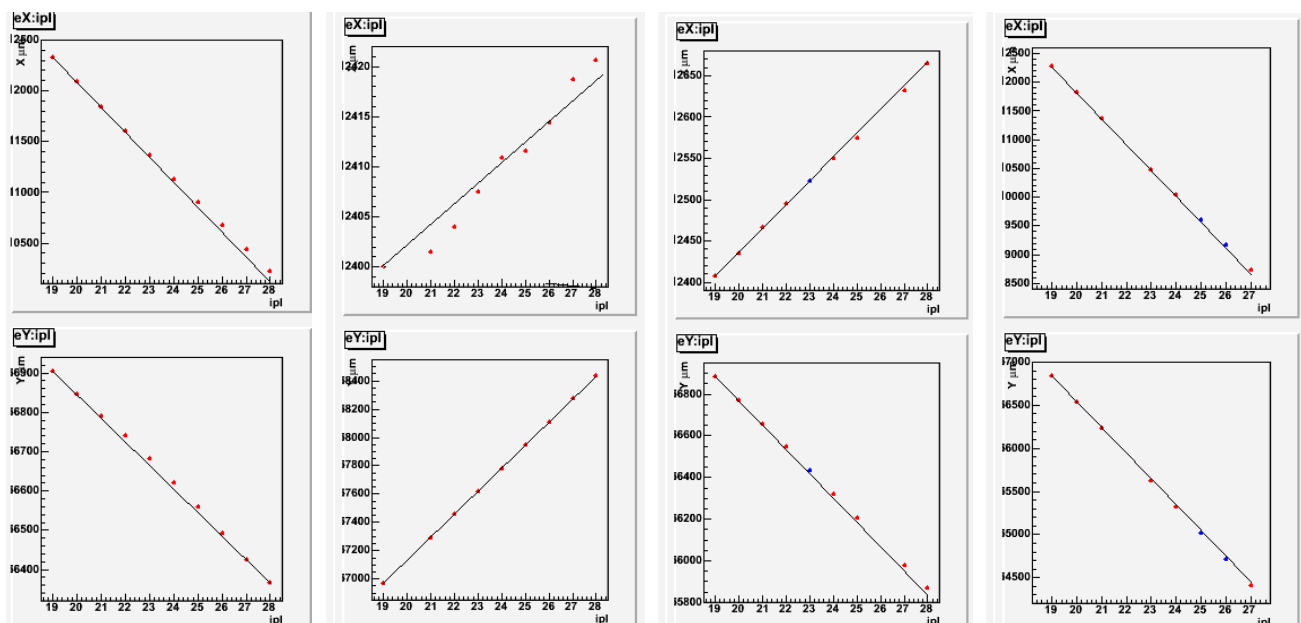


Рис. 33. Координаты X , Y треков (слева направо) 1, 7, 17 и 5 в зависимости от номера пластины.

Таблица 8. Параметры треков

Id	Приц. параметр (мкм)	Импульс (ГэВ)	Минимальная оценка импульса (ГэВ)	Максимальная оценка импульса (ГэВ)	Тип частицы
7	1.2	3,8	2,8	6,0	мюон
1	1.1	1,6	1,3	2,1	Не идентифицирован
17	0,8	2,9	2,2	4,5	Не идентифицирован
5	2.2	-	-	-	Не идентифицирован
152, 153	127	-	-	-	Гамма (e^+e^- пара)

Здесь следует указать, что для идентификации частиц по их трекам в эмульсии необходимы калибровочные данные. Были выполнены исследования характеристик эмульсий с целью разработки критериев идентификации частиц, основанные на том, что параметры зерен возникших в эмульсии после прохождения частиц разного типа, отличаются [58]. Однако практическое применение этого метода сильно осложняется различием в качестве эмульсионных пластин, разницей в технологии процесса проявки, а также естественным "рассасыванием" зерен со временем, прошедшим с момента прохождения частицы до проявки. Поэтому мюон идентифицируется по данным электронного детектора и мюонного спектрометра, электрон и гамма-квант, а, соответственно, и π^0 по электромагнитным ливням, тау-лептон и чармированные адроны – по характерной топологии распада и кинематическим характеристикам. Для большинства событий, где есть явно только одна вершина взаимодействия с мюоном, подробный анализ не производится, конечными данными является только пространственная геометрия события и типы частиц, определенные косвенно.

Полученные результаты по обработке тестового события были сверены с результатом лаборатории Неаполя, где этот кирпич был обработан. Для треков 1, 7, 17, 5 было получено полное совпадение. Треки 152, 153 (электрон-позитронная пара от гамма-конверсии) не были реконструированы в этой лаборатории. На рис. 34 показаны проекции события на оси Y, X, Z а также вершина события.

Все отсканированные данные вместе с файлом геометрии события размещаются в локальной базе данных, которая синхронизируется с центральной базой данных эксперимента.

Успешная обработка этого кирпича подтвердила возможность полноценного участия ФИАН в обработке эмульсионных данных эксперимента OPERA.

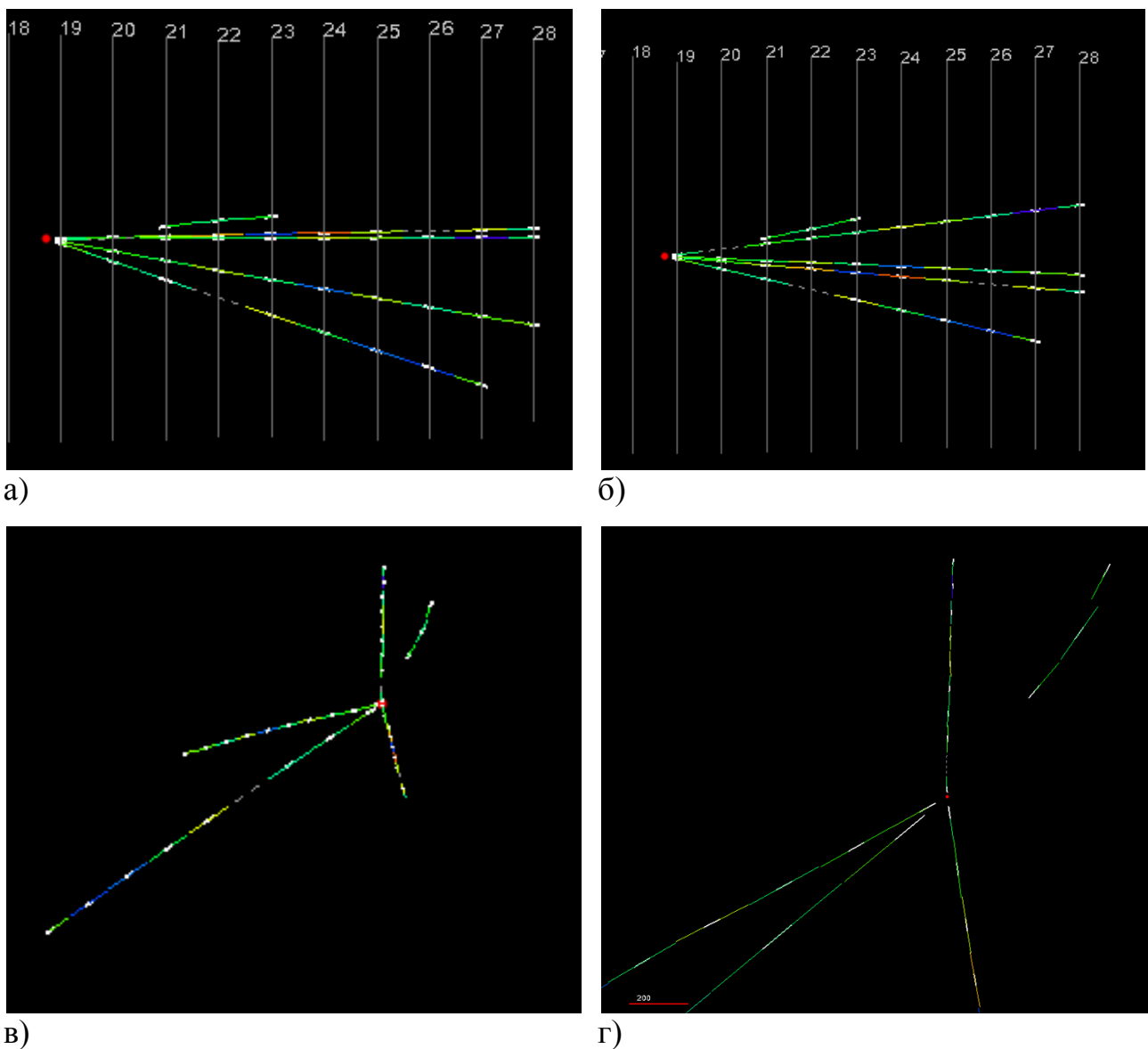


Рис. 34. Первое тестовое события, обработанное в ФИАН. а) проекция на оси X-Z б) проекция на оси Y-Z в) проекция на оси X-Y г) Вид на вершину против направлению пучка. Трек в правом верхнем углу соответствует электрон-позитронной паре от гамма-конверсии.

На данный момент в ФИАН полностью завершена обработка еще десяти эмульсионных кирпичей, руководство которой осуществлялось автором. В таблице 9 показана краткая информация по результатам обработки.

Еще в четырех кирпичях была произведена процедура ScanBack и найдена точка остановки треков предсказания, и выполняются последующие процедуры.

Таблица 9. Результат обработки кирпичей эксперимента OPERA на ПАВИКОМ

№	Id Кирпича	результат	Пластина вершины	Тип события	Количество треков в вершине
1	131533	Реконструировано, одна вершина	19	Событие по заряженному току	4, в т.ч. мюон
2	101912	Реконструировано, одна вершина	34	Событие по заряженному току	2, в т.ч. мюон
3	118999	Реконструировано, одна вершина	43	Событие по заряженному току	3, в т.ч. мюон
4	18403	Реконструировано, первичная вершина не найдена	26	Событие по нейтральному току	1, электромагнитный ливень от гамма-конверсии
5	131645	Реконструировано, одна вершина	49	Событие по нейтральному току	9
6	40938	Реконструировано, одна вершина	48	Событие по нейтральному току	4
7	103803	Событие не найдено в кирпиче (треки предсказания обнаружены но проходят насквозь)	нет	Событие по нейтральному току	
8	3625	Событие не найдено в кирпиче (треки предсказания обнаружены но проходят насквозь)	нет	Событие по заряженному току	
9	135384	Обработка невозможна			
10	58368	Обработка невозможна			

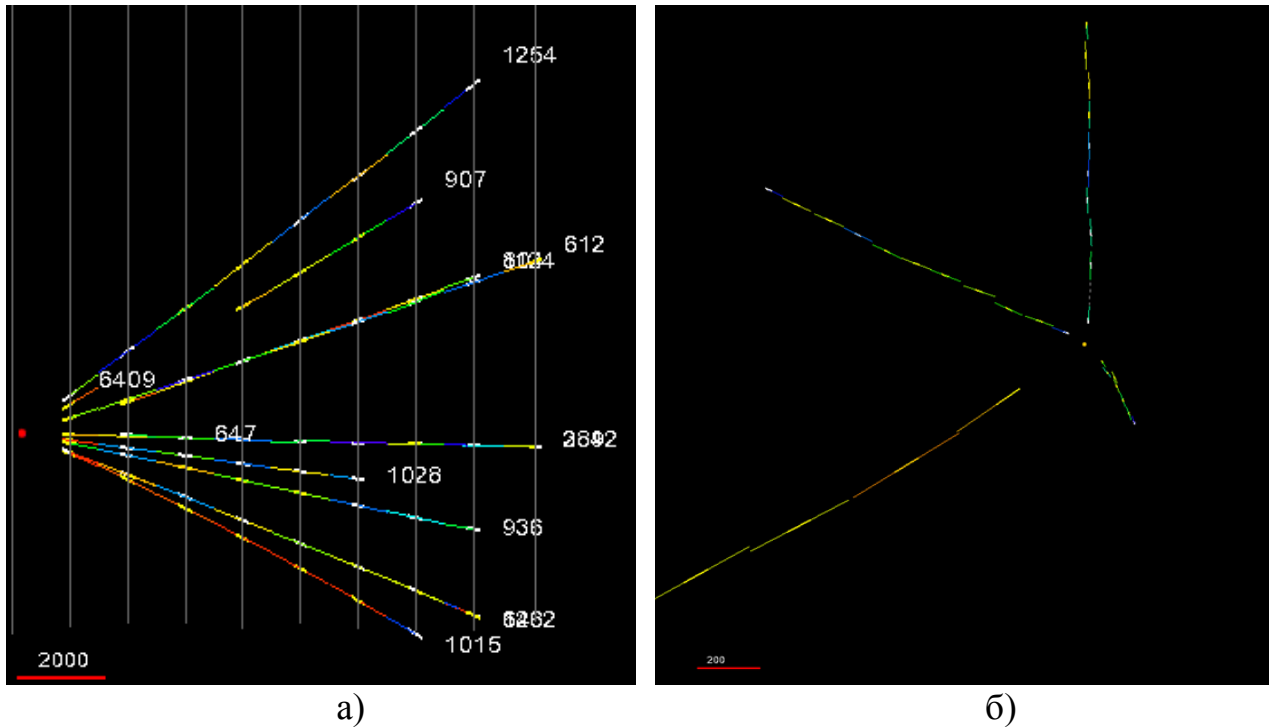


Рис. 35. Треки реконструированных событий: а) кирпич 131645; б) кирпич 131533

На рис. 35 приведено несколько проекций реконструированных треков событий.

Недавно в коллаборации была внедрена новая процедура, заменяющая процедуру прослеживания Scan Back – так называемый объемный Scan Back (VSB, Volume Scan Back). При этом исключается ручная проверка треков, что соответственно не требует опыта визуального определения треков оператором, и обработка значительно ускоряется. Эта процедура аналогична процедуре объемного сканирования Total Scan вокруг вершины события, однако захватывает только небольшую площадь вокруг прослеживаемых треков предсказания с CS.

Для всех предсказанных треков сразу производится в автоматическом режиме сканирование площади 0.4 см^2 вокруг трека на 20 пластинах, и восстанавливаются базовые треки без восстановления относительного расположения пластин. Данные анализируются программой просмотра и

анализа EDA (Emulsion Display and Analysis) входящей в состав пакета FEDRA. Если обнаружено, что треки проходят насквозь через отсканированную область – процедура продолжается для следующих 10 пластин, и так далее. Когда найдена точка остановки треков – производится ручная проверка аналогичная обычному Scan Back, и в случае подтверждения остановки – объемное сканирование вокруг предполагаемой вершины.

Массовое сканирование организовано в порядке смен по 4 часа, в сканировании задействовано 6 человек (два аспиранта и 4 студента старших курсов). Ведется журнал работы, в котором указывается оператор, время работы, сделанная работа по сканированию (Scan Back, Объемное сканирование, ручная проверка, тестовые измерения), и предмет изучения (номер кирпича или другая исследуемая эмульсия). Также отдельно записываются все действия относительно каждого кирпича, с указанием даты, сделанной работы, и использованных параметров обработки. Это позволяет контролировать эффективность работы, стабильность работы оборудования и уровень квалификации операторов.

Проект ОЛИМПИА

Проект ОЛИМПИА. Весьма важной ПАВИКОМовской работой является проект ОЛИМПИА (ОЛИвины из Метеоритов – Поиск тяжелых И сверхтяжелых Ядер) – поиск тяжелых и сверхтяжелых ядер в природе. Эта проблема связана с вопросом о существовании островов стабильности в Периодической системе элементов. В.Л.Гинзбург считал проблему поиска сверхтяжелых ядер в природе одной из самых важных для физики XXI в. и включил ее в свой знаменитый список первоочередных задач. По инициативе

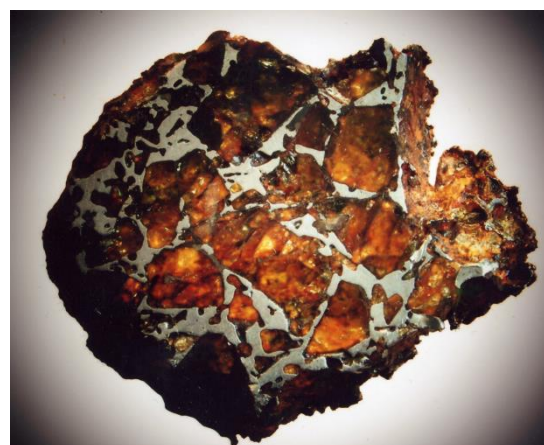


Рис. 36. Кристаллы оливина в железо-никелевом метеорите

В.Л.Гинзбурга в ФИАНе начали заниматься поиском следов тяжелых и сверхтяжелых ядер в кристаллах оливинов из метеоритов [23], рис. 36. Работа выполняется вместе с сотрудниками ГЕОХИ им. Вернадского, при поддержке и во взаимодействии с Лабораторией ядерных реакций ОИЯИ.

В 1869 г. Д.И.Менделеев сформировал Периодическую систему элементов, внеся в нее 63 известных к тому времени элементов. Периодичность изменения химических свойств отражает периодичность заполнения электронных оболочек атома. Создание таблицы позволило предсказать и открыть галлий (1875 г.), скандий (1879 г.), германий (1886 г.). В 2009 г. официальные границы были продлены до 114 элемента, сейчас сертифицированы 114 (флеровий) и 116 (ливверморий) элементов, а в ускорительных экспериментах уже получены первые ядра 118 элемента. Сколько элементов содержится всего в таблице? Где ее граница? Чем больше заряд ядра, т.е. чем больше порядковый номер элемента, тем сильнее притягиваются к ядру внутренние электроны. В конечном итоге должен наступить момент, когда они начнут захватываться ядром. Первые расчеты показывали, что при порядковом номере элемента больше чем 170-180 элементы существовать не могут – поглощение отрицательно заряженного электрона уменьшает заряд ядра. Однако последующее развитие физики показало, что границу таблицы определяет не нестабильность электронной оболочки атома, а нестабильность ядра – источника электрического поля, в котором формируются электронные оболочки. Наиболее стабильны ядра, содержащие т.н. магическое число нейтронов или протонов (2, 8, 20, 50, 82, 126). Как и атомные электроны, нуклоны в ядрах образуют оболочки. По мере увеличения частиц в ядре происходит последовательное заполнение оболочек. Подобно тому, как в периодической системе наиболее стабильны инертные газы, наиболее стабильны те ядра, у которых полностью застроены нейтронные и протонные оболочки. Таким замкнутым оболочкам как раз и соответствуют магические числа (кальций, олово, свинец). Вопрос о существовании сверхтяжелых ядер имеет важнейшее значение для понимания свойств ядерной материи. Прежде

всего, представляет интерес проверка предсказания [59] значительного увеличения стабильности ядер вблизи магических чисел $Z = 114$ и $N = 184$ (N – число нейтронов), которое могло бы приводить к существованию в этой области "островов стабильности" сверхтяжелых ядер.

В трансурановых ядрах даже ядерные силы притяжения с трудом сдерживают огромные электростатические силы отталкивания между протонами. Поэтому чем больше порядковый номер ядра, тем меньше его время жизни. Плутоний-244 живет 100 млн лет, калифорний-250 около 10 лет, фермий-252 живет 20 часов. Виноват альфа-распад и спонтанное деление. Чем тяжелее ядро, тем больше роль деления. Ядро урана ($Z=92$) – самое «тяжелое» из найденных на Земле. Следующие ядра были синтезированы искусственно.

Теория предсказывает, что элемент с зарядом 110 и атомной массой 294 должен жить сто миллионов (а может и миллиард) лет. Но, если изменить число нейтронов или протонов на 2-3 единицы, т.е. всего на 1%, то время жизни должно уменьшиться в 10 млн раз. Такой эффект наблюдается, например, у дважды магического ядра свинца: 82 протона и 126 нейтрона. Этот свинец-208 настолько стабилен, что никто еще не наблюдал его распад. Но свинец со 127 нейтронами распадается за 3.3 часа.

Вполне понятен научный интерес к определению границы Периодической системы, но зачем нужны искусственные сверхтяжелые элементы?

Самым «работающим» из всех синтезированных элементов оказался плутоний-239. В ядерных реакторах сжигают уран-235, которого содержится всего 0.7% в природном уране, а основную массу составляет уран-238, который не является ядерным горючим. В реакторах на быстрых нейтронах после сгорания 1 кг урана-238 получается 1.6 кг плутония-239, который является ядерным горючим лучшего качества, чем уран-235. В настоящее время применение синтетических элементов огромно, это и космос, и медицина, др. Их производство выросло с миллиардных долей грамма до многих килограммов и даже тонн.

Предсказания теории говорят о том, что за ураном должны существовать т.н. острова стабильности сверхтяжелых элементов. Именно поэтому работы по искусственному синтезу сверхтяжелых элементов продолжались всегда.

Измерение потоков и спектров тяжелых и сверхтяжелых ядер в космических лучах является эффективным способом изучения состава частиц, ускоряемых в источниках космических лучей, процессов, происходящих как в самих источниках, так и в галактическом пространстве, в котором распространяются космические лучи, и моделей удержания космических лучей в галактике. Г.Н.Флеров, предложивший рассматривать метеорит как естественный детектор космических лучей, сделал оценку, что, при возрасте метеорита сотни миллионов лет исследование 1 см^3 его вещества эквивалентно проведению эксперимента с тонной фотоэмульсии в космосе в течение года. 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. При поиске реликтовых треков, оставленных частицами космических лучей в минералах, входящих в состав некоторых метеоритов, используется способность силикатных кристаллов, входящих в состав метеоритов (оливинов, пироксенов), регистрировать и сохранять в течение длительного времени ($>10^8$ лет) треки ядер с $Z > 20$. Типичный возраст метеоритов и, следовательно, время их экспозиции в потоке космических лучей оценивается как 10^7 - 10^9 лет. Поэтому они могут содержать большое число треков космических ядер. Как показывают оценки, в 1 см^3 таких кристаллов, расположенных на глубине <5 см от доатмосферной поверхности метеорита, за 10^8 лет может быть образовано 10^2 - 10^3 треков ядер с $Z > 90$, а в кристаллах из поверхностных участков метеорита (глубина < 1 см) до 10^4 треков. Измеряя параметры треков, можно не только идентифицировать частицы, но и определить их энергетические спектры. Метеориты класса палласиты состоят из железо-никелевой "матрицы", в объеме которой имеются включения кристаллов оливина – полупрозрачного минерала

жёлтого цвета размером до 1-2 см. Как и предыдущие работы с оливинами, эксперимент ОЛИМПИА основан на использовании метода твердотельных трековых детекторов, в котором частицы регистрируются по производимым ими радиационным повреждениям в объеме материала детектора.

Исследуются образцы двух метеоритов: «Марьялахти» – 185 млн. лет и «Игл стейшен» – 300 млн. лет. Оба этих метеорита – паласситы. Разработанная в проекте ОЛИМПИА методика впервые позволяет просматривать весь объем кристалла, и тем самым существенно увеличивать статистику обработанных треков.

С помощью разработанного автором модуля для программного комплекса PAVICOM производится поиск и измерение геометрических параметров треков в оливине на установках ПАВИКОМ-2 и ПАВИКОМ-3, а также сканирование объема кристалла для архива. Описание структуры модуля дано в разделе «Программное обеспечение для обработки данных проекта ОЛИМПИА». Также под руководством автора была создана программа для построения карты кристалла по отсканированным изображениям.

Основная задача проекта ОЛИМПИА заключается в определении зарядового состава космических лучей в области тяжёлых и сверхтяжёлых ядер. Величина заряда связана с характеристиками протравленного трека. Основной из них является травимая длина $L_{тр}$, однако, для очень тяжёлых ядер, она превышает размеры образцов оливина. Для выхода из создавшегося положения было предложено использовать дополнительную величину – скорость травления. Эта величина меняется во время травления и растёт по мере приближения к точке останова частицы [60, 61].

Обработано примерно 170 кристаллов, размеры кристаллов – не более 2 мм. Уже получено зарядовое распределение около 6000 ядер галактических космических лучей с зарядом больше, чем 55. Отношение распространённости ядер с $Z \geq 88$ к распространённости ядер с $74 \leq Z \leq 87$ равно $0,045 \pm 0,015$ (Марьялахти) и $0,025 \pm 0,02$ (Игл Стейшн). Эти величины несколько больше, чем в эксперименте UHCRE ($0,0147 \pm 0,0032$) [62], но хорошо согласуются с

данными экспериментов TREK, HEAO и Ariel [63]. Но в зарядовом распределении ОЛИМПИИ, полученном при обработке детекторов со временем наблюдения 185 – 300 млн лет, присутствуют намного более тяжелые ядра [64].

В начале 2010 года в ходе выполнения проекта ОЛИМПИЯ обнаружены три сверхдлинных ($L_{\text{etch}} > 700$ мкм) трека, скорость травления которых $V_{\text{etch}} > 35$ мкм/час. Если учесть, что экспериментально измеренная максимальная величина скорости травления треков в оливине для ядер урана перед их остановкой равна $V_{\text{etch, U}} = 26 \pm 1$ мкм/час, становится ясно, что заряды этих ядер существенно превышают $Z = 92$. Так как в этой области зарядов функция $Z(\text{RR}, V_{\text{etch}})$ неизвестна (RR – остаточная длина пробега), для оценки заряда трансурановых ядер в первом приближении произведена экстраполяция функции $Z(\text{RR}, V_{\text{tr}})$ ядер, для которых имеются экспериментальные данные калибровочных измерений. 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 [65]. Выполненный регрессионный анализ позволил уточнить оценку заряда одного из трех ядер – он равен 119^{+10}_{-6} с вероятностью 95% (Рис. 37). Именно такие ядра должны образовывать острова стабильности, их обнаружение в природе подтверждает справедливость теоретических предсказаний и оправдывает усилия по их синтезу в земных условиях.

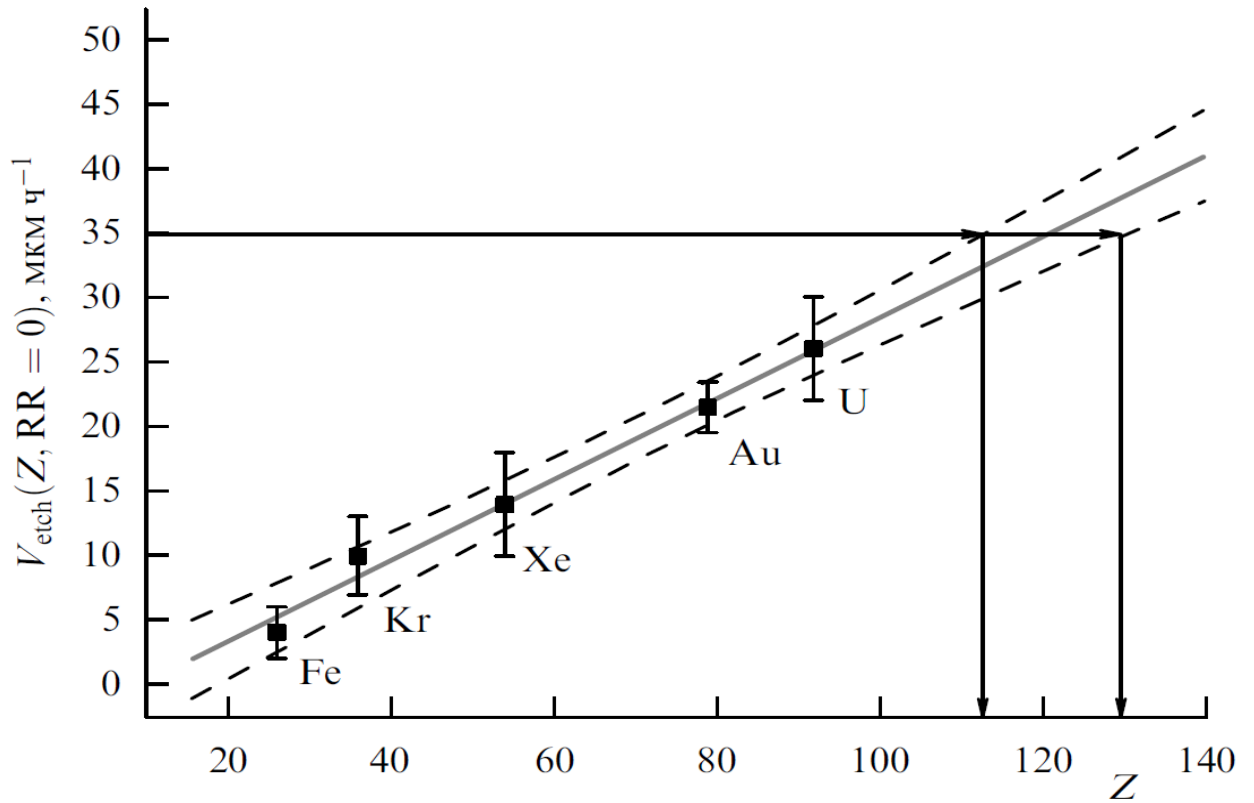


Рис. 37. Результат оценки заряда одного из трех ультратяжелых ядер на основе регрессионного анализа: на уровне достоверности 95% заряд ядра оставившего трек, имеющий скорость травления вблизи точки остановки 35 мкм ч^{-1} , равен $Z=119 (+10, -6)$.

Глава 6. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Требования к сканирующим системам нового поколения

Современные эмульсионные эксперименты используют огромное количество ядерной фотоэмульсии. Например, как было упомянуто выше, эксперимент OPERA использует $100\,000\text{ м}^2$ ЯФЭ. Эксперименты по мюонной радиографии используют несколько квадратных метров эмульсии, но в отличие от эксперимента OPERA требуют обработки всей площади эмульсии с целью накопления статистики угловых распределений треков мюонов. Своевременная обработка такого количества фотоэмульсии требует от автоматических сканирующих систем повышения скорости сканирования, производства максимального количества этапов обработки в режиме реального времени.

Развитие сканирующих систем может идти двумя путями. В первом случае это разработка специализированного оборудования, позволяющего значительно увеличить поле зрения, полностью исключить движение по вертикали, используя наклонное поле зрения, которое захватывает всю глубину эмульсионного слоя. При этом требуются значительные затраты на разработку такого оптического и механического оборудования и программного обеспечения для управления этим оборудованием и обработки данных наклонных полей зрения, с учетом кривизны фокальной поверхности. Также в этом случае значительно усложняется калибровка системы. Такой подход практически невозможен для массовой комплектации лабораторий.

Другой подход заключается в использовании доступного промышленного оборудования, для которого уже есть разработанные драйверы, значительной оптимизации алгоритмов движения и обработки данных, использование системы распределенных вычислений и промышленно доступных высокопроизводительных систем, таких как FPGA и GPGPU. FPGA (Field-

programmable gate array) – Программируемая пользователем вентиляционная матрица, ППВМ — полупроводниковое устройство, которое может быть сконфигурировано производителем или разработчиком после изготовления. ППВМ программируются путём изменения логики работы принципиальной схемы, например, с помощью исходного кода на языке проектирования, на котором можно описать эту логику работы микросхемы. ППВМ является одной из архитектурных разновидностей программируемых логических интегральных схем. GPGPU (General-purpose graphics processing units) — «GPU общего назначения» — техника использования графического процессора видеокарты, который обычно имеет дело с вычислениями только для компьютерной графики, чтобы выполнять расчёты в приложениях для общих вычислений, которые обычно проводит центральный процессор. Именно такой подход был выбран для ЕСС нового поколения: повышение скорости сканирования оптимизацией программного обеспечения при минимальной модификации оборудования доступными на рынке элементами.

К современному программному обеспечению для автоматизации измерений на комплексах предъявляются весьма жесткие требования. Это связано, в первую очередь, с необходимостью проводить измерения с максимальной возможной скоростью. 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), например для отслеживания поверхности эмульсии и корректировки области сканирования. Использование распределенных вычислений делает систему сканирования масштабируемой, позволяя выполнять различные подзадачи на специализированных узлах сети,

там самым освобождая ресурсы рабочей станции, контролирующей сканирование.

Программный комплекс PAVICOM

Для обработки данных на комплексе ПАВИКОМ был разработан специальный пакет программ PAVICOM. Он позволяет в полностью автоматизированном режиме осуществлять поиск и оцифровку координат треков заряженных частиц в материале детектора; распознавать и проследивать треки с помощью ЭВМ; систематизировать и производить первичную обработку данных. При сканировании детекторов на установках, входящих в состав ПАВИКОМ, в автоматическом режиме выполняются следующие действия:

1. Перемещение стола и контроль положения фокуса объектива:
 - Изменение поля зрения, т.е. перемещение стола в плоскости, перпендикулярной оптической оси микроскопа;
 - Изменение положения фокальной плоскости, т.е. перемещение объектива вдоль оптической оси;
 - Считывание координат стола.
2. Работа с видеоизображением:
 - вывод на экран изображения поля зрения микроскопа с помощью видеокамеры;
 - наложение графического указателя на экран;
 - считывание с экрана координат нужного пикселя поля зрения;
 - наложение графических символов на экран.
3. Оцифровка изображения и распознавание образов:
 - аналого-цифровая конвертация изображения;
 - сохранение оцифрованного изображения;
 - обработка изображений (фильтрация, бинаризация, и т.д.);
 - распознавание образов, т.е. определение пространственных характеристик и анализ формы трека.

Универсальность комплекса ПАВИКОМ предъявляет к программному обеспечению ещё большие требования. Поскольку на комплексе обрабатываются различные детекторы, программное обеспечение должно быть

независимым от конкретного представления треков (цепочки зерен металлического серебра в ЯФЭ, конусы травления в образце и т.п.), а применение в обработке данных различных экспериментов требует независимости от моделей обрабатываемых данных (треки с одной общей вершиной в EMU-15, сложные цепочки распадов в OPERA, накопление статистики треков мюонов в экспериментах по мюонной радиографии).

Оборудование автоматизированных комплексов постоянно совершенствуется и, время от времени, возникает необходимость замены видеокамеры или прецизионного столика на более современные, или даже полной замены микроскопа. Поэтому, программное обеспечение должно быть максимально гибким и разработано так, чтобы при замене какой-либо аппаратной части или при расширении его функций требовалось бы минимальные изменения исходного текста программы.

Применение многопроцессорных и многоядерных систем в автоматизированных сканирующих комплексах позволяет существенно повысить их производительность за счёт одновременного выполнения различных задач. И здесь комплекс ПАВИКОМ не исключение: он использует четырехядерную рабочую станцию на базе процессора Intel Core2Quad. Плата Matrox Odyssey XPro оцифровки и обработки изображений также представляет собой отдельную многопроцессорную систему. Полное использование вычислительных возможностей комплекса ПАВИКОМ возможно лишь при реализации в программном обеспечении эффективной многопоточной модели.

Итак, вот те требования, исходя из которых, было разработано программное обеспечение комплекса ПАВИКОМ [66]:

- Возможность безостановочного сканирования.
- Обработка изображений в режиме реального времени.
- Независимость от типа сканируемого детектора.
- Независимость от характера обрабатываемых данных.
- Возможность быстрой адаптации к новому оборудованию.

- Максимальная гибкость программы.
- Эффективная работа в многопроцессорных системах.
- Возможность участия в распределённых вычислениях.

Для реализации этих требований был применён модульный подход к построению программного обеспечения. Он позволил инкапсулировать реализацию модулей: т.е. ни один модуль не зависит от работы и устройства других модулей. Соответственно, изменение одного модуля никак не затрагивает другие. Таким образом, достигается необходимая гибкость при настройке программы, что придает ей способность производить сканирование на микроскопах различных типов. Для этого нужно только заменить аппаратно-зависимые части модулей — адаптеры. Программа также может быть использована для обработки данных различных экспериментов. Для этого нужно реализовать соответствующий обработчик. При этом все остальные модули программы, не зависящие от аппаратуры и характера эксперимента, останутся неизменными при различных вариантах настройки.

Программа состоит из пяти модулей. Один из них предоставляет собой интерфейс пользователя, второй и третий предназначены для работы с аппаратурой, четвертый обрабатывает полученные данные и, наконец, пятый, управляющий модуль, обеспечивает их совместную работу (Рис. 38).

Модули управления видеокамерой (*МУВ*) и микроскопом (*МУМ*) при своей инициализации загружают специальные динамические библиотеки – адаптеры. В адаптерах собрана вся аппаратно-зависимая часть программы. В процессе работы модули преобразуют команды протокола в вызовы функций, которые предоставляет соответствующий адаптер.

Через интерфейс адаптера видеокамеры возможна настройка видеокамеры, а также регистрация и манипуляция изображениями, и их вывод на экран. Адаптер для работы с видеокамерой Mikrotron MC-1310 реализован с использованием библиотеки Matrox Odyssey Native Library (ONL). Через интерфейс адаптера микроскопа доступна следующая функциональность:

- считывание текущей координаты
- передвижение в указанную точку
- обнуление текущей координаты
- считывание текущей скорости передвижения
- установка текущей скорости передвижения
- прекращение движения
- установка уровня освещения

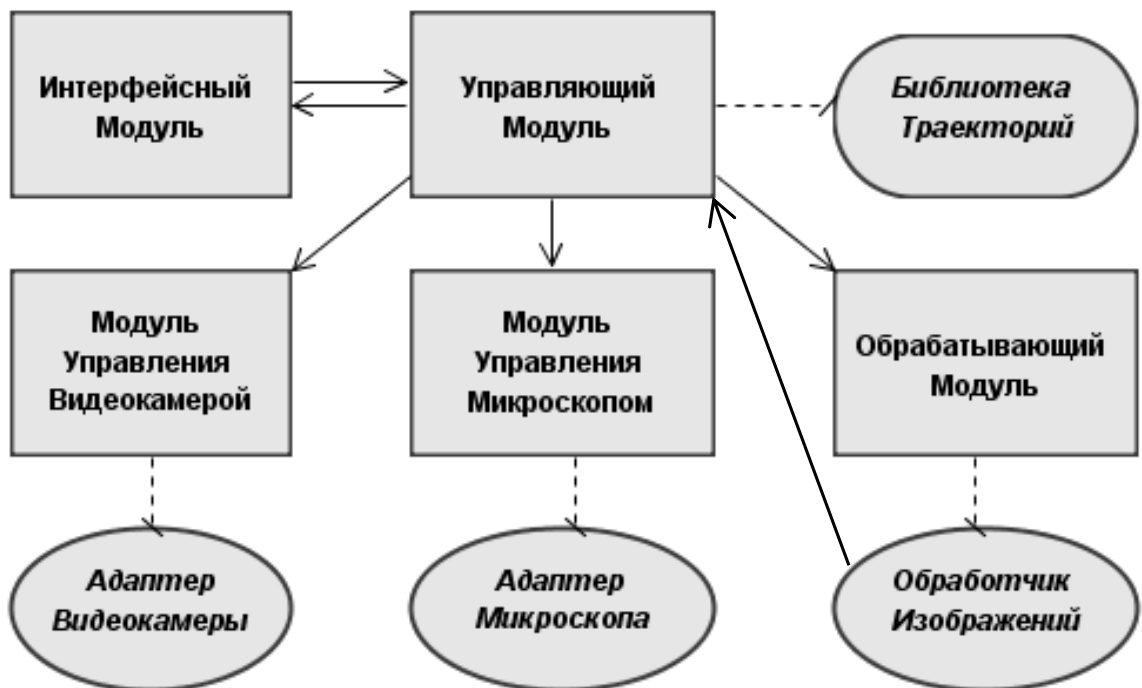


Рис. 38. Архитектура программы PAVICOM. Стрелками обозначены межмодульные связи по типу клиент-сервер, стрелки направлены от клиента к серверу. Пунктиром обозначены связи через интерфейс динамически загружаемых библиотек.

Интерфейсный модуль (ИМ) отображает в диалоговом окне текущие настройки программы и позволяет их изменять. Он позволяет также запускать и останавливать процесс сканирования детектора. Интерфейсный модуль является связующим звеном между пользователем и управляющим модулем: с его помощью действия пользователя (нажатия на кнопки, и т.п.) преобразуются в команды протокола, понятные управляющему модулю.

В управляющем модуле (*УМ*) сосредоточена вся логика сканирования. Он получает параметры выбранной траектории движения из интерфейсного модуля и загружает её из соответствующей библиотеки траекторий. Основываясь на выбранной траектории, модуль посылает команды другим модулям, управляющим видеокамерой и микроскопом, получает от них данные и рассчитывает координаты каждого изображения. Затем он отправляет эти изображения обрабатывающему модулю. Также, используя данные, полученные от обрабатывающего модуля, он может корректировать параметры сканирования.

Обрабатывающий модуль (*ОМ*) обрабатывает изображения, полученные из управляющего модуля, и сохраняет результаты обработки. Он состоит из двух частей: независимой части, отвечающей за взаимодействие с другими модулями, и обработчика, зависящего от конкретного эксперимента, данные которого подлежат обработке. На ПАВИКОМ уже длительное время успешно используются два обработчика для экспериментов EMU-15 и ОЛИМПИА, а с недавнего времени с помощью PAVICOM обрабатываются и эмульсии эксперимента OPERA.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Такая архитектура программного комплекса PAVICOM является подходящей базой для разработки программного обеспечения для сканирующих станций нового поколения. Нашей лабораторией совместно с неапольским отделением Национального Института Ядерной Физики (Италия) был разработан обрабатывающий модуль для сканирования двухслойных эмульсий по типу используемых в эксперименте OPERA.

Ключевым элементом стал разработанный новый алгоритм движения [67]. Он позволяет значительно повысить скорость сканирования даже без модификации оборудования микроскопа.

До сих пор сканирующие системы использовали, так называемый, шаговый режим движения (Рис. 39, а). 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 [50], скорость сканирования Европейской Сканирующей Системы (ЕСС), 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 захвата изображений не может быть уменьшено, поскольку оно определяется частотой захвата кадров камеры и выбранным расстоянием между последовательными кадрами. Однако, время перемещения может быть значительно уменьшено, если использовать схему «непрерывного движения». В таком режиме кадры захватываются во время движения с постоянной скоростью одновременно вдоль вертикальной и горизонтальной осей, т.е. без остановки стола. Выбором горизонтальной скорости можно добиться необходимого перекрытия соседних полей зрения. В случае непрерывного движения время перемещения к следующему кадру определяется уже временем движения в начальное положение по вертикальной оси. Это время для подвижных столов, используемых на ЕСС и ПАВИКОМ, составляет 25 мс, что позволяет уменьшить рабочий цикл до 80 мс. В будущем, при использовании быстрой пьезо-электрической подвески для перемещения по оси z цикл сканирования может быть уменьшен до 56 мс (Рис. 39, б).

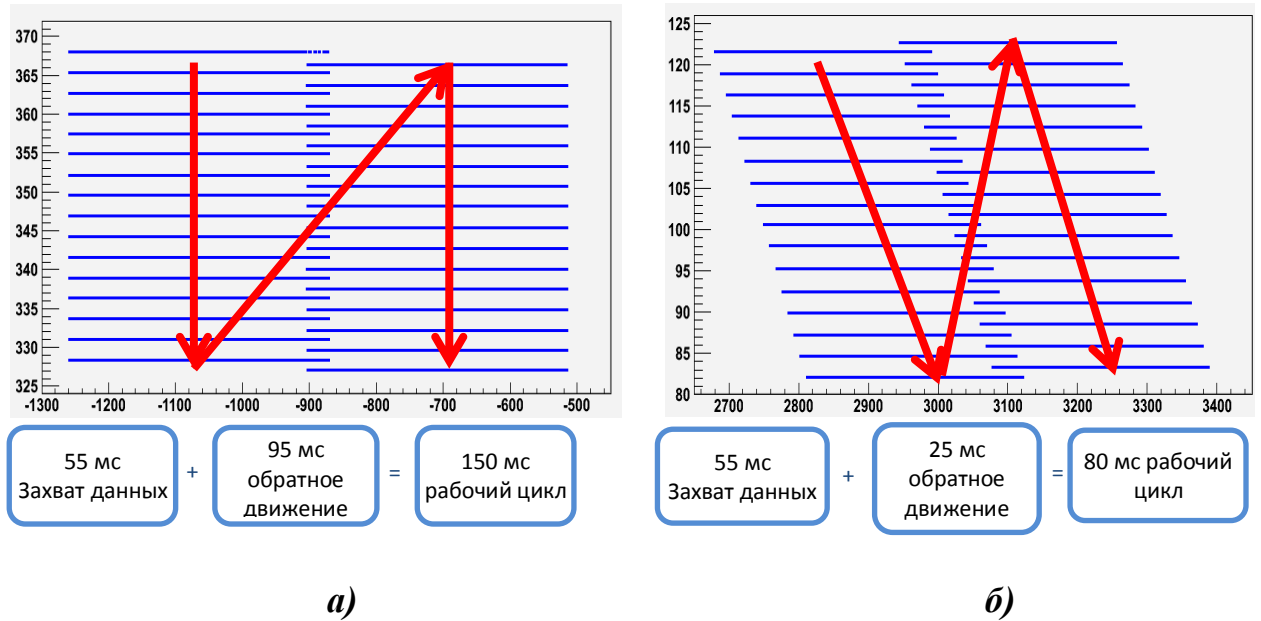


Рис. 39. Схемы захвата изображений: а) шаговый режим. Захват производится во время движения по оси Z, пока по осям X и Y – он неподвижен; б) непрерывный режим. Циклические движения по оси Z (85-90 мс на поле зрения), при постоянном движении вдоль оси Y (скорость $280 \text{ мкм}/80 \text{ мс} = 3500 \text{ мкм}/\text{с}$). Смещение между соседними кадрами составляет 9 мкм.

Однако повышение скорости сканирования требует также повышения скорости обработки эмульсионных данных, а, соответственно, и модификации практически всех этапов обработки для сохранения парадигмы обработки в режиме реального времени.

Одной из целей данной работы была модификация ресурсоемких этапов обработки и подготовка программного комплекса для сканирующих систем нового поколения.

Устранение вибраций

При движении микроскопа вдоль оси z со скоростью, большей 200 мкм/с, возникают резонансные механические вибрации кронштейна микроскопа. Автором произведено изучение параметров таких вибраций и разработан способ эффективного устранения их влияния.

Поскольку глубина фокуса микроскопа больше расстояния между соседними кадрами, большинство зерен в эмульсии, находящихся в фокусе на определенной глубине, видны также и на соседнем по оси Z кадре, а, соответственно, и реконструируются как кластеры. Реальное смещение между двумя кадрами в плоскости XY находится методом гистограммирования.

После кластеризации изображений, для каждого кластера $C1_i$ из первого слоя находятся все кластеры из второго слоя $C2_j$, удовлетворяющие условию:

$$\Delta x = x1_i - x2_j, |dx| < \Delta x_{\max}$$

$$\Delta y = y1_i - y2_j, |dy| < \Delta y_{\max},$$

где Δx_{\max} , Δy_{\max} максимальное предполагаемое смещение между соседними слоями по осям X и Y соответственно.

Далее строятся гистограммы распределения значений Δx и Δy . Пик на этой гистограмме соответствует значениям Δx для кластеров находящихся на разных слоях, но соответствующих одному и тому же зерну в эмульсии. Значение Δx , Δy в пиках соответствует значению смещения между соседними кадрами, высота пика – количеству зерен эмульсии, которые видны как кластеры на обоих слоях.

На рис. 40 представлены распределения Δx , Δy для двух соседних по глубине кадров. Видно, что имеется один четкий пик на распределении.

Для изучения влияния вибраций можно построить распределения значений найденного таким образом смещения Δx_{12} , Δy_{12} между всеми парами соседних слоев. Такие распределения показаны на рис 41 а, б. Видно, что среднее значение смещения равно нулю, т.е. оно не накапливается, и носит вибрационный характер. Кроме того, видно, что разброс смещения по оси Y значительно превосходит разброс по оси X , т.е. вибрация возникает в механической системе крепления микроскопа, направленной как раз вдоль оси Y . Стандартные отклонения составляют $\sigma_x \approx 0.3$ мкм, $\sigma_y \approx 1.6$ мкм. На рис. 41 в, г

показаны смещения в зависимости от координаты Z. Видно, что сдвиги имеют осцилляционный характер.

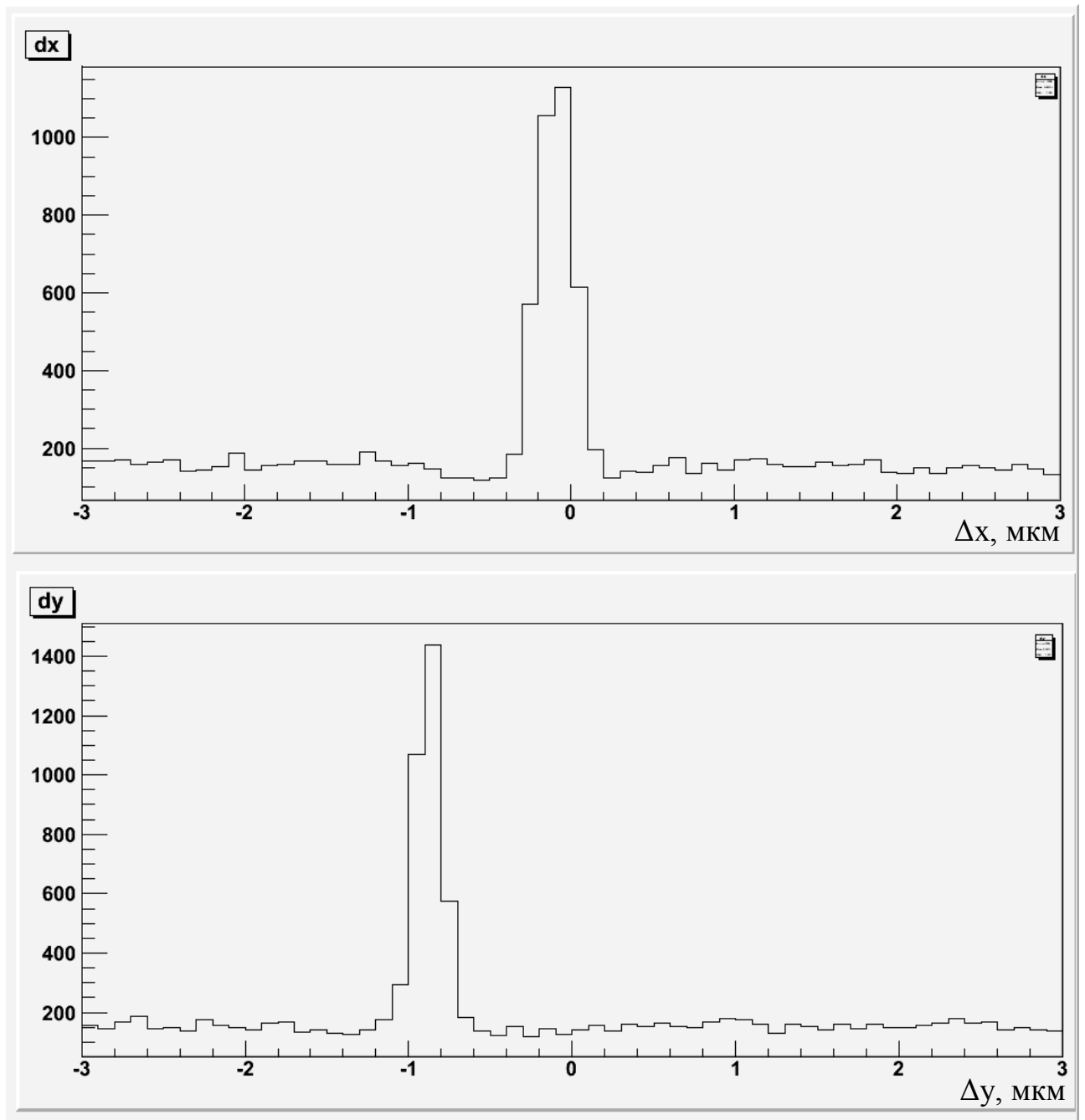


Рис. 40. Распределение расстояний между кластерами двух соседних кадров в микронах. Пик на распределении соответствует сдвигу одних и тех же зерен, которые видны на обоих кадрах, а, соответственно сдвигу кадров между собой.

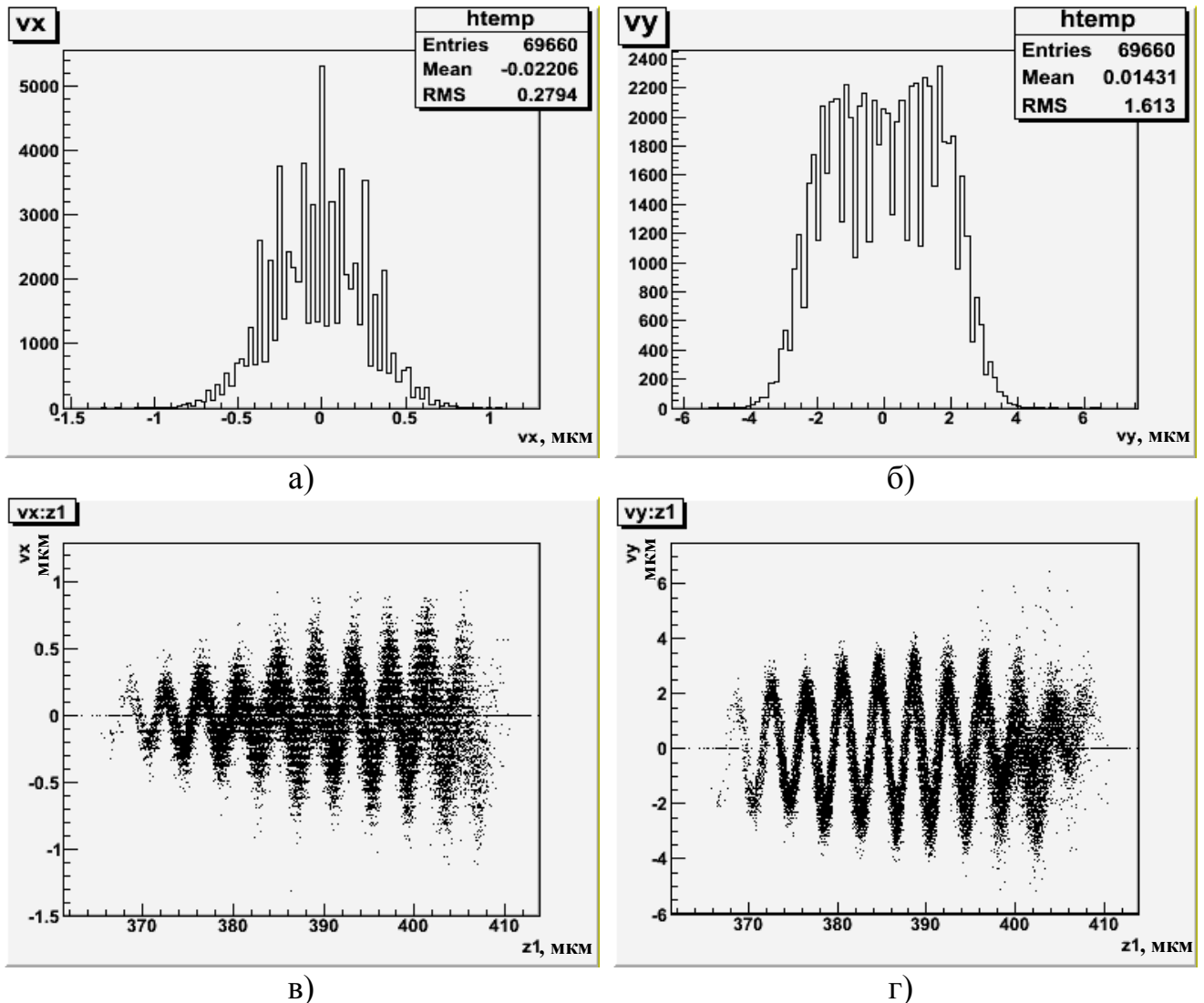


Рис. 41. Распределение смещений между соседними кадрами. а), б) распределения смещений в микронах между последовательными кадрами по осям X и Y соответственно. в) г) зависимость смещения по осям X , Y соответственно от координаты Z . Видно, что вибрации имеют осцилляционный характер. Вибрация вдоль оси X довольно быстро угасает, и вызвана движением стола при перемещении между полями зрения, в то время как вибрация вдоль оси Y имеет резонансный характер и вызвана движением вдоль оси Z при сканировании.

Вначале для этого исследования автором было разработано тестовое приложение, обрабатывающее сохраненные изображения отсканированной области, находящее указанным методом параметры вибраций и сохраняющее изображения с учетом коррекции смещений. Это позволяет также визуально проверить качество работы алгоритма.

После того, как была показана эффективность такого подхода, алгоритм был интегрирован в цикл обработки программного комплекса PAVICOM. Коррекция вибраций во время сканирования позволила производить сканирование с любой скоростью движения вдоль оси Z. Таким образом, ограничивающим фактором являются только механические возможности подвижного столика.

Во время сканирования есть возможность сохранять "сырые" данные – набор кластеров для каждого поля зрения в потоковом формате obx. Для возможности последующей инспекции параметров вибрации для таких данных, была разработана и включена в программный пакет утилита vibr_test, позволяющая зачитывать obx-файлы и сохранять распределения параметров вибраций в формате root.

Передача данных по TCP-сети

Высокоэффективная обработка данных в реальном времени требует значительных вычислительных ресурсов и при быстром сканировании в непрерывном режиме практически невозможна на одном компьютере.

В PAVICOM весь ввод-вывод производится посредством потоковых интерфейсов. При этом реализация устроена так, что данные можно направить одинаково в любой поток вывода, будь то область памяти, файл или так называемый Pipe – объект ядра Windows для передачи данных между потоками программы или различными процессами. Хотя этот объект и поддерживает передачу данных по сети, его производительность в этом случае недостаточна для быстрой передачи большого объема данных.

Автором создан класс, осуществляющий передачу данных через TCP-Socket соединение и имеющий тот же интерфейс, что и другие потоковые средства ввода-вывода в PAVICOM. Также в нем заложена возможность проверки целостности переданных данных.

Его создание позволило построить распределенную систему обработки. При этом локально на сканирующей машине производится обработка до этапа кластеринга, т.к. с одной стороны, этот этап необходим для корректировки положения следующей сканируемой области, а с другой стороны – объем данных после кластеринга значительно сокращается и требуется передавать меньше по сети. Удаленная машина уже производит все дальнейшие этапы обработки: устранение влияния вибраций, реконструкцию зерен и микротрекинг. В таблице 10 приведены сравнительные объемы данных на основных этапах обработки.

Таблица 10. Сравнение потока данных после основных этапов обработки ЯФЭ.

№	Этап обработки	Поток данных
1	Захват изображений с камеры	500 МБ/с
2	Кластеризация изображений	50 МБ/с
3	Реконструкция зерен	30 МБ/с
4	Поиск «линков» – заготовок для микротреков	24 ГБ/с
5	Отбор «линков» – выделенных направлений для микротреков	60 МБ/с
6	Реконструкция микротреков	1 МБ/с

Система протестирована и показала отличную производительность при работе со стандартной TCP/IP сетью, работающей на скорости 1 Гбит/сек.

Надежность доставки TCP пакетов гарантируется уведомлением о доставке, посылаемым принимающей стороной. При этом, для снижения сетевой нагрузки, эти уведомления посылаются не для каждого отдельно принятого пакета, а по умолчанию спустя 200 мс. Поэтому, для максимального быстродействия, при передаче большого числа мелких пакетов в Windows, необходимо отключить отложенное уведомление о доставке TCP сообщений.

Это достигается установкой в реестре Windows значения *I* ключу `HKEY_LOCAL_MACHINE\SYSTEM\CurrentControlSet\Services\Tcpip\Parameters\Interfaces\{Adapter-id}\TcpAckFrequency`.

Интерфейс управления из пакета FEDRA

Для построения схемы сканирования по стандартному принципу, где задание зоны сканирования и его запуск осуществляется из интерфейса программы offline обработки FEDRA, на основе созданного класса передачи данных по TCP-сети автором был разработан модуль для PAVICOM удаленного управления GuideServer. Он позволяет принимать и устанавливать все параметры сканирования и непосредственно запускать процесс сканирования. Разработан протокол формата данных, основанный на языке XML, позволяющий также контролировать целостность и порядок переданных команд. Список команд приведен в таблице 11.

Таблица 11. Команды протокола удаленного управления PAVICOM

Команда	Действие
SetModuleParams	Установка параметров модуля
GetModuleParams	Запрос параметров модуля
SetPathParams	Установка параметров пути сканирования
GetPathParams	Запрос параметров пути сканирования
FindMarks	Команда инициализации поиска марок на эмульсии
Start	Команда инициализации сканирования
Stop	Команда остановки сканирования

В набор библиотек FEDRA добавлен клиент для управления PAVICOM. Также произведены все необходимые модификации скриптов, используемых при сканировании. Таким образом, с использованием привычных операторам скриптов и окружения, можно производить сканирование с помощью PAVICOM. Это также упрощает дальнейшую обработку данных эксперимента,

поскольку полученные в результате сканирования данные (набор микротреков) сразу же «встраиваются» в стандартную структуру данных, производится реконструкция базовых треков, поиск взаимного расположения пластин детектора и дальнейшие этапы обработки.

Схема всей системы при этом принимает вид, показанный на рис 42.

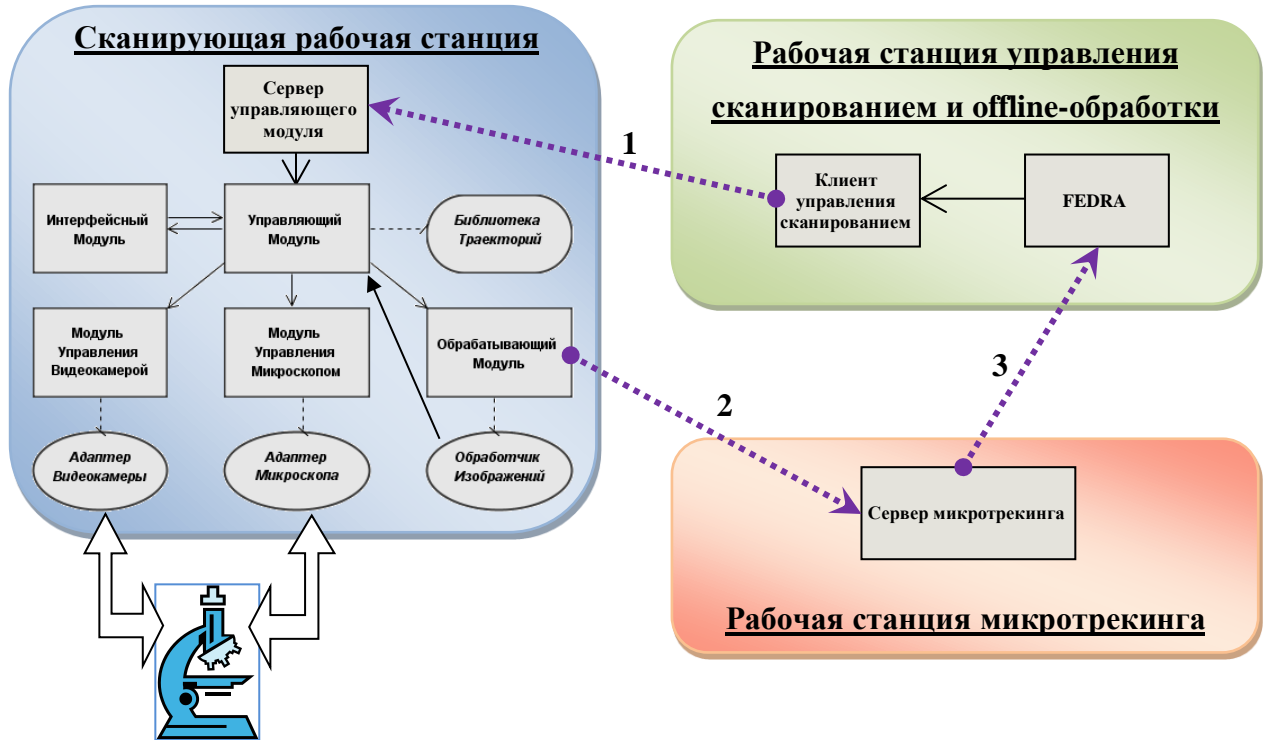


Рис. 42. Схема распределенной системы сканирования PAVICOM. Пунктирные стрелки показывают передачу данных по сети: 1 – управление сканированием. 2 – передача реконструированных кластеров серверу микротрекинга. 3 – передача реконструированных микротреков в FEDRA для дальнейшей обработки.

Вычисления на графическом процессоре.

Специфика вычислений на графическом процессоре

В последнее время быстро развиваются производительность и возможности графических процессоров (GPU – Graphical Processing Unit), в основном благодаря развитию игровой индустрии. Основной задачей видеопроцессора является разбиение поверхности на треугольники (т.н. тесселяция) и отрисовка

видимых поверхностей объектов, а также трехмерные преобразования объектов в пространстве и поиск видимых частей объектов.

Большие вычислительные возможности видеокарт, в частности добавление программируемых шейдерных блоков и более высокой арифметической точности растровых конвейеров позволило разработчикам ПО начать их использовать для различного рода вычислений. Так появилось понятие GPGPU (General-purpose graphics processing units — «GPU общего назначения») — техника использования графического процессора видеокарты, чтобы выполнять расчёты в приложениях для общих вычислений, которые обычно проводит центральный процессор.

Производители GPU стали целенаправленно поддерживать такие вычисления, был разработан набор для разработки приложений OpenCL, поддерживаемый NVIDIA и AMD. Однако компанией NVIDIA была также создана технология CUDA (англ. Compute Unified Device Architecture) — программно-аппаратная архитектура параллельных вычислений, поддерживаемая большинством графических процессоров NVIDIA.

Графические процессоры NVIDIA обладают большей стабильностью, а также существует ряд моделей непосредственно предназначенных для вычислений. Технология CUDA, в отличие от упомянутого OpenCL поддерживается ими нативно.

Ввиду этих факторов было решено использовать именно CUDA при разработке модулей комплекса, использующих вычислительные мощности графических процессоров.

Архитектура GPU существенно отличается от архитектуры современных CPU, что делает невозможным прямое использование многопоточного программного обеспечения, разработанного для CPU. Графические процессоры имеют большое количество арифметико-логических единиц, или,

применительно к NVIDIA GPU – CUDA-ядер. Однако, в отличие от привычных ядер центрального процессора, которые работают независимо, эти ядра производят одинаковые операции с разными данными (т.н. SIMT архитектура, Single Instruction Multiple Thread – Одна инструкция в несколько потоков). Общее число таких ядер на современных видеокартах составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч. Это дает возможность значительного ускорения для хорошо параллелизуемых алгоритмов. Специфика программирования для GPU заключается в том, что максимально эффективным алгоритмом 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. Например, случай обработки изображений является идеальным для GPU: для большого количества пикселей необходимо произвести те же самые действия, при этом отсутствуют какие-либо ветвления в алгоритме, и при большом размере изображения (больше количества параллельно выполняемых потоков на каждом потоковом мультипроцессоре, т.е. 32) отсутствуют простаивающие вычислительные единицы.

Обработка изображений на графическом процессоре

Цикл обработки изображений на сканирующей станции следующий:

- 1) захват изображений с камеры
- 2) вычитание фона (устранение эффекта битых пикселей и загрязнений на фоточувствительной матрице камеры)
- 3) высокочастотная фильтрация
- 4) вычитание матрицы выравнивания поля зрения
- 5) бинаризация

Алгоритм обработки изображений реализован 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). Выполняемая

высокочастотная 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 $C_{i,j}$. Именно эта операция является наиболее ресурсоемкой.

Раньше все эти этапы производились на плате захвата изображений оснащенной модулем обработки Matrox ODYSSEY XPro. Время обработки и копирования из платы обработки в память компьютера, затрачиваемое на 1 кадр составляет не менее 5 мс на последних моделях платы. При сканировании в режиме непрерывного движения время обработки 16 кадров находится на пределе времени цикла сканирования одного поля зрения, и при некоторых условиях превышает его, нарушая цикл сканирования. Таким образом, очевидно, что для стабильной работы в режиме непрерывного движения полное время, затрачиваемое на 1 кадр, должно быть сокращено.

В сканирующих станциях нового поколения планируется использовать плату захвата изображений Matrox Radient eCL, не имеющую в принципе необходимого модуля обработки.

Автором было решено имплементировать полный цикл обработки изображений на GPU. Все этапы обработки идеально параллелизуются и укладываются в парадигму вычислений на GPU.

Вначале было разработано тестовое приложение, зачитывающее изображение из файла и производящее все указанные этапы обработки. При этом реализована конвейерная схема работы: копирование изображения из оперативной памяти компьютера в память GPU, обработка и копирование обратно в память компьютера производятся асинхронно.

Оно было протестировано на видеокарте GTX570. Время обработки одного кадра составило 0.46 мс, т.е. в 10 раз меньше, чем время, затрачиваемое для проведения всех этих этапов с использованием Matrox ODYSSEY XPro. Обработка одного поля зрения (16 кадров для эмульсии эксперимента OPERA) составляет 7.36 мс, что значительно меньше времени, затрачиваемого на сканирование даже в непрерывном режиме с использованием пьезо-подвески.

Возможность обработки изображений на GPU была также интегрирована автором в программный комплекс PAVICOM. Для этого потребовалось также разработать интерфейс копирования изображений из платы захвата изображений в GPU.

Проведенные тесты показали, что при использовании камеры Mikrotron 1310, 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. В сканирующих станциях нового поколения планируется использовать камеру Bonito 4000, имеющую в 3 раза большее (2320×1726 пикселей) разрешение. Соответственно время обработки изображений одного поля зрения, полученных этой камерой, составит ~63 мс. Т.е. даже платы Quadro 2000 достаточно для сканирования в режиме непрерывного движения с новой камерой (цикл сканирования 80 мс/поле зрения) или при использовании пьезо-подвески и старой камеры (цикл сканирования <60 мс/поле зрения).

Реконструкция кластеров на GPU

Успешный опыт применения вычислительной мощности GPU привел к идее о реализации алгоритма кластеринга тоже на GPU. Был разработан алгоритм, который осуществляет поиск кластеров и нахождение их параметров – координат центра масс и почернения (Рис. 43).

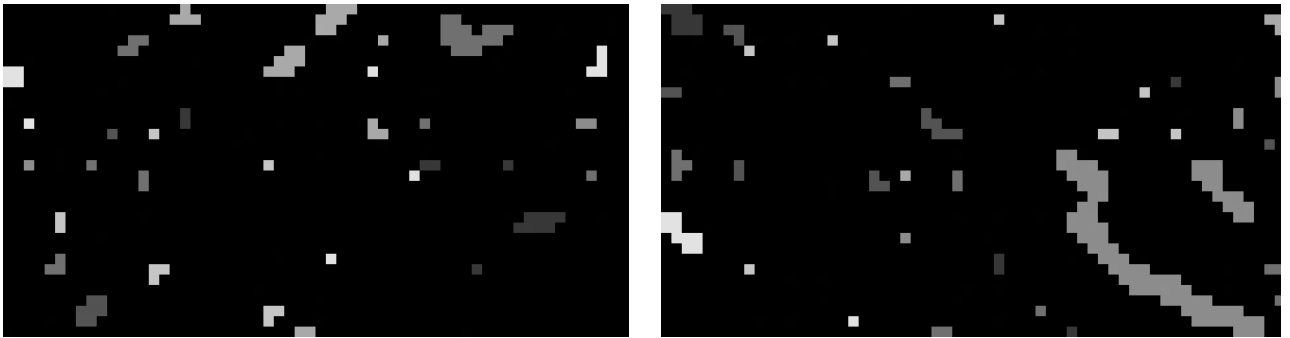


Рис. 43. Увеличенное изображение найденных кластеров в эмульсии. Разные градации серого соответствуют разным кластерам.

Однако алгоритма специфика кластеринга значительно отличается от обработки изображений – он требует значительного числа ветвлений. Время реконструкции кластеров на одном кадре на видеокарте GTX 570 составляет 2 мс на кадр размером 1280×1024 пикселей, что соответствует 38 мс на поле зрения, а для камеры Bonito 4000 с разрешением 2320×1726 – около 120 мс, что значительно превышает время цикла сканирования в режиме непрерывного движения. Поэтому, было решено не использовать GPU версию кластеринга.

Гибридная GPU-CPU система реконструкции микротреков

Самой ресурсоемкой частью online обработки ЯФЭ является реконструкция микротреков. Нашей группой был разработан высокоэффективный алгоритм 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. Эффективности находится в диапазоне 89-95% при угле наклона треков $\theta < 70^\circ$.

Основные этапы алгоритма микротрекинга представлены на рис. 44.

Сначала производится построение отрезков (т.н. линков) между всеми парами реконструированных грейнов, для которых длина и угол наклона лежит в определенном диапазоне.

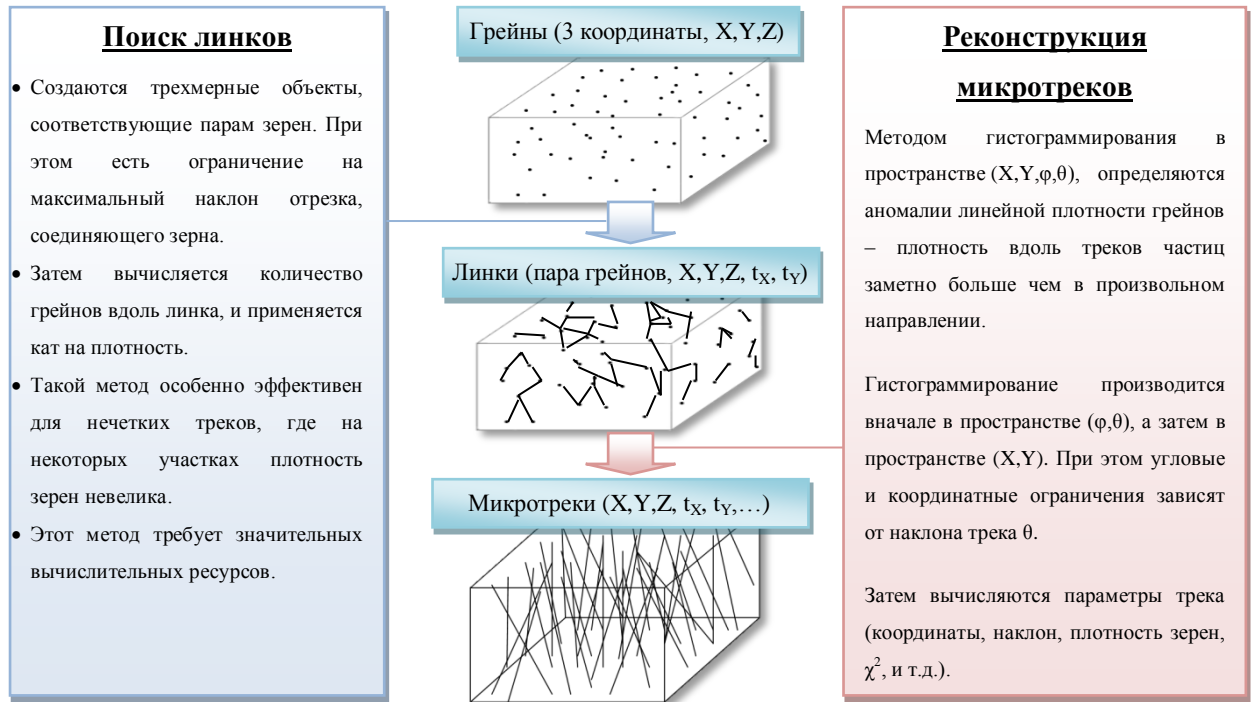


Рис. 44. Этапы реконструкции микротреков.

Затем вычисляется количество грейнов, лежащих в цилиндре ошибок вокруг направления каждого линка, и отбираются те линки, для которых это количество оказывается выше некоторого порогового значения.

Далее строятся четырехмерные гистограммы распределения количества линков от положения в пространстве координат линка X, Y и наклона φ, θ. При этом ячейки гистограммы углового распределения устроены так, чтобы телесные углы всех ячеек были равны. Пики на такой гистограмме соответствуют направлениям с высокой плотностью линков. Таким образом, выделяются те направления, в которых с большой вероятностью могут находиться микротреки.

Вокруг этих направлений производится поиск грейнов в цилиндре ошибок, плотности грейнов на треке и длине трека, и, в конечном счете, вычисление параметров микротрека.

Однако этот алгоритм трекинга даже на мощных компьютерах не способен справиться с обработкой в режиме реального времени даже при сканировании в

шаговом режиме. Например, обработка одного поля зрения на рабочей станции Dell 7500 оснащенной двумя 6-ядерными процессорами Xeon X5650 2.66 ГГц с функцией HyperThreading (англ., гиперпоточность, функция позволяющая производить параллельно целочисленные и операции с плавающей точкой на одном ядре), итого 24 логических ядра, занимает более 600 мс. Напомним, что скорость сканирования в шаговом режиме составляет ~ 150 мс на поле зрения, а в безостановочном менее 80 мс на поле зрения.

Больше всего процессорного времени занимает первоначальный этап построение линков и отбора по плотности грейнов вдоль линка. При количестве грейнов на поле зрения порядка 60000, количество линков, соответствующих угловым критериям, составляет более 10^6 , что соответствует потоку входных данных (всех линков) 24 ГБ/с.

Было решено создать модуль линкинга, производящий построение и отбор линков на GPU.

Вначале производится поиск линков – пар грейнов, удовлетворяющих угловым ограничениям и ограничению на расстояние между ними.

Для оптимальной работы была построена система разбиения пространства на ячейки С и их группирование для ограничения области поиска (Рис. 45).

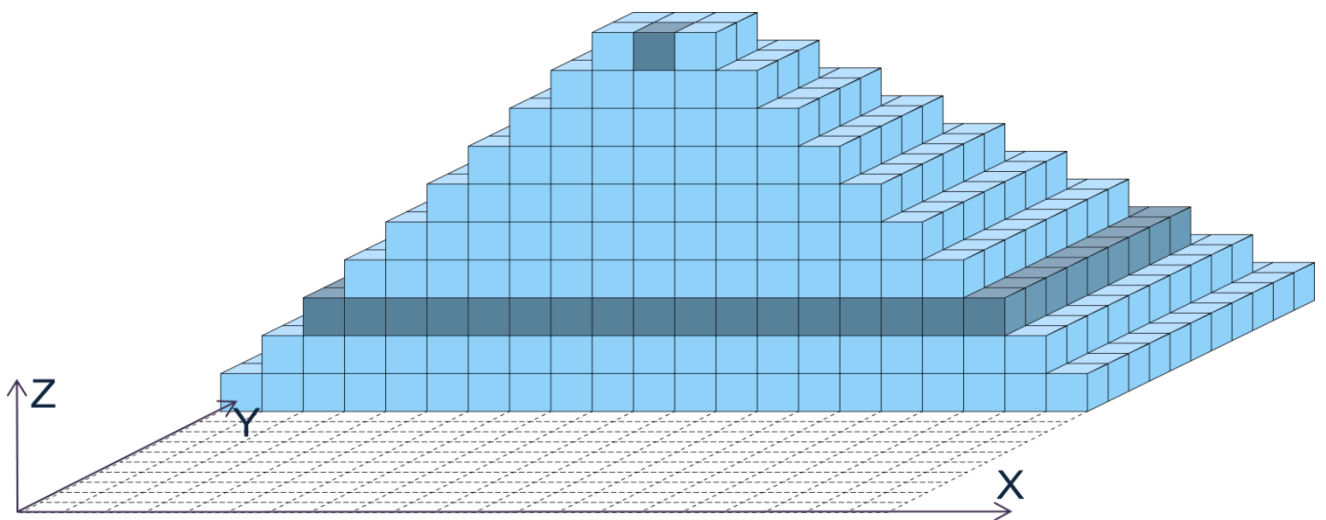


Рис. 45. Пространство грейнов при поиске линков разбивается на ячейки. Размер ячейки $5 \times 5 \times 5$ мкм³. Для каждого первого грейна линка, находящегося

некоторой ячейке область поиска второго грейна ограничена представленной пирамидой. Первый грейн находится в вершине пирамиды. Максимальный угол наклона линка составляет 45° .

При этом все грейны, представляющие собой три пространственные координаты x, y, z хранятся в массиве упорядоченным по координатам ячеек образом. Т.е. если общее количество ячеек $N_x N_y N_z$, и грейн a_i находится в ячейке (i_x, i_y, i_z) , то для координат ячейки (j_x, j_y, j_z) следующего грейна a_{i+1} в массиве выполняется соотношение:

$$i_x < N_x: j_x = i_x, j_y = i_y, j_z = i_z,$$

для последнего грейна ячейки последней в ряду:

$$i_x = N_x, i_y < N_y: j_x = 1, j_y = i_y + 1,$$

а для последнего грейна ячейки последней в последнем ряду:

$$i_x = N_x, i_y = N_y: j_x = 1, j_y = 1, j_z = i_z + 1.$$

Каждая ячейка представляет собой пару значений: Idx_i – индекс первого грейна в ячейке и N_i – количество грейнов в ячейке.

При этом легко можно составить «Большие ячейки» C^N , включающие в себя все грейны из N соседних в ряду ячеек вокруг C_i :

$$Idx_{BigN i} = Idx_{i - \frac{N-1}{2}}$$

$$N_{BigN i} = \sum_{j=i - \frac{N-1}{2}}^{i + \frac{N-1}{2}} N_j$$

Таким образом, при поиске пар грейнов в определенном диапазоне углов между ними можно избежать обхода $N \times N$ ячеек C , оставив лишь обход N больших ячеек C^N (Рис. 46). Следует пояснить важность этого подхода. Поскольку число грейнов в ячейке может значительно варьироваться, при обработке каждым ядром одной ячейки будет значительный разброс в объеме работы каждого ядра графического процессора. Но поскольку все они ввиду архитектуры GPU работают синхронно, это будет проводить к простому части

из них и соответственно значительной потери производительности. При использовании такого подхода, количество грейнов в больших ячейках (используются $N \geq 9$, т.к. минимальная длина линка составляет 20 мкм) намного однороднее, а, следовательно, и нагрузка на все ядра GPU.

Далее производится отбор линков по плотности грейнов в цилиндре ошибок вдоль него. Вначале производится поиск грейнов, находящихся вблизи линка. Для

этого в каждом «слое» ячеек находится точка пересечения линка с серединой ячейки по Z. При ограничении на максимальный угол наклона линка 45° , грейны, находящиеся в цилиндре ошибок заведомо находятся в окрестности 3×3 ячейки от этой точки. Поиск производится по трем ячейкам C^3 (Рис. 47).

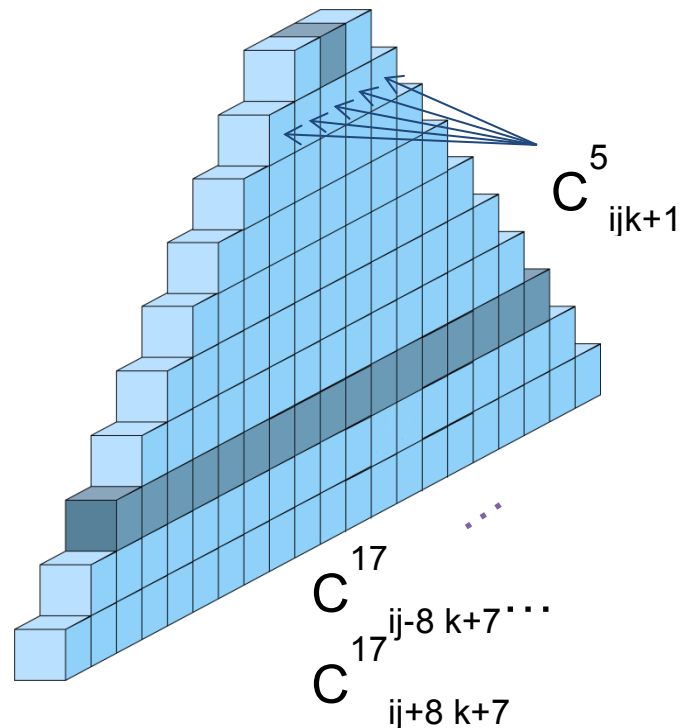


Рис. 46. «Большие ячейки» C^N используются в качестве оптимизации работы алгоритма линкинга на графическом процессоре.

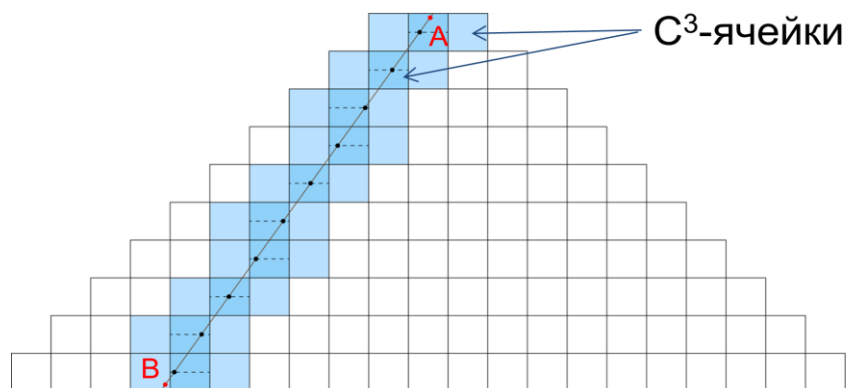


Рис. 47. Область поиска грейнов вокруг линка.

Каждый грейн представляет собой эллипсоид, полуоси которого определяются значением ошибки определения его координат. Определение координат X, Y грейна зависит от разрешения матрицы камеры, и составляет $\sigma_x = \sigma_y = 0.1$ мкм. Поскольку грейн состоит из нескольких кластеров, находящихся на разной глубине, точность определения его координат вдоль оси Z ниже и составляет $\sigma_z = 0.6$ мкм. Для определения плотности грейнов на линке требуется найти количество грейнов, лежащих в цилиндре ошибок вокруг линка. Поскольку грейны не сферические, а имеют форму эллипсоида, сечение этого цилиндра не круглое, а тоже эллиптическое, причем одна из полуосей зависит от наклона линка (Рис. 48). Хотя в проверке, находится ли грейн в цилиндре ошибок, нет ничего сложного, однако она включает в себя ряд тригонометрических вычислений. Такие вычисления занимают относительно много времени на GPU (на 1-2 порядка больше чем умножение и деление). Чтобы упростить задачу, был придуман следующий трюк. Поскольку размеры всех грейнов одинаковы, можно сжать все пространство вдоль оси Z в σ_z/σ_x раз. При этом все грейны становятся сферическими радиуса $r = \sigma_x$, а расположение по отношению к цилиндру ошибок, очевидно, не меняется (Рис. 49). Единственное что изменяется, это наклон и длина линка, что легко учитывается в дальнейшей обработке. При

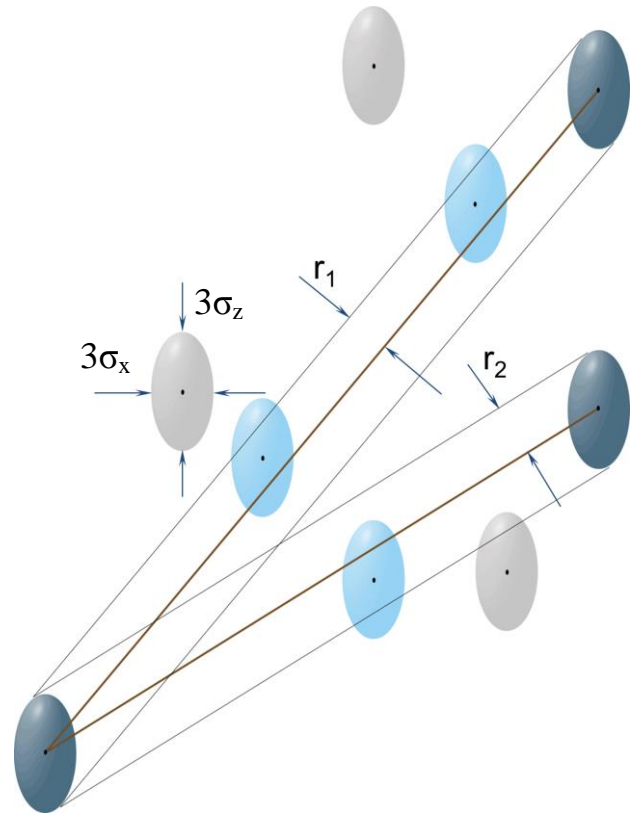


Рис. 48. Грейны, находящиеся в цилиндре ошибок вдоль линка (голубые). Поскольку грейн имеет вид эллипсоида ($\sigma_x \neq \sigma_z$), цилиндр ошибок имеет эллиптическое сечение. Одна из полуосей зависит от наклона линка ($r_1 \neq r_2$).

этом проверка нахождения грейна сводится к сравнению расстояния d от центра грейна до прямой (линка) с радиусом цилиндра r . Расстояние d дается простой формулой:

$$d = \sqrt{AC^2 - \frac{(\vec{AC} \cdot \vec{AB})^2}{(\vec{AB})^2}}$$

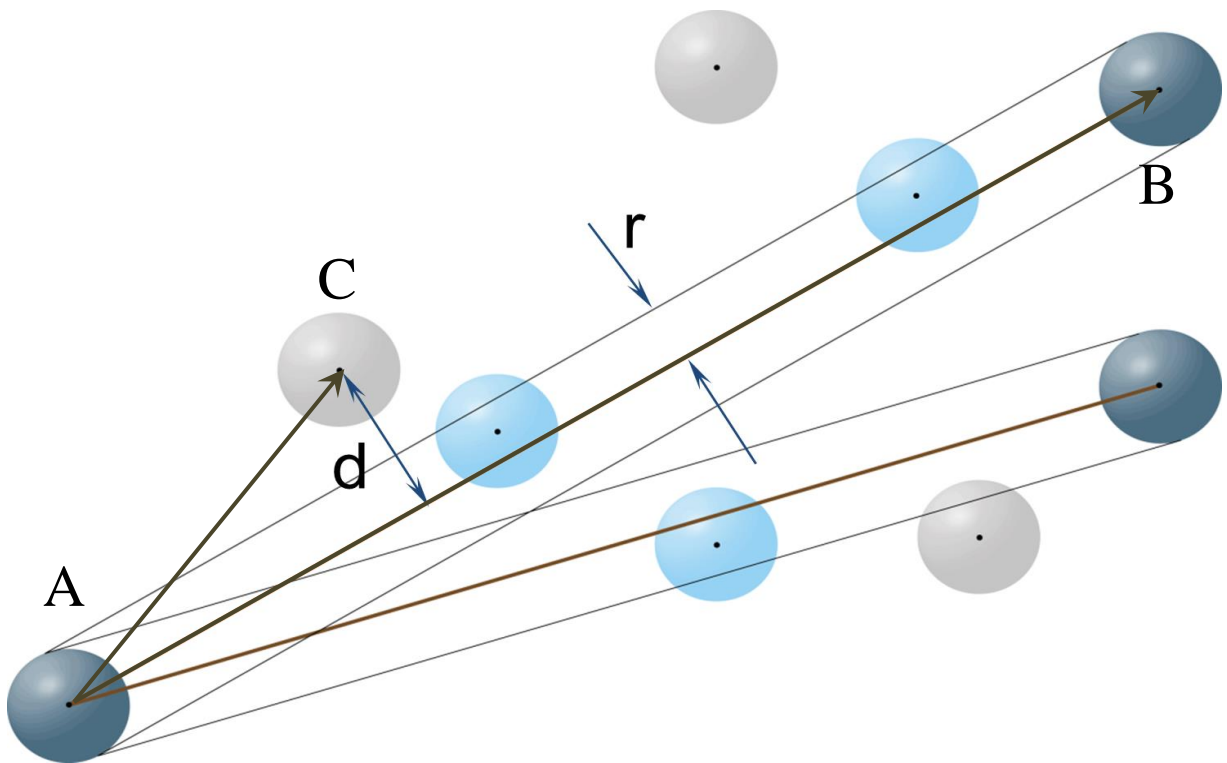


Рис. 49. Вид грейнов вокруг линков в перемасштабированном пространстве.

Основной характеристикой реконструкции треков является эффективность. Как было показано выше, она вычисляется по формуле:

$$E = \frac{1}{N} \sum_i \frac{n_{segm\ i} - 2}{n_{plate\ i} - 2}$$

С целью проверки эффективности разработанной системы линкинга на GPU был обработан набор данных 8 пластин тестовой эмульсии облученной пионами. Результаты сравнивались с обработкой CPU системой трекинга. На

рис. 50, а показано угловое распределение полученной эффективности для CPU трекинга и новой гибридной CPU-GPU системы (Рис. 50, б).

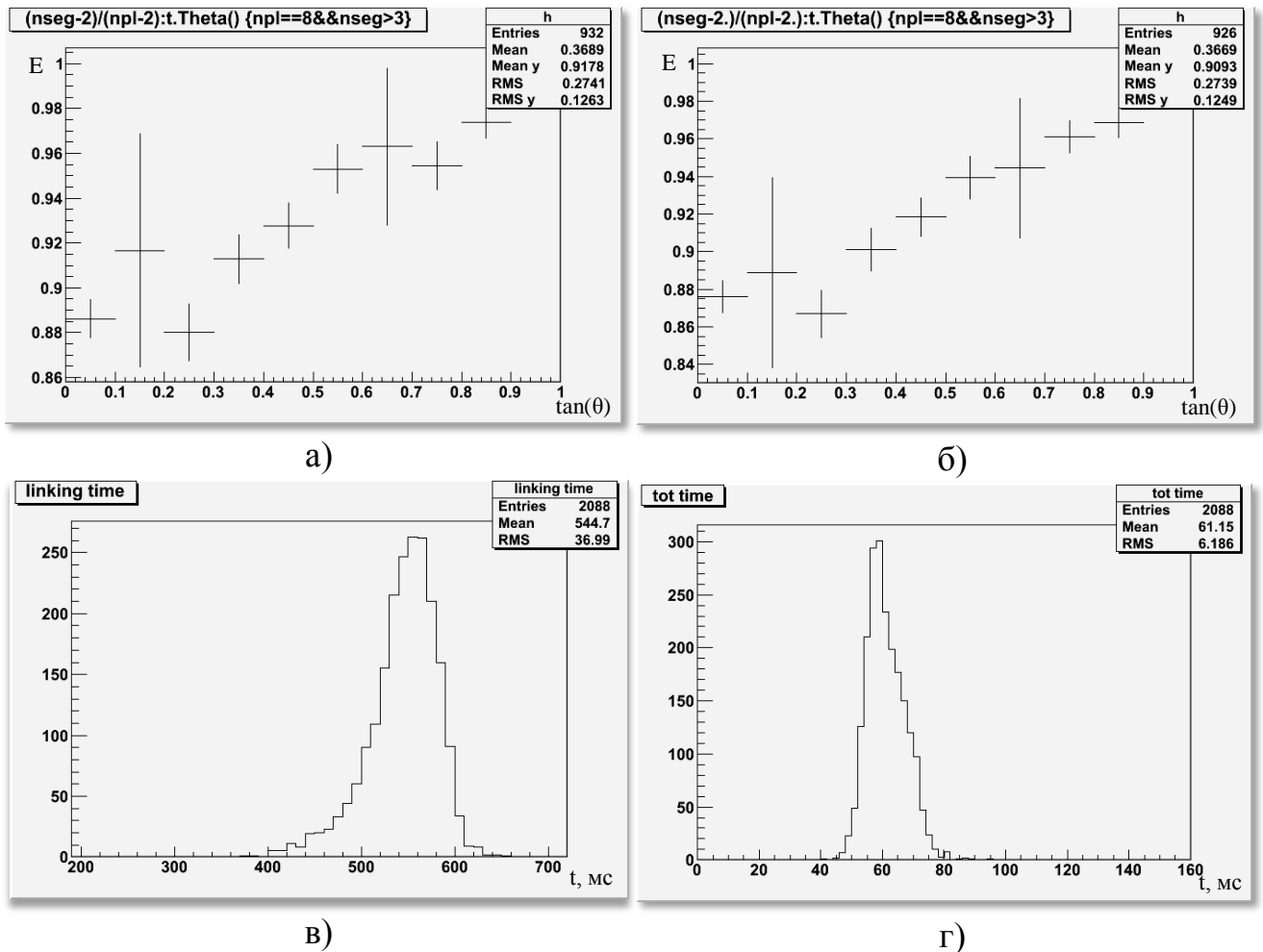


Рис. 50. Сравнение эффективности и времени работы чисто CPU системы трекинга (а, в) и системы использующей разработанный автором модуль GPU-линкинга (б, г).

Видно, что эффективность новой системы ничем не уступает чисто CPU системе. При этом среднее время обработки одного поля зрения составляет 61 мс, в то время как время обработки на CPU системе, как видно на распределении, составляет 540 мс.

Таким образом, новая система позволяет производить высокоэффективную реконструкцию треков в режиме реального времени для сканирования в шаговом режиме. Поскольку система легко масштабируется, она может быть использована для сканирования даже эмульсий с повышенной плотностью фоновых зерен в безостановочном режиме при использовании всего двух плат

GForce GTX 690. При этом каждое поле зрения разделяется поровну между несколькими GPU устройствами.

Однако при использовании большого числа GPU устройств возникает проблема эффективного использования вычислительной мощности: если на одном из устройств выполняются также другие вычисления (обработка изображений, вывод на дисплей и т.п.), то нельзя предсказать, в каких пропорциях необходимо разделять задание между устройствами. При этом естественно возникает ситуация, когда одно, более нагруженное, устройство еще выполняет задание, а все остальные уже закончили и, соответственно, простаивают. Поскольку возникновение небольших латентностей на этапе микротрекинга не критично, была реализована возможность распараллеливать вычисления между GPU устройствами не на уровне каждого поля зрения, а каждое поле зрения отправлять на обработку в отдельное устройство. При этом также устраняются издержки, вызванные необходимостью вычислять «Большие ячейки» на каждом устройстве. Такой метод распараллеливания становится необходимым при использовании большого числа GPU (больше двух). Проведенные тесты показали, что при использовании четырех GPU (две платы GTX 690, по два чипа GPU на каждой), применение такого подхода позволяет повысить общую производительность на 20%.

Модуль GPU линкинга был также подготовлен для обработки данных сканирования в непрерывном режиме. В этом режиме каждое поле зрения имеет наклонные грани с двух сторон направления непрерывного движения (см. рис. 39, б). При этом грейны из скошенной области предыдущего поля зрения объединяются со следующим. Таким образом, на входе системы трекинга оказываются поля зрения с только одной скошенной стороной. Для экономии вычислительных ресурсов была добавлена возможность ограничивать область поиска микротреков. При этом поиск осуществляется только в прямоугольной области. Поиск микротреков в скошенной части будет

осуществлен, когда рейны из нее будут объединены со следующим полем зрения.

Созданная автором система позволяет значительно повысить скорость и эффективность реконструкции треков, при этом обрабатывая данные сканируемых эмульсий в режиме реального времени. Напомним также, что максимальный угол наклона реконструируемых треков составляет 45° , в то время как в ПО SySal он ограничен 36° , и даже при этом угле эффективность значительно деградирует.

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. Именно с его помощью в ФИАН было обработано 6 из 10 эмульсионных кирпичей эксперимента. Также он используется в неапольском отделении Национального Института Ядерной Физики и в Национальной Лаборатории Гран Сассо (INFN, Италия). Суммарно с его помощью уже отсканировано более 50000 см^2 ЯФЭ. Именно с использованием PAVICOM было получено изображение вулкана Стромболи в эксперименте по мюонной радиографии.

Программное обеспечение для обработки данных проекта ОЛИМПИА

Как уже было сказано, программный комплекс PAVICOM имеет модульную структуру. Для обработки данных какого-либо нового эксперимента требует разработки только модуля обработки, и не требуется заново разрабатывать часть отвечающие за перемещение, захват изображений с камеры и т.п.

Созданный модуль обработки для проекта ОЛИМПИА как раз демонстрирует универсальность созданного программного комплекса PAVICOM. Именно PAVICOM реализует взаимодействие с оборудованием

(возможность перемещения, захвата изображений, получение координат) и основной пользовательский интерфейс, а также синхронизацию работы модулей. При этом обработчик обеспечивает необходимые алгоритмы движения и обработки полученных с камеры изображений, а также дополнительный пользовательский интерфейс. Он задает путь движения при сканировании, затем производит необходимые операции с полученными с камеры изображениями, в случае обработчика для проекта ОЛИМПИА производится сохранение объема отсканированных изображений и соответствующих им координат для архива. Также он обеспечивает необходимый для произведения измерений дополнительный пользовательский интерфейс. Схема взаимодействия модуля с остальной частью программного комплекса представлена на рис. 51. Модуль обработки является динамически загружаемой библиотекой.

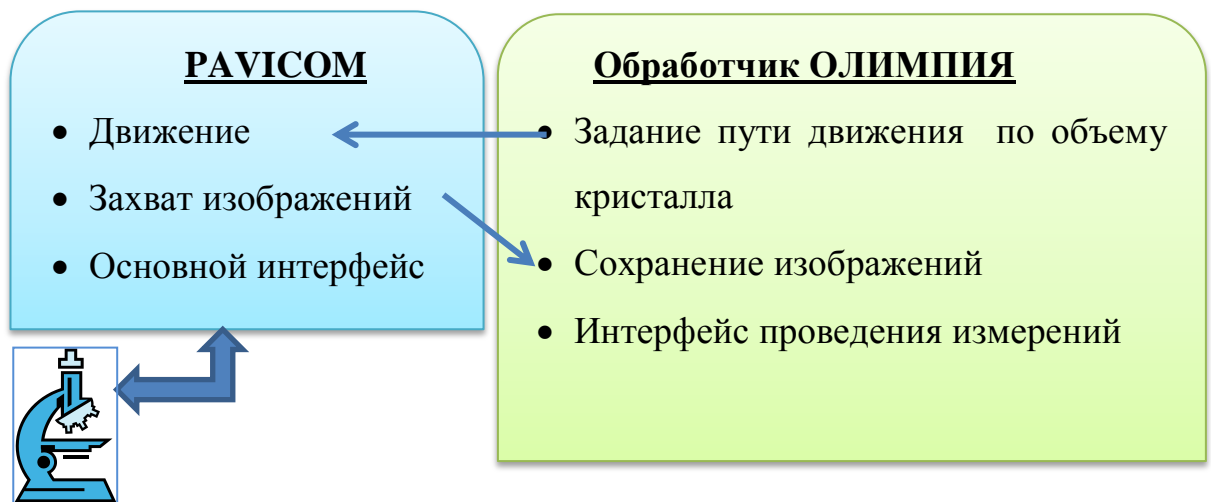


Рис. 51. Взаимодействие модуля обработки эксперимента с программным комплексом RAVICOM на примере модуля обработки проекта ОЛИМПИА. Модуль обработки указывает путь движения при захвате изображений и их дальнейшую обработку. Также он предоставляет специфический пользовательский интерфейс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы над настоящей диссертацией была создана и введена в эксплуатацию установка ПАВИКОМ-3, при создании которой также стояла задача сохранения универсальности при обработке данных. Основной целью ее создания было наладить обработку эмульсионных данных эксперимента OPERA в ФИАН. Выполненная автором успешная сборка, настройка, прецизионная калибровка, установка специального программного обеспечения, создание необходимой инфраструктуры позволила полностью решить поставленную задачу, и сейчас на комплексе идет полномасштабная обработка событий эксперимента OPERA.

Помимо этого создано программное обеспечение для проведения измерений, обработки и накопления базы изображений других трековых детекторов, таких как полимерные детекторы CR-39 и кристаллы оливина.

Одновременно с созданием ПАВИКОМ-3 автором выполнялась разработка программного обеспечения для сканирующих систем нового поколения. Разработанный в лаборатории алгоритм непрерывного сканирования даёт существенный выигрыш в производительности системы, значительно уменьшая время перехода между полями зрения при сканировании. Увеличение скорости сканирования естественно приводит к увеличению потока данных, которые необходимо обрабатывать в реальном времени. Обработка изображений в режиме реального времени требует создания распределенной системы вычислений, использующих такие высокопроизводительные вычислительные ресурсы, как GPU (Graphical Processor Unit – графический процессор).

Автором были разработаны ключевые элементы, позволившие создать распределенную систему обработки. Задействовав вычислительные возможности GPU, 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 позволит увеличить скорость сканирования до $100 \text{ см}^2/\text{час}$, разработанное программное обеспечение позволяет на уже имеющемся оборудовании увеличить скорость сканирования до $40 \text{ см}^2/\text{час}$, при этом осуществляя восстановление треков частиц с наклоном до 45° . Это позволило создать уникальную систему, применимую для обработки данных мюонной радиографии, где требуется восстановление треков в широком диапазоне углов, а накопление достаточной статистики требует обработки большого количества эмульсионных данных, порядка нескольких квадратных метров, в зависимости от исследуемого объекта.

Разработанное программное обеспечение позволило задействовать установку ПАВИКОМ-3 в обработке данных экспериментов ОЛИМПИА и OPERA, медицинских исследований, а также подготовить к обработке данных будущих фотоэмульсионных экспериментов, например, для экспериментов по мюонной радиографии.

Созданные при выполнении диссертационной работы методы являются необходимым этапом полной автоматизации обработки данных современных фотоэмульсионных экспериментов в режиме реального времени в ядерной физике и востребованы рабочими группами как внутри России, так и за рубежом.

Основные положения, выносимые автором на защиту:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

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

В заключение автор считает приятным долгом поблагодарить своих коллег, оказывавших помощь в выполнении данной работы: научного руководителя Полухину Н.Г., сотрудников Александрова А.Б., Гончарову Л.А., Старкова Н.И., Тюкова В. и Щедрину Т.В. за помощь в проведении исследования и измерений, а также Бенеша Б.Н. и Первова Л.С. за помощь и содействие в изготовлении элементов комплекса ПАВИКОМ-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Becquerel H.; C. R. Acad. Sc., 1896, 122, 501 and 1896, 122, 1086.
2. Photographie Corpusculaire, Strasbourg 1-6 Julliet 1957, CNRS, 1958.
3. Csikai J and Szalay A., The effect of neutrino recoil in the beta decay of He⁶. Soviet Phys. JETP, 1959, 35, 749.
4. England J.B.A., Techniques in Nuclear Structure Physics, 1974, Part 1.
5. Childs C.B., Slifkin L.M., Delineating of tracks of Heavy Cosmic Rays and Nuclear Process within Large Crystals of Silver Chloride, Rev.Sci.Instr. 1963, 34, 101.
6. Haase G., Schopper E, and Granzer F, Solid State Nuclear Track Detector: Track forming, stabilizing and development process. In: Proc. 9th Int. Conf. Solid State Nucl. Track Detectors, Munich, and Suppl. I, Nucl. Tracks (eds. F.Granzer et.al.). Pergamon, Oxford, 1978, pp.199-213.
7. Fleischer R.L., Price P.B. and Walker R.M. Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications. University of California Press, Berkeley, 1975.
8. С.Дюррани, Р.Балл «Твердотельные ядерные детекторы» Москва, Энергоатомиздат, 1990.
9. A. H. Becquerel, Comptes Rendus, 1896, 420
10. Hess, V. Über den Ursprung der durchdringenden Strahlung. Phys. Zsch. 1913, 14, 610–617.
11. C.T.R. Wilson, Phil. Trans., 1897, v. 189, 265.
12. Glaser D. A., Some effects of ionizing radiation on the formation of bubbles in liquids, Phys. Rev., 1952, v.87, №4
13. Charpak, G., “Electronic Imaging of Ionizing Radiation with Limited Avalanches in Gases”, in Ekspong, G., ed., Nobel Lectures, Physics 1991 – 1995, World Scientific, Singapore, 1997.
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1992/charpak-lecture.html.
Nobel Lecture, December 8, 1992.
14. Burger G., Frunauer F. and Paretzke H. The applicability of track detectors in neutron dosimetry. In: Proc.Symp. Adv. Rad.Detectors. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1970, paper Sm-143. 17.

15. Fremlin J.H., Abu-Jarad F. Alpha-emitters in the environment. I:Natural sources. Nucl. Instr. Meth. 1980,173, 197-200.
16. Frank A.L., Benton E.V. Active and passive radon-daughter dosimeters using track-etch detectors. Dept. of Physics, Univ. of San Francisco, Tech.Report, 1975, 39.
17. Savvides E., Manolopoulou M., Papastefanou C., Charalambous S. A simple device for measuring radon exhalation from the ground. Int. J. Appl. Radiat. Isotop. 1985, 36, 79-81.
18. Birot A., Adroguer B., Fontan J. Vertical Distribution of Radon 222 in the atmosphere and its use for study of exchange in the lower troposphere. J.Geophysics. Res. 1970, 75, 2373-83.
19. Fowler F.H., Perkins D. H. The possibility of therapeutic applications of beams of negative mesons. Nature, 1961, 189, 524-8.
20. Benton E.V., Curtin S.B., Raju M.R., Tobias C.A. Studies of negative pion beams by means of plastic nuclear track detectors. In: Proc. 7th Int. Colloq. Corpuscular Photography and Visual Solid Detectors, Barselona, 1970, pp. 423-8.
21. B. Pontecorvo, Sov. Phys. JETP, 1957, 6, 429, B. Pontecorvo, Sov. Phys. JETP, 1958, 7, 172, Z. Maki, M. Nakagawa and S. Sakata, Prog. Theor. Phys., 1962, 28, 870.
22. J.N. Bahcall and C. Pena-Garay, Solar models and solar neutrino oscillations, New J. Phys, 2004, 6, 63
23. 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, с.1-3.
24. W. C. Röntgen, On a new kind of rays., Nature, 1896, 53, 274–276
25. Marx, Jay N.; Nygren, David R., The time projection chamber, Physics Today, 1978, Volume 31, Issue 10, pp.46-53
26. Kenneth G. McKay, Electron-Hole Production in Germanium by Alpha-Particles, Phys. Rev., 1951, 84, 829-832
27. Группен К., Детекторы элементарных частиц, 1999
28. Амосов В.В, Гушин Е.М., Сомов С.В., Рябов В.А., Тимофеев М.К., Типографщик Г.И., Исследование многоканального сцинтилляционного детектора, Письма в ЖТФ, 1994, т.20, вып. 22, стр. 1-4

29. Particle Detectors, Physical Review D, July 24, 2008
30. Пауэлл С., Фаулер П., Перкинс Д., Исследование элементарных частиц фотографическим методом, пер. с англ., М., 1962.
31. Fowler P.H., Adams R.V., Cowen V.G., Kidd J.M. The charge spectrum of very heavy cosmic ray nuclei. Proc. Roy.Soc.Lond., 1970, A318, 1-43.
32. Алёшин Ю.Д., Амосов В.В, Баранов В.И.,..., Рябов В.А. и др., Методика поиска и реконструкции нейтринных взаимодействий в фотоэмульсионном детекторе спектрометра СКИФ, ПТЭ, 1997, № 1, стр. 44-50
33. Фейнберг Е.Л., Полухина Н.Г., Котельников К.А. «Полностью автоматизированный измерительный комплекс (ПАВИКОМ) для обработки экспериментального материала трековых детекторов» ЭЧАЯ, 2004, т.35, вып.3, стр.763-787.
34. Рекало М. П. Нейтрино, Киев: Наукова думка, 1986, 9-10.
35. F. Reines, C.L. Cowan, Jr., The Neutrino, Nature, 1956, 178 (4531), 446.
36. G. Danby, J.-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. B. Mistry, M. Schwartz, J. Steinberger Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos. Physical Review Letters, 1962, 9, 36.
37. M. H. Ahn et al. [K2K Collaboration], Phys. Rev. D, 2006, 74, 072003
38. D.G. Michael et al. [MINOS Collaboration], Observation of muon neutrino disappearance with the MINOS detectors and the NuMI neutrino beam, 2006, arXiv:hep-ex/0607088
39. N. Agafonova, A. Aleksandrov et al (OPERA Collaboration), Search for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ oscillation with the OPERA experiment in the CNGS beam, New Journal of Physics, 2012, 14, 033017
40. Ariga A, Ariga T, De Serio M, Di Capua F, Di Crescenzo A. and Sato O., The OPERA decay search procedure, OPERA public note, 2011, 128
<http://operaweb.lngs.infn.it:2080/Opera/publicnotes/note128.pdf>
41. Agafonova N et al (OPERA Collaboration) 2010 Phys. Lett. B 691 138
42. Agafonova N et al (OPERA Collaboration) 2011 New J. Phys. 13 053051
43. Agafonova N et al (OPERA Collaboration) 2011 New J. Phys. 14 013026
44. Agafonova N et al (OPERA Collaboration) JHEP07, 2013, 004

45. CHORUS collaboration, E. Eskut et al., The CHORUS experiment to search for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ oscillation, Nucl. Instrum. Meth. 1997, A 401, 7.
46. T. Nakamura et al., The OPERA film: new nuclear emulsion for large-scale, high-precision experiments, Nucl. Instrum. Meth. 2006, A 556, 80.
47. OPERA collaboration, A. Anokhina et al., Emulsion sheet doublets as interface trackers for the OPERA experiment, JINST, 2008, 3, P07005.
48. C. Gustavino, A. Candela, M. De Deo, M. D’Incecco and R. Moro, Performance of glass RPC operated in streamer mode with four-fold gas mixtures containing SF-6, Nucl. Instrum. Meth. A, 2004, 517, 101.
49. G. Rosa, A. Di Bartolomeo, G. Grella and G. Romano, Automatic analysis of digitized TV-images by a computer- driven optical microscope, Nucl. Instrum. Meth. A, 1997, 394 357.
50. N. Armenise et al., High-speed particle tracking in nuclear emulsion by last-generation automatic microscopes, Nucl. Instrum. Meth. A, 2005, 551, 261.
51. L. Arrabito et al., Hardware performance of a scanning system for high speed analysis of nuclear emulsions, Nucl. Instrum. Meth. A, 2006, 568, 578.
52. L. Arrabito et al., Track reconstruction in the emulsion-lead target of the OPERA experiment using the ESS microscope, JINST, 2007, 2, P05004.
53. K. Morishima, T. Nakano, Development of a new automatic nuclear emulsion scanning system, S-UTS, with continuous 3D tomographic image read-out, Journal of Instrumentation, 2010, 5, P04011
54. Dremin I.M., Ivanov O.V., Kalinin S.A., Kotelnikov K.A., Nechitailo V.A., Polukhina N.G. «Wavelet-Patterns in Nucleus-Nucleus Collisions at 158 A GeV» Phys.Lett. B, 2001, v. 499 (1-2), p.97-103 hep-ph/0007060
55. Полухина Н.Г., докторская диссертация, Москва, ФИАН, 2006.
56. 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.
57. M. Besnier, D. Duchesneau Momentum measurement of charged particles in Emulsion Cloud Chamber using the angular method, OPERA internal note, 2008, 92
58. C.Jollet, A.Meregaglia Muon identification – Electronic detectors and emulsions matching, OPERA internal note, 2010, 101

59. Strutinsky V.M., Nucl. Phys. 1967. V. A95. P. 420.
60. 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, p. 73.
61. 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, p.29.
62. J. Donnelly et al., Proc. of the 26th Int. Cosmic Ray Conf., 1999, OG1.1.30.
63. A.J. Westphal et al., Nature, 1998, v. 396, p. 50. E.V. Binns et al., ApJ, 1989, v. 346, p. 997. P.H. Fowler et al., ApJ, 1987, v. 314, p. 739.
64. Александров, А.В.Багуля, М.С. Владимиров и др. «Зарядовый спектр ядер галактических космических лучей в оливинах из метеоритов» УФН, 2010, том 180, № 8, стр.839-842
65. 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
66. Александров А.Б., кандидатская диссертация, Москва, ФИАН, 2009.
67. A. Aleksandrov, V. Tioukov A novel approach for fast scanning of nuclear emulsions with continuous motion of the microscope stage NIM-A, 2013, Volume 718, Pages 184–185

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 $\nu\tau$ 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