

Учреждение Российской академии наук
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
Лаборатория элементарных частиц

На правах рукописи
УДК 539.1.05, 539.1.07

Александров Андрей Борисович

МЕТОДИКА ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ
ДАННЫХ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Мерзон Габриэль Израилевич

Москва, 2009 г.

Содержание:

| | |
|---|----|
| Введение | 4 |
| Глава I. Современные трековые детекторы ядерных частиц | 8 |
| 1.1. «Классические» трековые детекторы | 8 |
| 1.2. Газоразрядные детекторы заряженных частиц | 10 |
| 1.3. Твердотельные детекторы | 14 |
| 1.4. Роль трековых детекторов | 17 |
| Глава II. Фотоэмульсионный метод ядерных исследований | 20 |
| 2.1. Свойства и применение ядерной фотоэмульсии для регистрации заряженных частиц | 20 |
| 2.2. Существующие методы автоматизированного сканирования ядерных фотоэмульсий | 28 |
| 2.3. Автоматизированный измерительный комплекс ПАВИКОМ | 33 |
| Глава III. Автоматизация измерений на комплексе ПАВИКОМ | 38 |
| 3.1. Требования к программному обеспечению | 38 |
| 3.2. Архитектура программного обеспечения | 41 |
| 3.3. Взаимодействие модулей при сканировании | 43 |
| 3.4. Технические возможности комплекса ПАВИКОМ при автоматизированной обработке | 46 |
| Глава IV. Ядерно-физические исследования на комплексе ПАВИКОМ | 50 |
| 4.1. Применение ПАВИКОМ для обработки данных эксперимента ЕМУ-15 | 50 |
| 4.1.1. Постановка эксперимента | 50 |
| 4.1.2. Измерительная система | 52 |
| 4.1.3. Характеристики ядерной эмульсии | 52 |
| 4.1.4. Постановка задачи обработки | 52 |
| 4.1.5. Видеосъёмка и обработка изображений | 54 |
| 4.1.5.1. Выделение «чёрных» пикселей | 56 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 4.1.5.2. | Фильтрация изображений | 58 |
| 4.1.5.3. | Бинаризация изображений | 60 |
| 4.1.5.4. | Выделение связанных областей (кластеризация) | 60 |
| 4.1.5.5. | Проверка процедуры кластеризации | 61 |
| 4.1.6. | Реконструкция микротреков | 62 |
| 4.1.6.1. | Восстановление микротрека по цепочке кластеров (фитинг) | 63 |
| 4.1.6.2. | Отбор кластеров для фитинга (трекинг) | 64 |
| 4.1.6.3. | Свободный трекинг | 66 |
| 4.1.6.4. | Поиск вершины взаимодействия | 66 |
| 4.1.6.5. | Вершинный трекинг | 68 |
| 4.1.6.6. | Эффективность трекинга | 69 |
| 4.1.7. | Продление микротреков в соседний слой эмульсии | 70 |
| 4.1.7.1. | Метод сшивки двух микротреков (линкинг) | 70 |
| 4.1.7.2. | Сшивка микротреков из двух соседних слоёв эмульсии | 71 |
| 4.1.7.3. | Поиск оси события | 72 |
| 4.1.8. | Реализация методики | 74 |
| 4.2. | Использование комплекса ПАВИКОМ в других ядерно- физических исследованиях. | 76 |
| 4.2.1. | Исследование кластеризации нуклонов в легких ядрах посредством изучения процессов мультифрагментации в эксперименте «БЕККЕРЕЛЬ» | 76 |
| 4.2.2. | Изучение зарядового распределения ядер в космических лучах и поиск сверхтяжелых ядер в оливинах из метеоритов | 77 |
| 4.2.3. | Исследование осцилляций нейтрино: адаптация программного обеспечения ПАВИКОМ для обработки первичных данных эксперимента OPERA | 80 |
| | Заключение | 85 |
| | Список литературы | 87 |

Введение

Трековые детекторы широко используются в экспериментах по физике частиц на протяжении уже многих десятилетий. Столь продолжительная долговечность метода, безусловно связана с уникальным пространственным разрешением и возможностью разделения треков частиц. Простота трековых детекторов также обеспечивает им существенное преимущество перед многими другими системами детектирования. Метод трековых детекторов непрерывно развивается, совершенствуется его методика, и в настоящее время трудно найти такую область науки и техники, где бы он не использовался. Это и физика высоких энергий, и физика космических лучей, реакторная физика, металлургия, геология, археология, медицина, биология, исследования метеоритов и образцов лунных пород.

В этой связи, первостепенное значение приобретают методики, которые должны обеспечить быстрое и качественное извлечение информации из данных, получаемых с помощью трековых детекторов. Просмотр больших площадей детекторов, как правило, с большим увеличением представляет собой достаточно сложную техническую проблему. Обработка данных трековых детекторов, проводившаяся 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 достаточно велика вероятность появления трудно улавливаемых ошибок, поэтому получаемые результаты плохо поддавались проверке на возможные сбои, возникающие в процессе обработки материала (например, потери измерителями следов частиц и другие ошибки).

В последние годы этот недостаток в значительной мере был преодолен благодаря прогрессу, который достигнут в производстве прецизионной техники, и созданию оптических столов с высокой точностью перемещения по командам от компьютеров, широкому применению современных CCD- и CMOS-видеокамер для регистрации и оцифровывания оптических

изображений и вычислительным возможностям современных компьютеров. Благодаря применению этих достижений прецизионной механики, возможностям средств вычислительной техники и разработке необходимого программного математического обеспечения стала реальностью полная автоматизация труда микроскопистов. При измерениях в таком автоматическом режиме оцифрованные изображения следов заряженных частиц и ядер в трековых детекторах, полученные при помощи 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 ее длительностью при использовании так называемых полуавтоматов. Новый метод позволяет обрабатывать большие массивы экспериментальных данных и существенно увеличивать статистику событий, что раньше было практически нереально. Создание подобных автоматизированных комплексов актуально, поскольку оно и позволяет перейти на более высокий уровень проведения экспериментов, использующих трековую технику регистрации частиц, и существенно расширяет круг задач, где эта техника может быть эффективно использована.

Пионером развития автоматизированных комплексов стала Япония, где такой комплекс был создан ещё в середине 80-х гг. Но настоящим толчком к развитию автоматизированных комплексов по всему миру послужило проведение экспериментов CHORUS и DONUT, использующих значительные объёмы ядерной фотоэмульсии. В настоящее время только в эксперименте OPERA задействованы сотни тонн ядерной фотоэмульсии, что соответствует сотням тысяч квадратных метров поверхности эмульсии. Всего в мире в настоящее время действует около 40 автоматизированных комплексов, в том числе 20 – в Европе, где в последние годы число таких комплексов стремительно растёт.

В России имеется единственный комплекс подобного уровня, удовлетворяющий современным мировым стандартам. Это высокотехнологичный Полностью Автоматизированный Измерительный КОМПлекс (ПАВИКОМ). Он предназначен для обработки данных эмульсионных и твердотельных трековых детекторов, используемых в различных физических исследованиях.

Данная диссертационная работа нацелена на развитие новых методов автоматизации измерений на комплексе ПАВИКОМ, а также на развитие методов обработки данных различных трековых детекторов. С помощью этих методов удалось существенно увеличить скорость и качество обработки трековых детекторов.

Комплекс ПАВИКОМ изначально создавался для обработки событий, зарегистрированных с помощью ядерных фотоэмульсий, облученных пучком ядер свинца с энергией 158 ГэВ/нуклон на ускорителе SPS (ЦЕРН) в рамках эксперимента EMU-15. Основным направлением исследования этого эксперимента является поиск возможных сигналов образования кварк-глюонной плазмы при сверхвысоких температурах в сверхплотных состояниях материи. В ходе обработки данных эксперимента возникла необходимость в разработке и реализации метода поиска микротреков в эмульсии.

Уникальным достоинством комплекса ПАВИКОМ является универсальность – на его автоматизированных установках обрабатываются и ядерные эмульсии, и пластиковые детекторы, и кристаллы оливинов из метеоритов. В ряду нескольких экспериментов на комплексе производится обработка данных эксперимента БЕККЕРЕЛЬ, целью которого является изучение процессов фрагментации и кластеризации лёгких ядер с энергией выше 1 ГэВ/нуклон.

В 2005 г. на ПАВИКОМ начата реализация проекта ОЛИМПИЯ («Оливины из метеоритов – поиск тяжелых и сверхтяжелых ядер») задачей которого являются исследования тяжелых и сверхтяжелых ядер в космических лучах и поиск среди них трансфермиевых ядер с зарядами $Z \geq$

110. Особенностью методики обработки трековых детекторов данного эксперимента, оливинов из метеоритов, является необходимость в шлифовке – необратимом разрушении части кристалла. В рамках проекта ОЛИМПИЯ потребовалось создание методики сканирования всей площади кристалла и создание базы данных изображений для сохранения информации о треках в кристалле.

Свидетельством международного признания высокого потенциала группы ПАВИКОМ является включение ПАВИКОМ в число европейских автоматизированных центров по обработке эмульсии эксперимента OPERA. Адаптация комплекса ПАВИКОМ к задачам эксперимента потребовала возможности использовать стандартную для OPERA библиотеку обработки изображений и поиска микротреков в эмульсии – FEDRA, а также разработки методики сканирования двухсторонних ядерных фотоэмульсий.

Глава I

Современные трековые детекторы ядерных частиц

1.1. «Классические» трековые детекторы

В 1895 году, исследуя катодные лучи, В. Рентген обнаружил неизвестный вид излучения [1], 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 уран он завернул флюоресцирующий уранилсульфат калия в непрозрачный материал вместе с фотопластинками и обнаружил, что они были полностью засвечены [2]. Фактически с этого момента и началось развитие метода трековых детекторов. С тех пор уже более ста лет физики придумывают все новые и новые приборы для изучения элементарных частиц – мельчайших единиц материи.

Частицы и излучения могут быть зарегистрированы благодаря их взаимодействию со средой. Заряженные частицы взаимодействуют с веществом, в первую очередь, через процессы ионизации и возбуждения атомов и молекул. Для регистрации же нейтральных (незаряженных) частиц их необходимо сначала преобразовать в заряженные через посредство некоторого физического процесса.

Первые трековые детекторы были чрезвычайно просты: это были обычные фотографические пластинки, применяемые фотографами того времени, а также электроскопы. В 1911-1913 годах В. Гесс провел серию азростатных экспериментов [3] 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 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 Ч. Вильсоном [4], 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 и усовершенствована в начале 1950-х годов Д. Глезером [5]. Исходя из аналогии с камерой Вильсона, он нашел иной фазовый переход, который тоже позволяет визуализировать следы частиц. В его приборе используется перегретая жидкость, которая вскипает вблизи центров зародышеобразования, которыми служат локальные участки энерговыделения ≥ 0.1 кэВ на траектории частицы в перегретой жидкости. Проходя через такую среду, частица оставляет за собой след из пузырьков.

Оба эти прибора принесли их создателям Нобелевские премии и дали исследователям возможность почти что «воочию» наблюдать ядерные процессы. Камеры Вильсона и пузырьковые камеры позволяют непосредственно наблюдать следы частиц. Это означает, что 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 которой обратно пропорциональна их импульсу. При этом положительно и отрицательно заряженные частицы отклоняются в разных направлениях. Таким образом, в дополнение к

пространственной картине, которую дают эти приборы, они позволяют измерить импульс частицы и определить знак ее заряда.

Особое место в ряду классических трековых детекторов благодаря своему высокому пространственному разрешению (порядка 1 мкм) занимают ядерные фотоэмульсии, которые подробно рассматриваются в Главе II.

1.2. Газоразрядные детекторы заряженных частиц

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. Режим работы газоразрядных детекторов определяется напряжением на электродах [6] (Рис. 1.1). 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 процессах, возникающих в газоразрядных детекторах, важную роль имеет значение и характер (постоянный или импульсный) приложенного напряжения, а также состав газа-наполнителя. Если на электроды детектора подано небольшое постоянное напряжение, при котором дополнительная ионизация за счёт соударения первичных электронов с нейтральными атомами и молекулами

отсутствует, то он действует как ионизационная камера. Недостатком этого режима являются очень низкие токи, т.е. малая амплитуда выходного сигнала. От такого недостатка свободны газоразрядные детекторы с газовым усилением. Это позволяет регистрировать даже частицы с энергией < 10 кэВ, в то время как сигналы от частиц таких энергий в ионизационных камерах "тонут" в шумах усилителя, достигающих 10 - 100 кэВ.

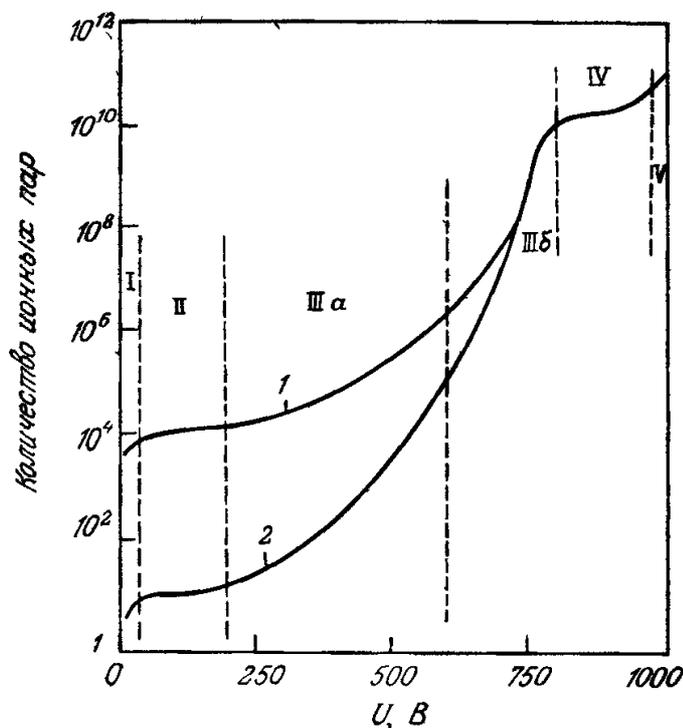


Рис. 1.1. Зависимость коэффициента газового усиления от приложенного напряжения для α -частиц и электронов. 1 – α -частицы, 2 – электроны. I – область рекомбинации, II – режим ионизационной камеры, IIIа – область пропорциональности, IIIб – область ограниченной пропорциональности, IV – режим Гейгера, V – область газового разряда.

Газовое усиление – это увеличение числа свободных зарядов в объёме детектора за счёт того, что первичные электроны на своём пути к аноду в больших электрических полях приобретают энергию достаточную для ударной ионизации нейтральных атомов и молекул рабочей среды детектора. Возникшие при этом вторичные электроны в свою очередь успевают приобрести энергию, достаточную для ионизации ударом. Таким образом, к аноду движется нарастающая электронная лавина. Это «самоусиление»

электронного тока (коэффициент газового усиления может достигать 10^3 — 10^4 и выше). Такой режим работы характерен для пропорционального счётчика (камеры). В названии отражен тот факт, что в этом приборе амплитуда импульса тока или полный собранный заряд остаются пропорциональными энергии, затраченной заряженной частицей на ионизацию среды детектора.

В 1968 году Ж. Шарпак [7] 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 (сплошными или проволочными), параллельными друг другу и аноду. В типичном случае анодные проволочки удалены друг от друга и от катодов на расстояния 2 мм и 8 мм, соответственно. Разность потенциалов между анодом и катодом составляет несколько киловольт. Такие 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. Для определения трёхмерных координат частицы используются системы из десятков параллельно одна другой МПК площадью до 10 м^2 с общим числом проволочек до нескольких десятков тысяч, причём проволочки соседних МПК натягиваются взаимно перпендикулярно. 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. Разработка МПК Шарпаком была отмечена 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. Расстояние между проволочками в МДК обычно достигает нескольких сантиметров. В отличие от пропорциональной камеры в дрейфовой камере создаётся однородное электрическое поле. Отсчет времени дрейфа включается 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. Напряжённость поля в дрейфовом промежутке ~ 1 кВ/см. 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. Дрейфовые камеры могут быть плоскими, цилиндрическими и сферическими. Плоские и цилиндрические дрейфовые камеры больших размеров используются в экспериментах на ускорителях высоких энергий.

Времяпроекционная камера (ВПК), разработанная Д. Найгреном [8], 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 объема, 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. Времяпроекции 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 и 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.

1.3. Твердотельные детекторы

Твердотельные (полупроводниковые) детекторы известны с середины 20-го века. В одной из пионерских работ [9] показано, что α -частицы, пролетающие сквозь обратный 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 [10]. 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 то же время, 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 опознавания частиц. Однако при пересечении заряженной частицей шайбы с оптическими волокнами в них возникают сцинтилляционные или черенковские световые вспышки. Свет распространяется по оптоволокну как по световоду и регистрируется на его торце с помощью электронно-оптического усилителя [11-14]. Пространственное разрешение таких детекторов определяется диаметром оптоволоконных нитей, который обычно составляет 20 - 1000 мкм.

Существует еще один тип твердотельного детектора, который можно причислить к трековым. Его действие основано на том, что частицы, имеющие высокий электрический заряд, разрушают локальную структуру твёрдого тела вдоль своей траектории [10]. Это локальное разрушение можно интенсифицировать последующим травлением, благодаря чему след удастся визуализовать. 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 зависит 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, образованных, например, первичными космическими лучами. 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 [10,11]. 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 [17].

1.4. Роль трековых детекторов

Трековые детекторы и в их числе ядерные фотоэмульсии сыграли выдающуюся роль в развитии ядерной физики в силу наглядности и возможности получения исчерпывающей пространственной картины изучаемых процессов. Благодаря этим детекторам были открыты ядерные распады и реакции, новые частицы (позитрон, мюон, заряженные пионы, странные и очарованные частицы).

Важное место среди разнообразных детекторов занимают детекторы нейтрино – частиц, не участвующих ни в сильном, ни в электромагнитном взаимодействиях. Проникающая способность нейтрино колоссальна, их поток может проходить слой свинца в тысячи астрономических единиц. Вероятность взаимодействия нейтрино с веществом на много порядков ниже, чем у заряженных частиц. 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). Широкую известность получили детекторы солнечных нейтрино - Homestake (хлор-аргонный детектор Дэвиса, США), Kamiokande (Япония), а также российские галлий-германиевый детектор в Баксане и установка «Байкал» в прозрачных водах одноименного озера.

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 [18]. С использованием трековых детекторов получают информацию о распространении важнейших с радиологической точки зрения α -излучающих природных ядер инертных газов ^{222}Rn и ^{230}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 [19]. Контроль времени облучения радоном шахтеров на урановых рудниках проводится с использованием полосок нитрата целлюлозы, закрепляемых на касках [20]. Метод регистрации α -частиц радона использовался для предсказания землетрясений, поскольку, как было замечено, повышение сейсмической активности в период подготовки землетрясений часто сопровождается возникновением трещин и напряжений с выделением радона от содержащихся в земной коре урана и тория [21]. Трековая методика также применяется при изучении процессов обмена в тропосфере, где в качестве индикатора используется радон [22]. Трековые детекторы используются в пучках отрицательных пионов в радиотерапии для изучения событий с

высокими линейными потерями энергии [23, 24].

Таблица 1. Характеристики различных трековых детекторов [25].

| Название | Пространственное разрешение, <i>мкм</i> | 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 |

Глава II

Фотоэмульсионный метод ядерных исследований

2.1. Свойства ядерной фотоэмульсии и ее применение для регистрации частиц

Ядерная фотоэмульсия (ЯФЭ) является примером трекового детектора с уникально высоким (≈ 1 мкм) пространственным разрешением (таблица 1). Ее первым применением в ядерной физике можно считать исследования А. А. Беккереля, который в 1896 обнаружил радиоактивность солей урана по вызываемому ими почернению фотопластинки. В 1910 японский физик С. Киношита [26] показал, что зёрна галогенида серебра обычной фотоэмульсии становятся способными к проявлению, если через них прошла хотя бы одна α -частица. В 1927 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.

Ядерные фотоэмульсии были одним из самых 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 $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ [26].

С 1945 по 1955 методом ЯФЭ были сделаны важнейшие открытия в физике элементарных частиц: зарегистрированы π -мезоны (пионы) и последовательности распадов $\pi \rightarrow \mu + \nu$, $\mu \rightarrow e + \nu + \nu$ в ЯФЭ, 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 [27]; 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 при измерении малых времён жизни ЯФЭ служили и мишенью, и вершинным детектором, а вслед за эмульсией располагался электронный детектор, который давал трековую информацию о нужном событии (целеуказание) [28]. Эта информация использовалась затем для нахождения примерного местоположения исследуемого события, что существенно облегчало поиск и позволяла быстрее завершить визуальную обработку ЯФЭ. 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, а толщина слоя, как правило, в 10—100 раз больше, чем у обычной фотографической эмульсии. Толщина ЯФЭ, порой, достигает 1000—2000 *мкм* и более (стандартная толщина фирменных ЯФЭ — 100 - 600 *мкм*).

Ядерная фотоэмульсия состоит из большого числа мелких кристаллов галоидного серебра сферической или кубической формы, распределённых в желатине. Линейные размеры кристаллов колеблются в пределах от ~ 0.1 до

1.0 мкм. Если эмульсия подвергается воздействию света или через неё пролетает ионизирующая частица, то в некоторых зёрнах возникают изменения структуры (дефекты) т.е, появляется скрытое изображение. После пропитывания эмульсии раствором специального восстановителя (проявителя), эти зёрна превращаются в частички металлического серебра. 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 ($\leq 1\text{ мкм}$) 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 $< 1\text{ мкм}$, что для релятивистской частицы соответствует временам пролёта $< 10^{-16}\text{ с}$). 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), подробно 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 зёрен 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, однократно заряженные релятивистские частицы создают на 100 *мкм* следа 30—40 зёрен серебра [29]. Эти следы хорошо видны, если их рассматривать в микроскоп. Они различаются своей 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 :

$$T_p = \alpha R_p^n \quad (2.1)$$

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 (2.1)

определить его энергию. Формула (2.1) легко обобщается на частицы любой массы m и заряда z :

$$T = \alpha \left(\frac{m}{m_p} \right)^{1-n} z^{2n} R^n \quad (2.2)$$

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:

$$g = \frac{dN}{dR} \sim \frac{dT}{dR} = z^2 f(v) \sim \frac{z^2}{v^2} \quad (2.3)$$

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 (2.3) 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:

$$\frac{m_1}{m_2} = \left(\frac{R_1}{R_2} = \frac{N_1}{N_2} \right) \Bigg|_{\substack{v_1=v_2 \\ z_1=z_2}}, \quad (2.4)$$

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 (2.2) 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:

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

где x – длина (в мкм) отрезка траектории, на котором измеряется угол; p – импульс ($p\beta c$ измеряется в МэВ). Из формулы (2.5) 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:

$$N_\delta = n_e \sigma_\delta = \frac{2\pi z^2 e^4}{m_e v^2} n_e \int_{T_e^{\min}}^{T_e^{\max}} \frac{dT_e}{T_e^2} =$$

$$= \frac{2\pi \pi^4 z^2}{m_e v^2} n_e \left[\frac{1}{T_e^{\min}} - \frac{1}{T_e^{\max}} \right], \quad (2.6)$$

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

$$T_e^{\max} = \frac{4m_e M}{(M + m_e)^2} T \approx \frac{4m_e}{M} T. \quad (2.7)$$

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:

$$\theta \approx \frac{x}{p} eH, \quad (2.8)$$

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

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.

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 прилёта 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, а следовательно, получить полную информацию, необходимую для определения дифференциальных сечений исследуемых реакций.

Таблица 2. Эксперименты, использующие большие объёмы ЯФЭ [30-32].

| 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 |

ЯФЭ широко используются в целом ряде экспериментов проводимых физиками Европы, Америки, Азии. Самые крупные из них могут содержать тонны ЯФЭ, что соответствует тысячам квадратных метров поверхности эмульсии (Таблица 2).

2.2. Существующие методы автоматизированного сканирования ядерных фотоэмульсий

При многих своих очевидных преимуществах фотоэмульсионный метод имеет и серьёзный недостаток. Его применение связано с тяжёлым и изнурительным трудом при нахождении нужных треков и проведении измерений их параметров в ЯФЭ. Вплоть до последнего времени эта работа выполнялась визуально на оптических микроскопах с большим увеличением и с применением иммерсионного масла, что требовало привлечения высококвалифицированного и хорошо обученного персонала. При этом скорость измерений оказывалась невысокой, что определяло низкую статистику обработанных событий. Кроме того, получаемые результаты с

трудом поддавались проверке на возможные ошибки, возникающие в процессе обработки экспериментального материала. Эта проблема в значительной мере была решена благодаря прогрессу, достигнутому в последние годы в производстве оптических столов с высокой точностью перемещения, возможностью компьютерного управления, а также широкому применению современных CCD- и CMOS-видеокамер для оцифровки оптических изображений, и вычислительным возможностям современных компьютеров. Всё это позволило осуществить полную автоматизацию труда микроскопистов и ускорить процесс обработки материала приблизительно на три порядка, по сравнению с его длительностью при использовании полуавтоматических микроскопов [29]. По мере роста масштаба применения ЯФЭ в современных экспериментах необходимость использования компьютерной автоматизации и разработки специализированных комплексов становилась всё более и более очевидна.

Впервые задача автоматической оцифровки больших массивов трековой информации возникла ещё в 1960-е годы при обработке снимков пузырьковых камер, экспонированных в пучках ускорителей высокой энергии [33]. Однако автоматизированная обработка треков в ЯФЭ значительно более сложна и имеет следующие особенности.

1. Изображения следов в ЯФЭ представляют собой микрофотографии, требующие большого увеличения, т.е. применения микроскопов и, следовательно, прецизионной (субмикронной) точности сканирования.
2. Изображения треков в ЯФЭ представляют собой не плоские, а пространственные объекты.
3. При работе с ЯФЭ приходится проследивать прохождение следов из одного слоя эмульсии в другой, т.е. «сшивать» изображения следов в разных слоях.
4. Фоновые условия при сканировании следов в ЯФЭ значительно тяжелее, чем на снимках пузырьковых камер.
5. Необходимо учитывать усадку ЯФЭ, которая может меняться от слоя к слою.

Поэтому обработка трековой информации в ЯФЭ имеет свою особую специфику и на нее невозможно перенести методы, разработанные для пузырьковых камер.

Первая полностью автоматизированная сканирующая система была создана в Нагойя (Япония) [34-36] в 1982 г. Она состояла из микроскопа, столик и объектив которого приводились в движение специальными моторами, управляемыми компьютером; быстрой CCD-камеры и специального оборудования Track Selector (TS) для обработки.

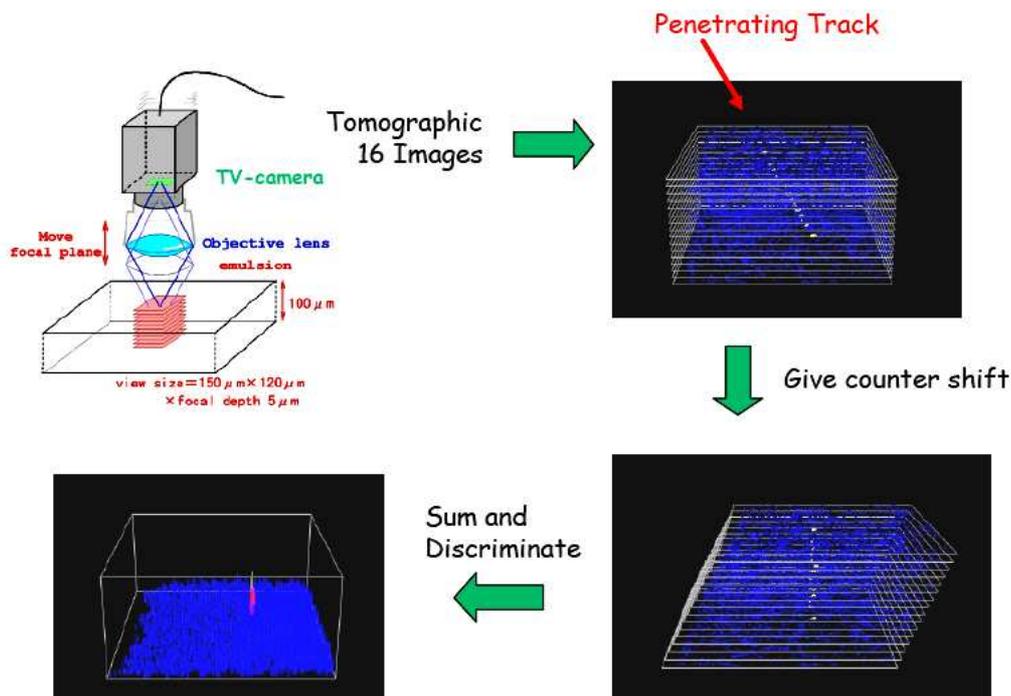


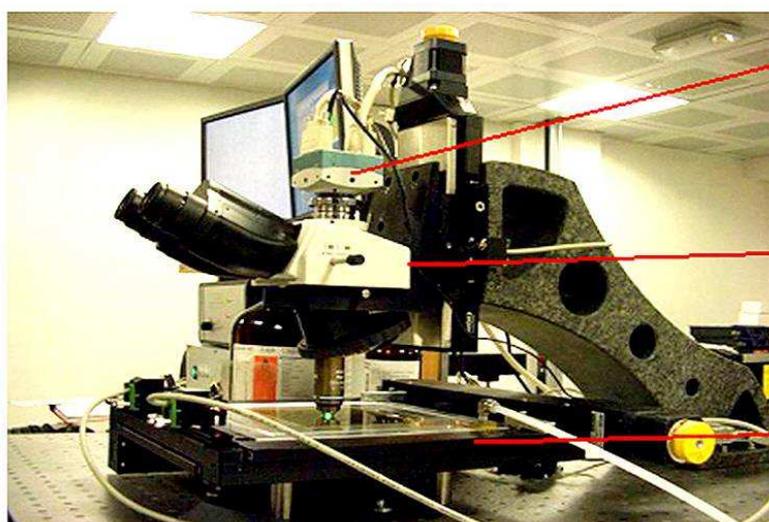
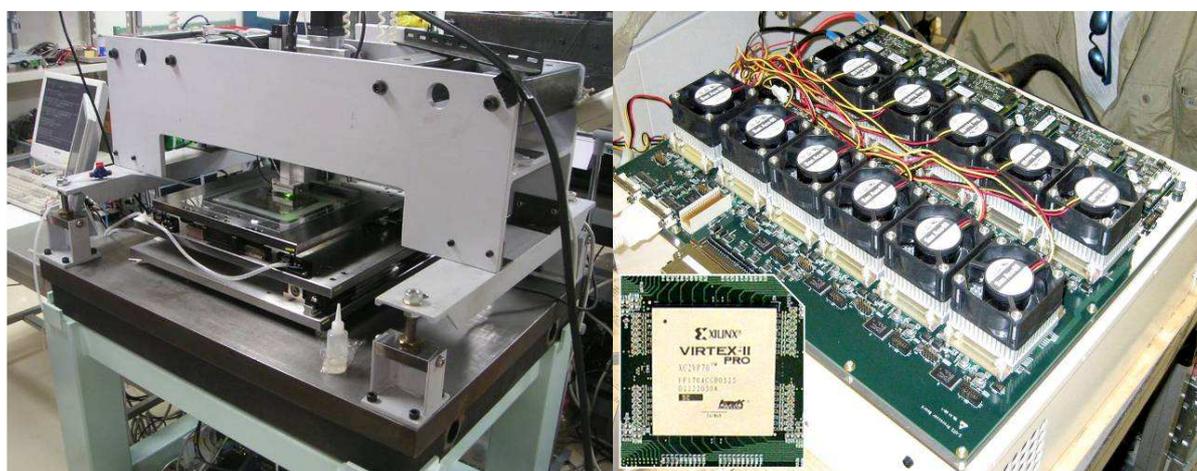
Рис. 2.1 Алгоритм работы Track Selector.

Алгоритм работы TS, разработанный профессором Нива в 1974 г. [37], прост (Рис. 2.1):

1. В память загружаются 16 изображений, снятых с шагом по глубине 5 мкм.
2. Изображения сдвигаются друг относительно друга в соответствии с заданными углами φ_x и φ_y , отсчитываемыми от вертикальной оси z в плоскостях XZ и YZ .
3. Область перекрытия изображений суммируется попиксельно.
4. Для отделения треков от фона из гистограммы, полученной в п. 3, вычитается пороговое значение, разделяющее треки и фон.

Таким образом, за один цикл работы TS находит треки, идущие под заданными углами φ_x и φ_y . Повторение операции для других значений углов позволяет найти все интересующие экспериментатора треки.

Первым примером полномасштабного применения системы TS стала обработка данных эксперимента CHORUS [36]. Последующая модернизация применительно к экспериментам DONUT и OPERA позволила существенно увеличить скорость обработки ЯФЭ (Таблица 3). При этом алгоритм поиска треков остался неизменным. Эффективность поиска треков с помощью системы TS в эмульсии эксперимента CHORUS составляет 98.5% [34].



Камера

Подвижная
оптическая система

Прецизионный столик

Рис. 2.2. Вверху: Внешний вид японской автоматизированной сканирующей системы (слева) и платы распознавания треков в эмульсии SUTS (справа). Внизу: Внешний вид сканирующего комплекса в лаборатории Гран-Сассо, Италия.

Обладая чрезвычайно высоким быстродействием и высокой эффективностью распознавания треков, система, TS имеет вместе с тем и существенный недостаток: при изменении условий эксперимента, и/или характеристик эмульсии требуется дорогостоящая разработка и изготовление нового процессора. В отличие от этого, в автоматизированных системах для обработки трековых детекторов, используемых в Европе, основная часть обработки изображения выполняется специальным программным обеспечением, что делает эти системы более гибкими в смысле адаптации к различным условиям задач.

Таблица 3. Развитие японской системы Track Selector для автоматизированного сканирования ЯФЭ.

| Система | Дата | Скорость сканирования (все углы) | Эксперимент |
|---------|------|-------------------------------------|--------------------|
| TS | 1994 | 0.5 мм ² /ч | CHORUS |
| NTS | 1996 | 16 мм ² /ч | CHORUS |
| UTS | 1998 | 2 см ² /ч | DONUT/CHORUS |
| SUTS | 2001 | 20 см ² /ч | OPERA/DONUT/CHORUS |

«Европейская Сканирующая Система» (ESS) [38-42] (рис. 2.2), разработанная в рамках эксперимента OPERA, использует коммерчески доступное оборудование. Она включает в свой состав микроскоп, управляемый персональным компьютером, CMOS-видеокамеру Mikrotron MC1310, а также специализированную плату регистрации и обработки Matrox Odyssey XPro. Программное обеспечение написано на языке C++ и оптимизировано для работы в многопроцессорных вычислительных системах для одновременного выполнения нескольких различных задач (потоков):

- Поток 1 передвигает оптическую систему вдоль вертикальной оси во время регистрации изображений.
- Поток 2 регистрирует изображения.
- Поток 3 обрабатывает изображения.
- Поток 4 производит поиск нужных треков среди этих изображений.

Несмотря на различие подходов обе указанные системы обеспечивают примерно одинаковую скорость измерения треков заряженных частиц в эмульсии (~20 см²/час) и почти одинаковую эффективность: 95% для ESS и 97% для SUTS.

2.3. Автоматизированный измерительный комплекс ПАВИКОМ

В России имеется единственный комплекс подобного уровня, удовлетворяющий современным мировым стандартам – это высокотехнологичный **Полностью Автоматизированный Измерительный КОМПлекс** (ПАВИКОМ) [29,33]. Он состоит из двух автоматизированных микроскопов и создан в Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН (ФИАН). Комплекс предназначен для обработки данных эмульсионных и твердотельных трековых детекторов, используемых в различных физических исследованиях. В комплексе ПАВИКОМ используются два типа промышленных плат оцифровки изображения: система VS-СТТ и Matrox Odyssey XPro, с помощью которых производится оцифровка и первичная обработка видеоизображения. Весь последующий анализ изображений, как и в европейских системах, выполняется с помощью специально разработанного программного обеспечения. Особенностью комплекса ПАВИКОМ, его главным отличием от всех других систем и основным достоинством является универсальность: на автоматизированных установках комплекса успешно обрабатываются и ядерные эмульсии [43-51], и пластиковые детекторы [50-53], кристаллы оливинов из метеоритов [17] и рентгеновские плёнки [54,55]. Таким образом, ПАВИКОМ – это уникальный высокоэффективный измерительный комплекс для обработки экспериментального материала, полученного в исследованиях с применением эмульсионных и твердотельных детекторов.

Измерительный комплекс ПАВИКОМ был создан в 2000 году группой сотрудников Физического института им. П.Н.Лебедева [29]. ПАВИКОМ

создавался и используется для высокотехнологичной обработки данных экспериментов по ядерной физике, физике космических лучей и физике высоких энергий. Здесь в полностью автоматизированном режиме осуществляется поиск и оцифровка координат треков заряженных частиц в материале детектора; распознавание и прослеживание треков с помощью ЭВМ; систематизация и первичная обработка данных. При сканировании детекторов на установках, входящих в состав ПАВИКОМ, в автоматическом режиме выполняются следующие действия:

1. Перемещение стола и контроль глубины фокуса объектива:
 - Изменение поля зрения, т.е. перемещение стола в плоскости, перпендикулярной оптической оси микроскопа;
 - Изменение 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, масштабирование, выбор порога, отделяющего фон от сигнала и др.);
 - распознавание образов, т.е. определение пространственных характеристик и анализ формы трека.

ПАВИКОМ состоит из двух независимых полностью автоматизированных установок ПАВИКОМ-1 и ПАВИКОМ-2, различающихся, прежде всего, пределами перемещения оптических столов,

и, соответственно, допустимыми размерами образцов, подлежащих обработке. Характеристики микроскопов приведены в таблице 4.

Таблица 4. Характеристики микроскопов комплекса ПАВИКОМ.

| | ПАВИКОМ-1 | ПАВИКОМ-2 |
|---|-----------------|----------------|
| Диапазон перемещения стола и объектива микроскопа, мм | 800 × 400 × 200 | 120 × 100 × 10 |
| Точность измерения координат, мкм | 0.5 | 0.25 |
| Максимальный размер изображения | 1360 × 1024 | 1280 × 1024 |
| Максимальная глубина цвета, бит | 10 | 10 |
| Максимальное количество кадров в секунду | 30 | 500 |

Установка ПАВИКОМ-1 содержит следующие основные узлы (рис. 2.3):

- Автоматический прецизионный стол фирмы MICOS (Германия);
- Контроллер управления прецизионным столом;
- Оптическую систему, комплектация которой осуществляется в соответствии с поставленной физической задачей;
- CCD-видеокамеру VS-СТТ фирмы «Видеоскан»;
- Персональный компьютер.

Прецизионная механическая система MICOS состоит из массивной металлической платформы и подвижного предметного стола, пределы перемещения которого в горизонтальной плоскости составляют 400 мм × 800 мм. Над столом закреплена CCD-камера, имеющая возможность вертикального перемещения в пределах 0÷200 мм. Координаты по всем трем осям измеряются с точностью 0.5 мкм. Перемещение оптического стола и вертикальной линейки осуществляется шаговыми двигателями, управляемыми контроллером, на который поступают команды от компьютера или джойстика (при ручном управлении). Оптическая система микроскопа была создана в ФИАНе с использованием элементной базы ЛОМО. Оптика микроскопа проектирует изображение объекта на CCD-матрицу системы VS-СТТ ICX205 фирмы «Видеоскан», обеспечивающую ввод оцифрованных высококачественных изображений в персональный

компьютер. Эта система обладает следующими характеристиками: 1024 уровня «градаций серого»; матрица CCD-камеры имеет 1360×1024 пикселей; размером 4.65 мкм^2 каждый. В обязанности оператора входит размещение на столе фотопластинки, фотопленки или образца из пластика и их вакуумный прижим. Установка размещена в «чистой» комнате со стеклянными стенами.



Рис. 2.3. Слева: Установка ПАВИКОМ-1: автоматический прецизионный стол фирмы MICOS с оптической системой, комплектуемой в соответствии с поставленной физической задачей; персональный компьютер осуществляет управление перемещениями стола и подхват видеоизображения, формируемого CCD-матрицей системы VS-СТТ фирмы «Видеоскан». Справа: Установка ПАВИКОМ-2: на микроскопе ЛОМО МПЭ-11 смонтирован просмотрный стол фирмы Carl Zeiss с управлением через контроллер MCU-26 и CMOS-видеокамера Mikrotron MC-1310.

Автоматизированный микроскоп ПАВИКОМ-2 (рис. 2.3) создан на базе микроскопа МПЭ-11, производства ЛОМО. ПАВИКОМ-2 содержит следующие основные узлы:

- Микроскоп ЛОМО МПЭ-11;
- Прецизионный стол Carl Zeiss;
- Контроллер управления прецизионным столом MCU-26;
- Цифровую CMOS-видеокамеру Mikrotron MC-1310;
- Персональный компьютер, оборудованный платой обработки изображений Matrox Odyssey XPro.

Пределы автоматического перемещения столика по осям X и Y составляют, соответственно, 0 - 120 мм и 0 - 100 мм, пределы перемещения по вертикальной координате – около 1 см. Перемещение оптического столика по всем координатам осуществляется шаговыми двигателями, управляемыми контроллером, на который поступают команды от компьютера. Точность измерения координат по всем осям достигает 0.25 мкм. Матрица CMOS-видеокамеры Mikrotron MC-1310 имеет размеры 1280 × 1024 пикселей и глубину цвета до 10 бит (1024 градаций серого) и позволяет регистрировать изображения со скоростью до 500 кадров в секунду.

Математическая обработка оцифрованных изображений осуществляется с помощью компьютера со скоростью до 500 кадров с⁻¹ с использованием библиотеки программ обработки изображений, написанных на языке C++. Изображение в CMOS-видеокамере создаётся объективом микроскопа. Аналоговый видеосигнал, формируемый видеокамерой, подаётся на вход карты Matrox Odyssey XPro захвата, оцифровки и обработки изображения.

При такой обработке выполняется поиск и распознавание образов измеряемых объектов, пространственное восстановление следов частиц, определение их координат, определение координат точек взаимодействия и другие операции. При этом специальный пакет программ используется для управления движением столов в процессе измерений.

Автором настоящей диссертации были решены задачи создания программного обеспечения для автоматизации измерений на микроскопе ПАВИКОМ-2 и создания библиотек программ для автоматизированной обработки данных эксперимента EMU-15.

Глава III

Автоматизация измерений на комплексе ПАВИКОМ

ПАВИКОМ

3.1. Требования к программному обеспечению

При создании комплекса ПАВИКОМ был использован опыт европейских физиков, поэтому ПАВИКОМ-2 имеет стандартный для микроскопов подобного рода набор компонентов: оптическую систему, прецизионный столик с возможностью управления через компьютер, быструю видеокамеру и персональный компьютер. Все эти компоненты являются коммерчески доступными продуктами и не разрабатывались специально для применения в автоматизированных комплексах. Задача программы автоматизации – добиться того, чтобы все изначально независимые компоненты микроскопа работали согласованно, как одно целое. Схематично компоненты микроскопа и связи между ними представлены на рис 3.1

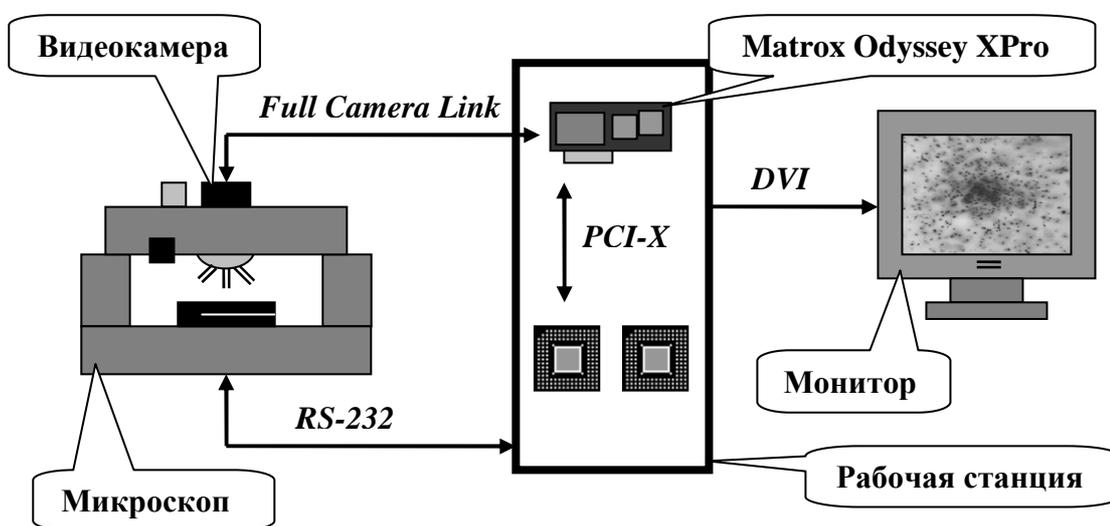


Рис. 3.1. Компоненты микроскопа ПАВИКОМ-2.

К современному программному обеспечению для автоматизации измерений на комплексах, подобных ПАВИКОМ, предъявляются весьма жесткие требования. Это связано, в первую очередь, с необходимостью проводить измерения с максимально возможной скоростью. Согласованное

взаимодействие компонентов сканирующей системы предоставляет новые возможности, недоступные полуавтоматическим системам: безостановочное сканирование и обработка изображений в режиме реального времени. При безостановочном сканировании изображения регистрируются не в статическом положении объектива, а во время его движения с постоянной скоростью. Это даёт существенный выигрыш в производительности системы, так как отсутствует необходимость в многократных циклах ускорения--замедления объектива, что, в свою очередь, положительно сказывается на точности измерений и уменьшает износ оборудования сканирующей системы. 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). Примером может служить система с механизмом автоматической фокусировки при движении вдоль исследуемого трека [45].

Универсальность комплекса ПАВИКОМ предъявляет к программному обеспечению ещё большие требования. Необходимость сканирования различных типов детекторов заставляет программное обеспечение быть независимым от конкретного представления треков (цепочки зерен металлического серебра в ЯФЭ, конусы травления в образце и т.п.), а возможность использования в обработке данных различных экспериментов требует независимости от моделей обрабатываемых данных (треки с одной общей вершиной в EMU-15 или сложные цепочки распадов в OPERA).

Оборудование автоматизированных комплексов постоянно совершенствуется и, со временем, может возникнуть необходимость замены видеокамеры или прецизионного столика на более современные, или даже полной замены микроскопа. Программные интерфейсы видеокамеры или

контроллера прецизионного стола могут при этом оказаться несовместимыми с существующими, что неизбежно приведёт к необходимости адаптации программного обеспечения к новому оборудованию. Было бы нерационально в этом случае разрабатывать новую программу. 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 систем в автоматизированных сканирующих комплексах позволяет существенно повысить их производительность за счёт одновременного выполнения различных задач. И здесь комплекс ПАВИКОМ не исключение: он использует двухпроцессорную рабочую станцию на базе процессоров Intel Xeon с поддержкой технологии Hyperthreading. 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. Другой способ увеличения вычислительной мощности системы для решения трудоёмких вычислительных задач заключается в объединении двух и более компьютеров в общую сеть. Вычислительная нагрузка при этом распределяется между всеми компьютерами сети.

Итак, требования к программному обеспечению комплекса ПАВИКОМ, были сформулированы следующим образом:

- 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.

3.2. Архитектура программного обеспечения

Для реализации приведённых выше требований был применён модульный подход к построению программного обеспечения. Он позволяет 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. 3.2).

Модули взаимодействуют между собой посредством специально разработанного объектного протокола. Установка связи происходит по механизму клиент-сервер. Для взаимодействия с клиентом сервер выделяет необходимые ресурсы межмодульного взаимодействия (разделяемая память, пайп, сокет, и т. п.) и ожидает запросы от клиента. Подобный механизм обеспечивает совместную работу модулей независимо от того в каком контексте они были загружены в память компьютера: в контексте одного процесса, в контексте разных процессов на одном компьютере, или же в контексте разных процессов на разных компьютерах, объединённых в общую сеть.

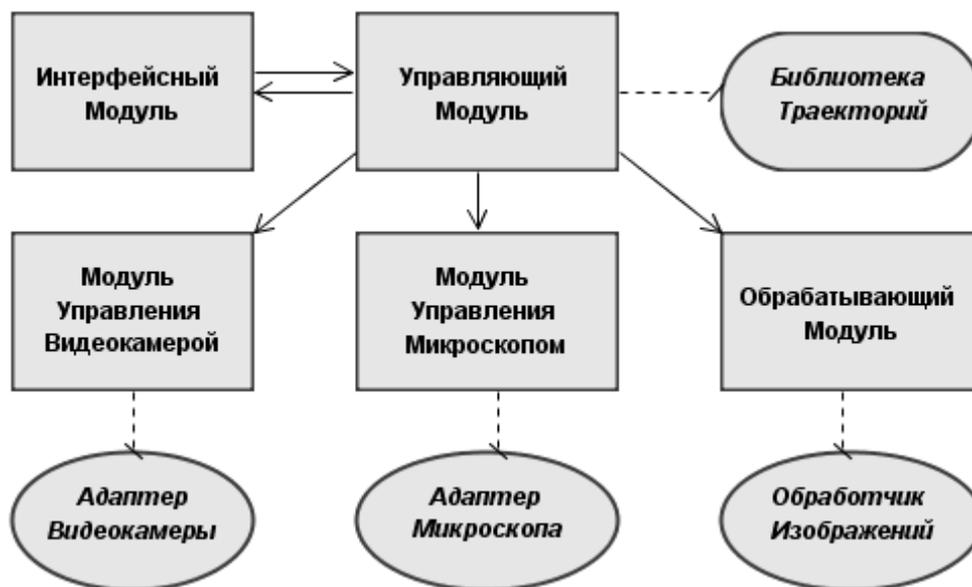


Рис. 3.2. Архитектура программы PAVICOM. Стрелками обозначены межмодульные связи по типу клиент-сервер, стрелки направлены от клиента к серверу. Пунктиром обозначены связи через интерфейс динамически загружаемых библиотек.

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

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.

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. В настоящее время реализованы два обработчика для экспериментов ЕМУ-15 и ОЛИМПИА, и ведётся разработка обработчика для эксперимента OPERA. Более подробно они будут рассматриваться в главе IV.

3.3. Взаимодействие модулей при сканировании

Сканирование с остановками

Этот процесс происходит в соответствии с довольно простой схемой (рис. 3.3). *УМ* даёт микроскопу команду переместиться в заданную точку. Затем по команде *МУВ* изображение регистрируется, и передаётся в *ОМ*. Поскольку подхват изображения происходит в момент, когда объектив микроскопа неподвижен, то никаких специальных алгоритмов расчета координат изображения не требуется: используются текущие координаты микроскопа.

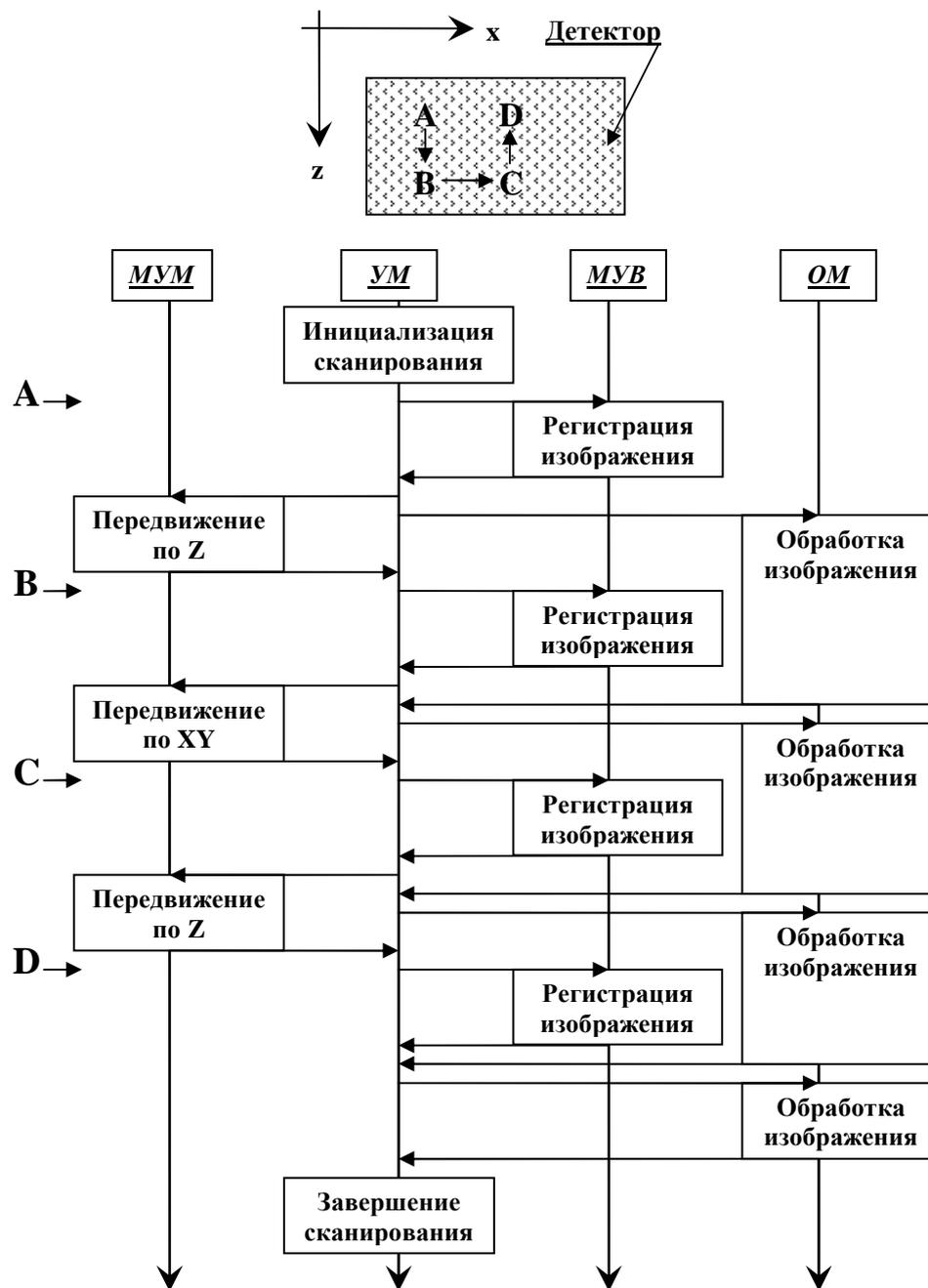


Рис. 3.3. Диаграмма взаимодействия модулей при сканировании с остановками по траектории, изображенной сверху. Латинскими буквами обозначены точки остановок.

Безостановочное сканирование

Безостановочное сканирование является более сложным вариантом сканирования. В этом случае во время движения микроскопа происходит подхват сразу серии изображений. Это позволяет существенно увеличить скорость сканирования по сравнению со сканированием с остановками, хотя и вносит дополнительные трудности при расчете координат изображений. Безостановочное сканирование происходит по следующей схеме (рис. 3.4):

УМ выдает команду МУМ переместиться в указанную точку и, одновременно, команду МУВ зарегистрировать серию изображений.

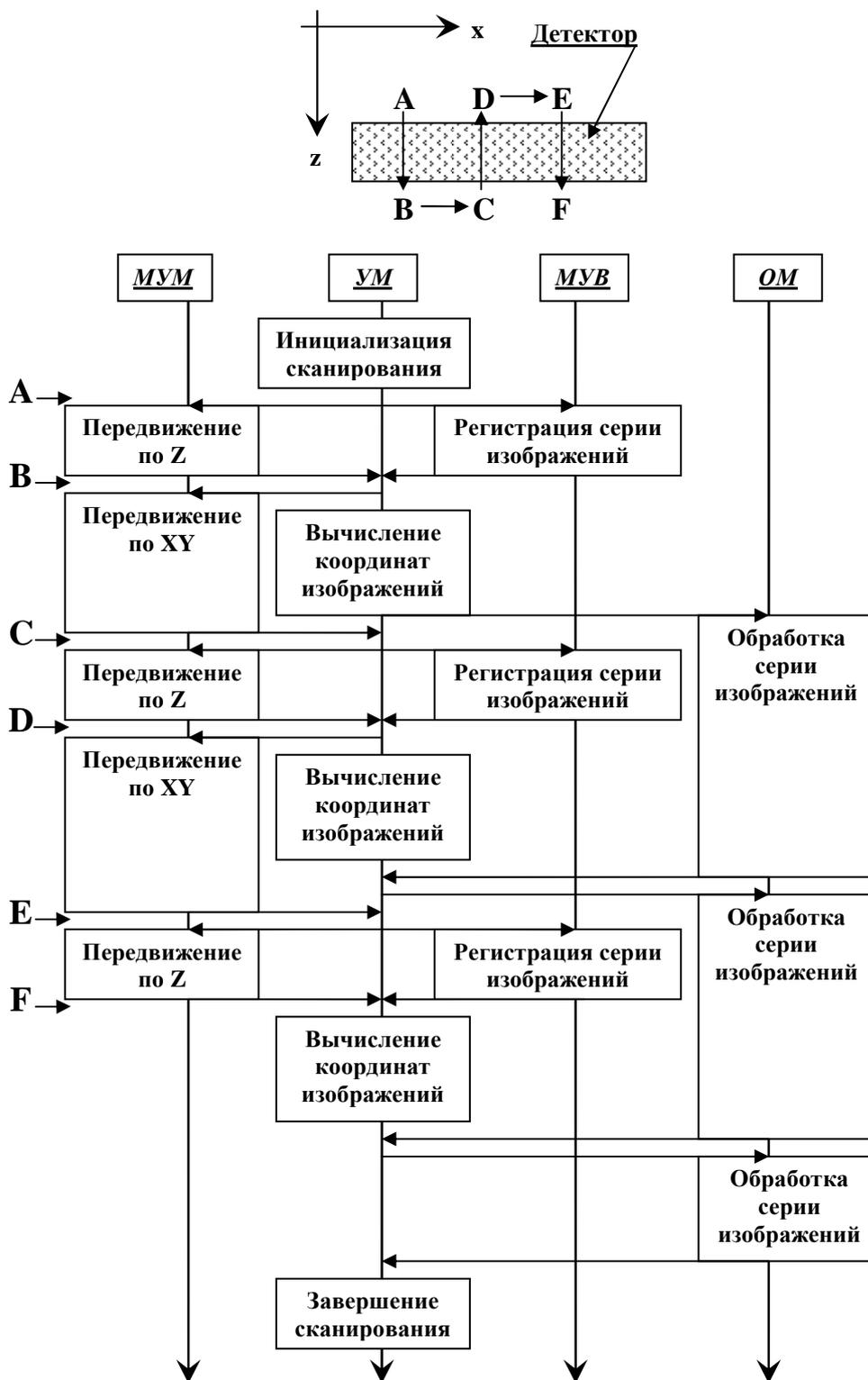


Рис. 3.4. Диаграмма взаимодействия модулей при безостановочном сканировании по траектории, изображенной сверху. Латинскими буквами обозначены точки остановок.

В процессе движения через определённые промежутки времени *МУМ* запрашивает у микроскопа и запоминает текущие координаты и время запроса. Аналогично, *МУВ* запоминает время подхвата каждого изображения. Получив серию изображений из *МУВ* и серию координат из *МУМ*, *УМ* рассчитывает координаты каждого изображения, производя линейную интерполяцию между двумя значениями из серии координат *МУМ*, ближайшими по времени к моменту подхвата изображения. Так как часть пути микроскоп движется с ускорением, то рассчитываются расстояния отступов от краёв области сканирования, так чтобы она совпала с областью равномерного движения, обеспечивая тем самым равномерность шага сканирования. Из полученной серии изображений для обработки отбираются лишь те изображения, координаты которых находятся внутри области сканирования.

3.4. Технические возможности комплекса ПАВИКОМ при автоматизированной обработке.

Управление микроскопом

Контроллер прецизионного стола Carl Zeiss MCU-26 связан с компьютером посредством последовательного протокола стандарта RS-232.

Поскольку оборудование микроскопа ПАВИКОМ-2 включает немецкую механику, российскую оптику, швейцарскую видеотехнику и всё это собрано на базе российского микроскопа, потребовалось изготовить дополнительные механические узлы и всесторонне проверить характеристики их совместной работы. Поэтому, для исследования и оптимизации различных характеристик микроскопа ПАВИКОМ-2 был произведён ряд методических измерений.

Исследование скорости движения объектива

Исследование скорости показало (рис. 3.5) нарушение пропорциональности между скоростью, заданной в единицах контроллера микроскопа, и реальной скоростью смещения объектива при движении со скоростью более 200 *мкм/с*. Дальнейшее исследование продемонстрировало повышенную вероятность

накопления люфтов и других ошибок измерения Z-координаты при передвижении со скоростью выше 40 мкм/с. Исследование равномерности движения на скоростях до 40 мкм/с (рис. 3.6 и 3.7) показало, что объектив движется достаточно равномерно за исключением короткого начального участка.

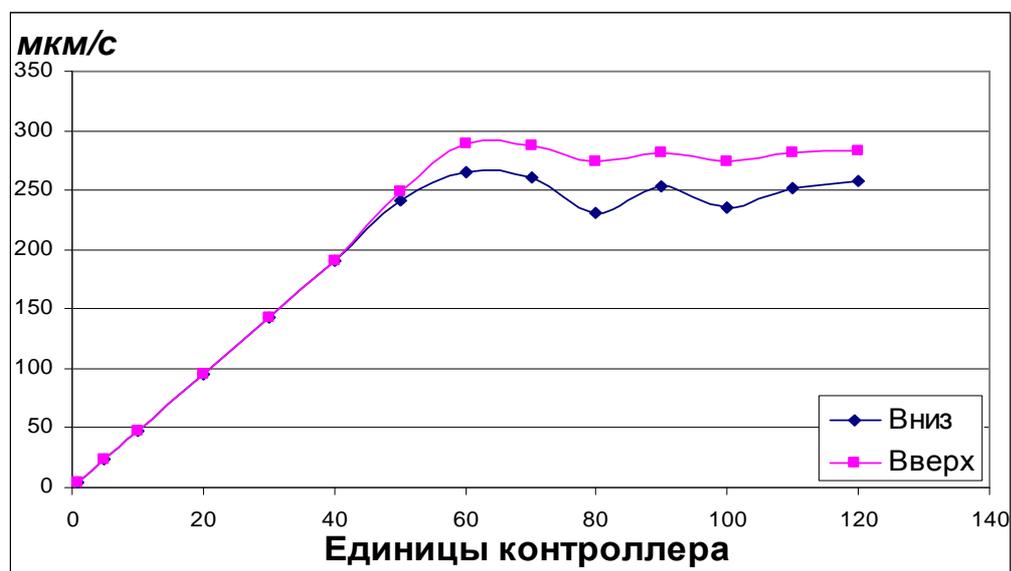


Рис. 3.5. График скорости движения объектива микроскопа в зависимости от настройки контроллера.

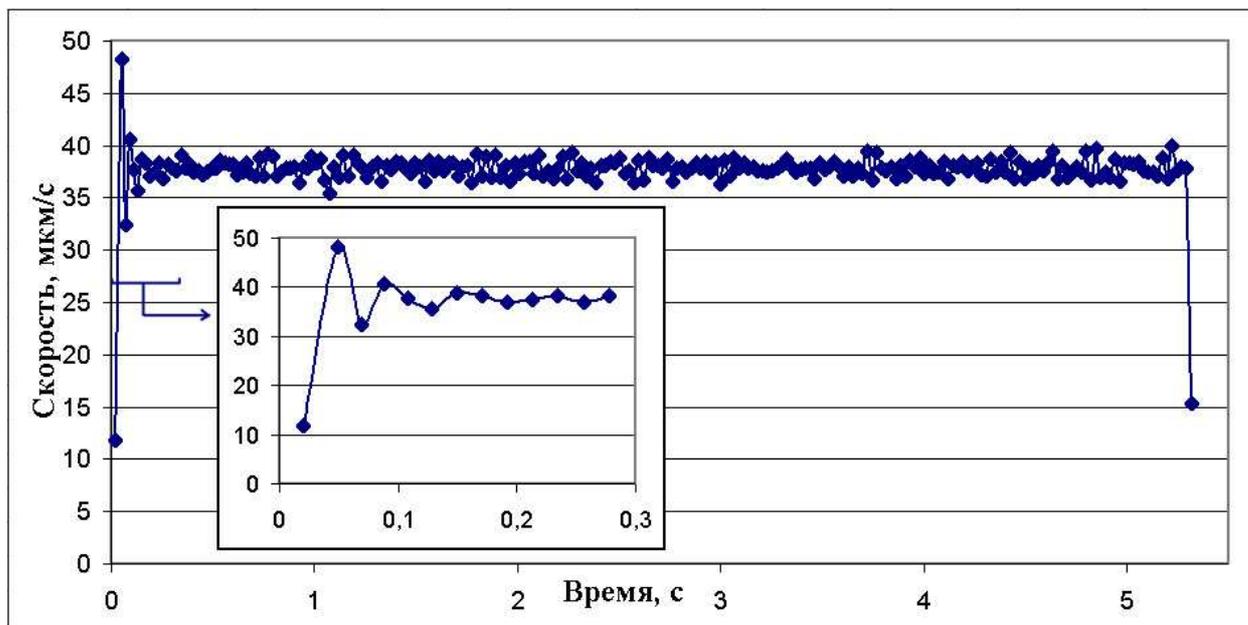


Рис. 3.6. График зависимости локальной скорости движения объектива микроскопа от времени.

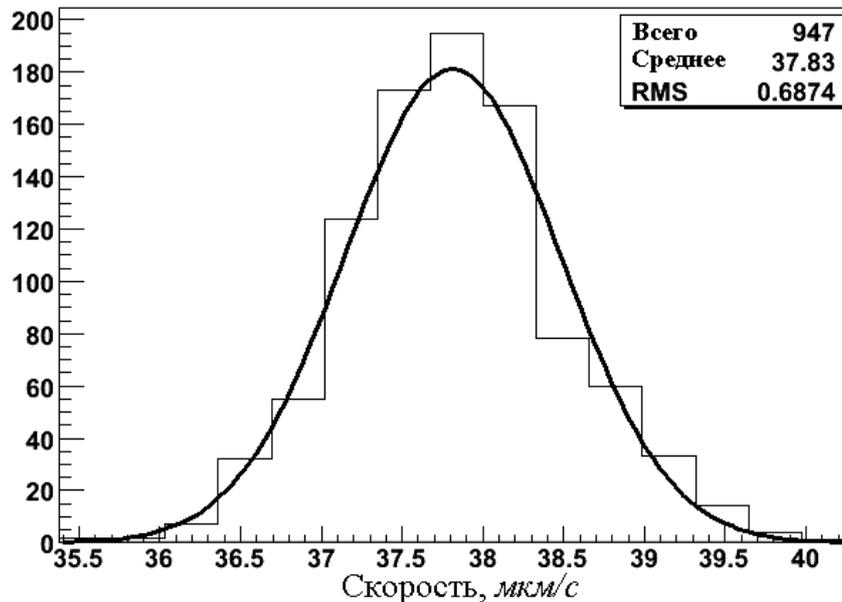


Рис. 3.7. Распределение значений локальной скорости при равномерном движении объектива.

Таким образом, эмпирически было установлено, что скорость сканирования на микроскопе ПАВИКОМ-2 можно представить формулой:

$$v_s = \frac{152640}{\alpha^2 (\delta + 16)}, \text{ см}^2/\text{ч}, \quad (3.1)$$

где α – увеличение объектива, а δ – толщина детектора в *мкм*.

Измерение z-координаты изображения

В процессе безостановочного сканирования через определённые промежутки времени (~ 20 мс) у микроскопа запрашиваются и запоминаются текущие координаты и время запроса. Аналогично, запоминается время регистрации каждого изображения.

Для вычисления z-координаты изображения производится линейная интерполяция по формуле:

$$z(t) = z_i + \frac{z_{i+1} - z_i}{t_{i+1} - t_i} (t - t_i), \quad (3.2)$$

где (t_i, z_i) и (t_{i+1}, z_{i+1}) – пары время-координата микроскопа, ближайšie по времени к моменту регистрации изображения t , такие что $t_i < t < t_{i+1}$.

Обработка команды считывания текущей координаты микроскопа

контроллером занимает в среднем 20 мс (промежуток времени между концом отправки команды и началом получения ответа). Моментом считывания координаты считается среднее арифметическое этого промежутка, следовательно, точность измерения момента считывания координаты σ_t равна 10 мс. Точность измерения момента регистрации изображения σ_i определяется временем экспозиции видеокамеры (1/500 с) и равна 1 мс.

Точность определения z-координаты изображения σ_z можно представить формулой:

$$\begin{aligned} \sigma_z^2 &= \sigma_\mu^2 \left[\left(\frac{\partial z(t)}{\partial z_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(t)}{\partial z_{i+1}} \right)^2 \right] + \sigma_t^2 \left[\left(\frac{\partial z(t)}{\partial t_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(t)}{\partial t_{i+1}} \right)^2 \right] + \sigma_i^2 \left(\frac{\partial z(t)}{\partial t} \right)^2 = \\ &= \left[\left(\frac{t_{i+1} - t}{t_{i+1} - t_i} \right)^2 + \left(\frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} \right)^2 \right] \cdot (\sigma_\mu^2 + \sigma_t^2 \left(\frac{z_{i+1} - z_i}{t_{i+1} - t_i} \right)^2) + \sigma_i^2 \left(\frac{z_{i+1} - z_i}{t_{i+1} - t_i} \right)^2 \leq \\ &\leq \max_{t_i \leq t \leq t_{i+1}} \left[\left(\frac{t_{i+1} - t}{t_{i+1} - t_i} \right)^2 + \left(\frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} \right)^2 \right] \cdot (\sigma_\mu^2 + v^2 \sigma_t^2) + v^2 \sigma_i^2 = \sigma_\mu^2 + v^2 (\sigma_t^2 + \sigma_i^2), \quad (3.3) \end{aligned}$$

где v – скорость передвижения объектива микроскопа, σ_μ – ошибка измерения z-координаты микроскопом, σ_t – ошибка в определении момента измерения координаты, σ_i – ошибка в определении момента регистрации изображения.

Подставив значения для точностей измерений в (3.3) получим:

$$\sigma_z^2 = \sigma_\mu^2 + v^2 (\sigma_t^2 + \sigma_i^2) \sim 0.5 \text{ мкм}$$

Таким образом, в ходе выполнения рассмотренной в этой главе части диссертационной работы осуществлен ввод в эксплуатацию одного из автоматизированных микроскопов измерительного комплекса ПАВИКОМ для экспериментальной обработки материала эмульсионных и твердотельных детекторов. В настоящее время ПАВИКОМ успешно используется для высокотехнологичной обработки данных экспериментов в ядерной физике, физике космических лучей, физике высоких энергий. Разработаны программы автоматического перемещения стола микроскопа при разных режимах сканирования и соответствующее программное обеспечение для обработки и сохранения видеоизображений. Создана принципиальная возможность для автоматизации обработки данных экспериментов ЕМУ-15, OPERA, ОЛИМПИА, а также будущих экспериментов.

Глава IV

Ядерно-физические исследования на комплексе ПАВИКОМ

Применение ПАВИКОМ для обработки данных эксперимента EMU-15

Эксперименты на пучках протонного синхротрона в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) с ионами свинца, ускоренными до энергий 158 ГэВ/нуклон, позволяют исследовать свойства ядерной материи при сверхвысоких плотностях и температурах. Полученные таким образом экспериментальные данные дают возможность изучать особенности угловых распределений вторичных частиц, проводить поиск многочастичных корреляций, появление которых ожидается при адронизации возбужденной ядерной материи, и анализировать эти распределения с целью поиска сигналов, специфичных для кварк-глюонной плазмы или других состояний с участием цветных партонов. Основным направлением исследования является поиск возможных сигналов образования субадронных состояний при высоких температурах и сверхвысокой плотности адронной материи.

Постановка эксперимента

Для изучения коллективных эффектов и особенностей разлета вторичных частиц в столкновениях ядер атомов свинца, ускоренных до энергий 32 ТэВ/ядро (или 158 ГэВ/нуклон) с атомами свинца мишени сотрудниками ФИАН был подготовлен и успешно осуществлен в ЦЕРН эксперимент EMU-15 [56-59]. Коллаборация EMU-15 состояла только из российских участников, что является уникальным для ЦЕРН.

В эксперименте EMU-15 использовались 16 эмульсионных камер, имевших форму цилиндра длиной 260 мм и диаметром 95 мм. Каждая камера

содержала тонкую (400 мкм) свинцовую мишень и 38 слоев ядерной фотоэмульсии (каждый толщиной 50 мкм), политых на майларовую подложку толщиной 25 мкм. Один слой эмульсии располагался непосредственно перед мишенью, остальные – за мишенью. Общая толщина каждой камеры составляла всего 0.07 каскадных длин, что крайне важно при регистрации центральных столкновений ядер свинца очень высокой энергии, в которых генерируются тысячи вторичных частиц. Камера помещалась в поперечное магнитное поле напряженностью 2 Т и располагалась таким образом, чтобы плоскости мишени и ядерных фотоэмульсий были перпендикулярны пучку. Суммарное число ядер Pb при облучении каждой из 16 фотоэмульсионных камер составлял около 10^4 . В каждой камере было найдено около 10 центральных Pb-Pb взаимодействий с множественностью вторичных частиц более 10^3 (критерием отбора таких событий служит большая множественность вторичных заряженных частиц и отсутствие фрагментов с зарядом $Z \geq 2$).

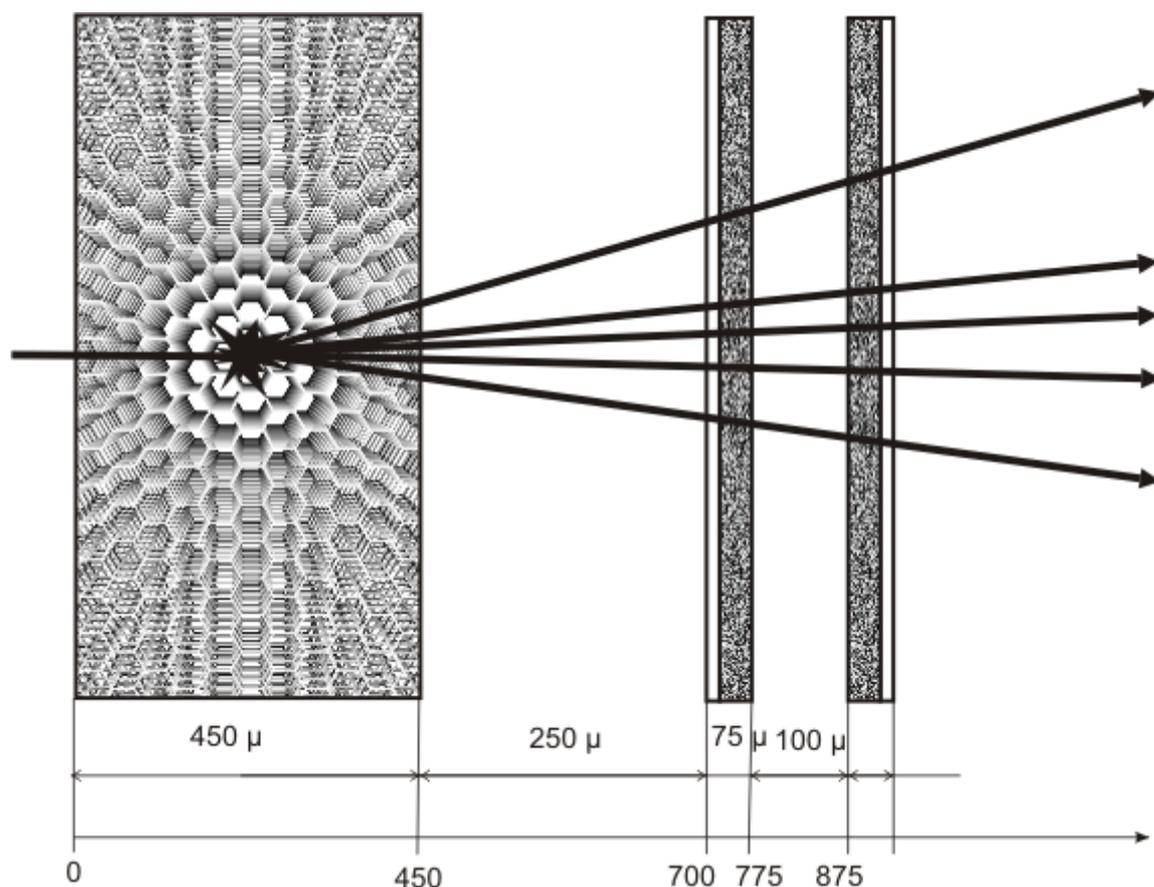


Рис 4.1. Схема эксперимента EMU-15.

Измерительная система

Проявленная фотоэмульсия обрабатывается на установке ПАВИКОМ-2, состоящей из микроскопа МПЭ-11 (ЛОМО) [60,61], на котором смонтирован просмотровый автоматизированный стол фирмы Carl Zeiss с управлением через контроллер MCU-26 и установлена быстрая CMOS-видеокамера. Подробно об установке ПАВИКОМ-2 было рассказано в предыдущих главах.

Управление столом осуществляется компьютером при помощи контроллера. Изображения, получаемые с видеокамеры, имеют размер 1280×1024 пикселей и глубину цвета 8 бит (256 градаций серого). Изображение в видеокамере создаётся объективом микроскопа, с увеличением $60\times$.

Характеристики ядерной эмульсии

В эксперименте использовалась ядерная фотоэмульсия P2T-50 [62]. При прохождении заряженной частицы в эмульсии образуется трек, который после проявки виден как цепочка зёрен и их скоплений (блобов), с плотностью 35 блобов на 100 мкм трека. Характеристики эмульсии приведены в таблице 5. Абсолютная координатная привязка слоев фотоэмульсии в эксперименте EMU-15 проводилась по фоновым ядрам свинца.

Таблица 5. Характеристики фотоэмульсии эксперимента EMU-15.

| | |
|-------------------------------------|---------------|
| Тип | P2T-50 |
| Плотность блобов (на 100 мкм) трека | 35 ± 5 |
| Вуаль | 5.6 ± 0.3 |
| Коэффициент усадки | 2.5 ± 0.3 |
| Размер блоба (мкм) | 0.7 |

Постановка задачи обработки

Автоматизированная обработка треков в ядерной эмульсии требует разработки программного обеспечения для управления передвижением

столика микроскопа, видеосъёмки изображений, их анализа и восстановления геометрической картины разлета вторичных заряженных частиц.

Задача обработки изображений разбивается на несколько этапов:

1. Предварительный поиск и устранение посторонних пятен («черных» пикселей видеокамеры).
2. Фильтрация изображений.
3. Бинаризация изображений.
4. Выделение связных областей (кластеризация).
5. Отбор кластеров по их размерам.

Результатом обработки изображения является множество кластеров, принадлежащих одному событию.

Задача восстановления геометрии разлета частиц, рожденных в результате ядро-ядерного взаимодействия, также разбивается на несколько подзадач:

1. Восстановление микротрека (т.е. отрезка трека в одном из слоев эмульсии) по цепочке кластеров (трекинг).
 - 1.1. Вычисление параметров микротрека по заданному набору кластеров (фитинг).
 - 1.2. Отбор кластеров для фитинга без учёта информации о вершине взаимодействия (свободный трекинг).
 - 1.3. Поиск вершины взаимодействия.
 - 1.4. Отбор кластеров для фитинга с учётом информации о вершине взаимодействия (вершинный трекинг).
2. Продление микротрека в соседний слой эмульсии.
 - 2.1. Вычисление параметров трека по заданному набору микротреков (линкинг).
 - 2.2. Отбор микротреков для линкинга.
3. Определение направления движения первоначального ядра (поиск оси события).

Результатом восстановления геометрии разлета частиц после ядро-ядерного взаимодействия является псевдобыстротное распределение

вторичных частиц, которое затем подробно анализируется с помощью различных математических методов.

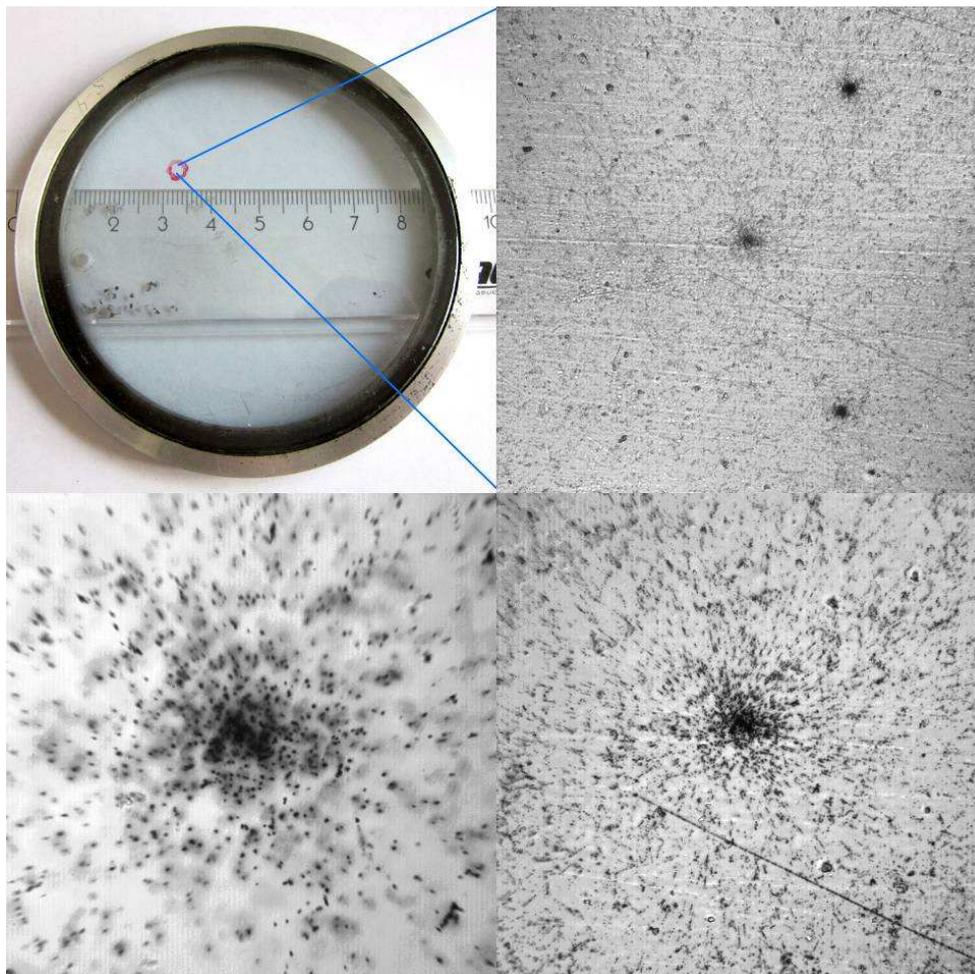


Рис. 4.2. Слева сверху: эмульсионная пластина эксперимента EMU-15. Справа сверху: центральное поле зрения при увеличении объектива 8× (820 × 820 мкм²). В центре следы ещё не успели разойтись и сконцентрированы очень плотно, что делает центральную область более тёмной. На изображении также хорошо видны два следа от непроизводивавших ядер свинца. Внизу: то же поле зрения при увеличении 20× (справа, 330 × 330 мкм²) и 60× (слева, 115 × 115 мкм²).

Видеосъёмка и обработка изображений

Изображения следов частиц на выходе видеокамеры выглядят как группы блобов на сером фоне (рис. 4.2). Для видеосъёмки в ядерных фотоэмульсиях эксперимента EMU-15 был выбран размер кадра 480 × 480 пикселей, что при увеличении 60× соответствует размеру поля зрения 72 × 72 мкм². Размер одного пикселя равен 0.15 мкм.

Каждый пиксель несет некоторую информацию о степени почернения изображения, называемую цветом. Для исходных изображений цвет пикселя лежит в диапазоне от 0 до 255 (8 бит). Для изображений, преобразованных фильтром, цвет описывается действительным числом, а для бинаризованных изображений – числами 0 или 1.

На заданных глубинах фотоэмульсии осуществляется последовательная съёмка видеокамерой 25 полей зрения по спирали вокруг предполагаемого центра события.

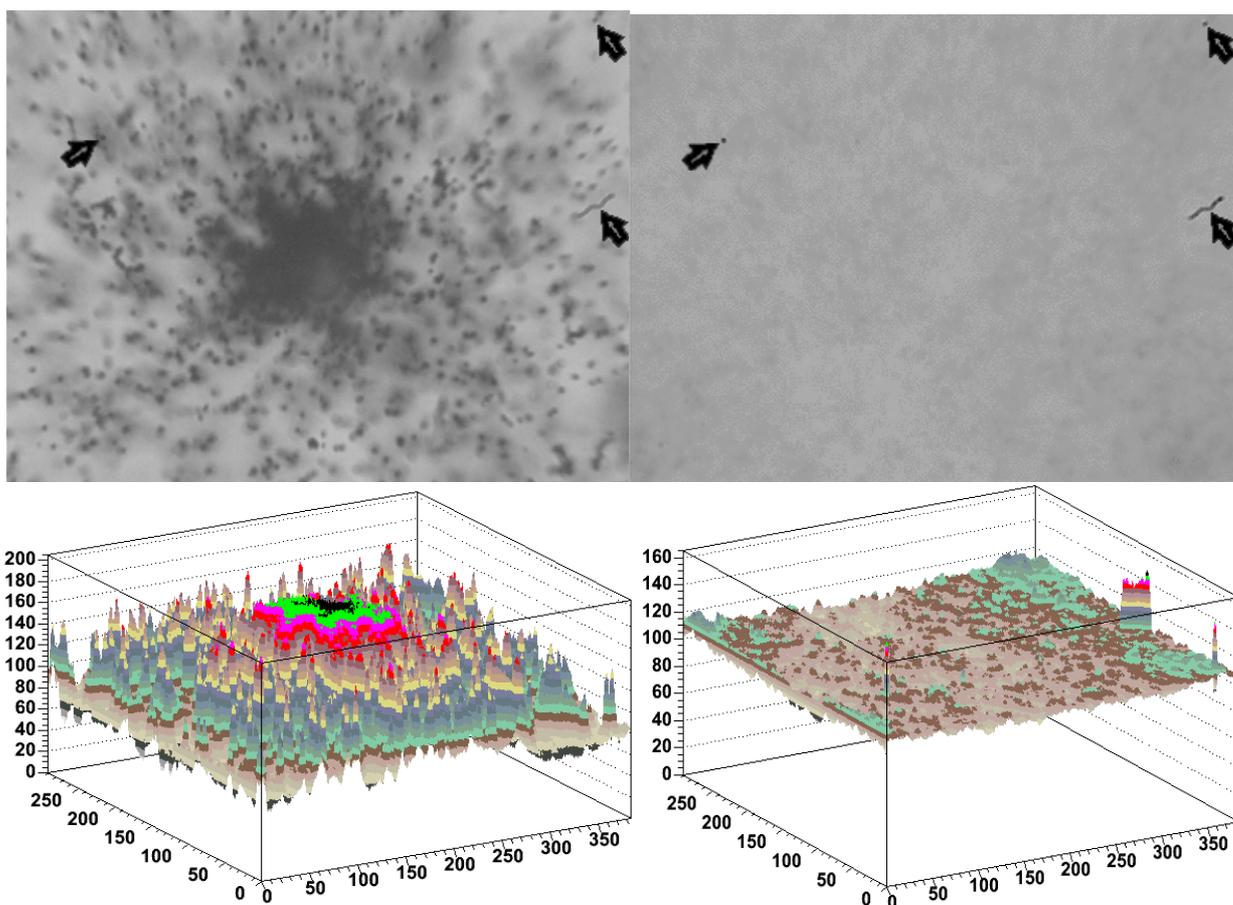


Рис. 4.3. Слева сверху: исходное изображение. На рисунке отмечены пятна, образованные из множеств «чёрных» пикселей. Слева внизу: координатно-цветовая гистограмма исходного изображения. Справа сверху: изображение, полученное в результате усреднения 25 изображений. Справа внизу: его координатно-цветовая гистограмма. Видно что, в случае усреднения, цвета «чёрных» пикселей не изменяются, что позволяет легко их находить, задавая порог на цвет пикселей.

Выделение «чёрных» пикселей. Поскольку обработка ядерной эмульсии ведется при увеличении $60\times$, то практически невозможно полностью исключить попадание в поле зрения случайных соринки (например, ворсинки микронного размера на экране видеокамеры), что приводит к появлению на изображениях тёмных пятен (множеств «чёрных» пикселей), отвечающих фоновым дефектам и неотличимых от изображений реальных блобов. Они могут помешать правильному восстановлению микротреков или привести к появлению ложных микротреков. (Например, на рис. 4.3 около правого края хорошо видна Z-образная соринка, но две других соринки неотличимы от блобов).

Предварительный поиск таких пятен (множеств «чёрных» пикселей) основан на том, что на всех изображениях они находятся на одном и том же месте. Если на каком-либо изображении «чёрный» пиксель имеет координаты (i, j) , то и на всех остальных изображениях пиксель с координатами (i, j) , будет «чёрным». Поэтому, если усреднить цвета пикселей с одинаковыми координатами по 25 изображениям на одной глубине, то дефектные области должны усилиться: цвет «чёрных» пикселей оказывается значительно чернее цвета остальных пикселей (рис. 4.3). Теперь пиксели, принадлежащие дефектным областям, можно удалить, задавая цветовой порог, одинаковый для всех полей зрения. Далее цвета выделенных пикселей усредняются по окрестности размером 20×20 пикселей, после чего они становятся практически неотличимы от фона и, тем самым, исключаются из дальнейшей обработки (рис. 4.4). Здесь и далее под фоном подразумевается фон изображения – это пиксели, не принадлежащие изображениям блобов и, следовательно, не несущие какой-либо полезной информации.

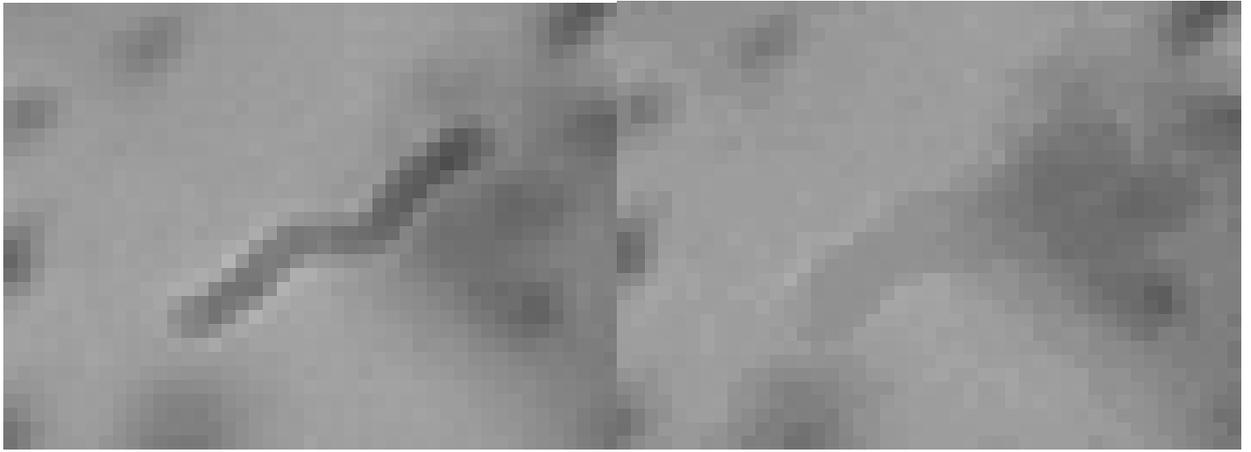


Рис. 4.4. Изображение Z-образной соринки до (слева) и после (справа) процедуры удаления «чёрных» пикселей.

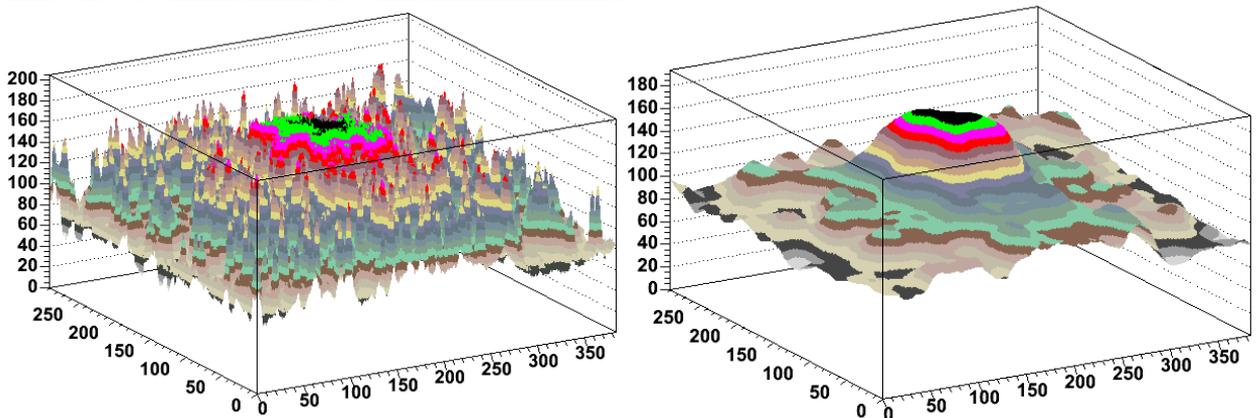
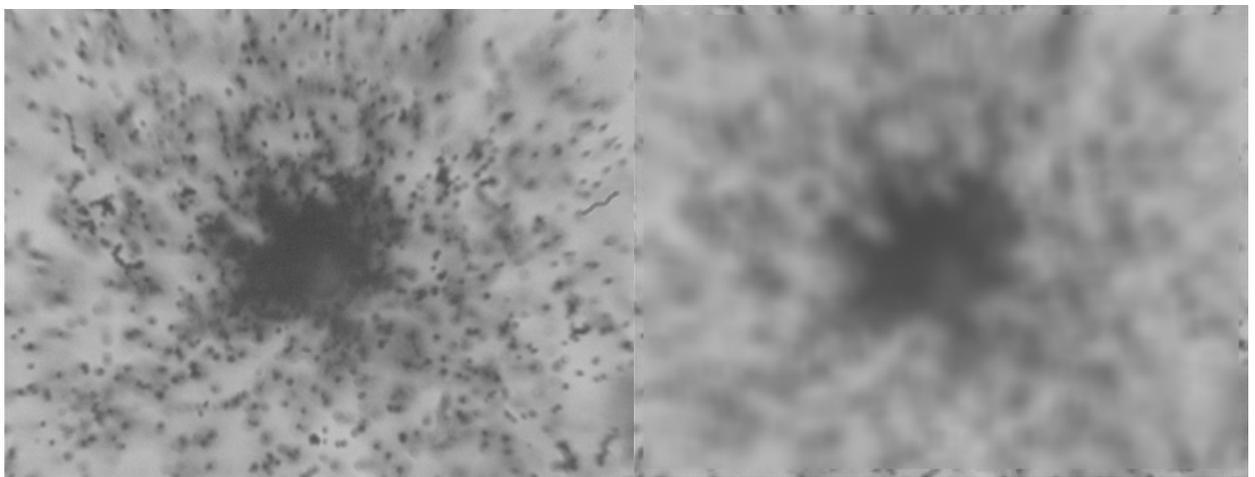


Рис. 4.5. Слева сверху: исходное изображение. Слева внизу: координатно-цветовая гистограмма исходного изображения. Справа сверху: изображение, обработанное усредняющим фильтром. Справа внизу: его координатно-цветовая гистограмма. Фильтр размывает изображения всех блоков, оставляя только распределение потемнения, близкое к фоновому.

Фильтрация изображений. Фильтрация – это предварительная стадия обработки изображения. Ее цель – выделять пятна, которые отвечают изображениям отдельных блоков. Ожидаемые интервалы размеров и степени почернения таких пятен задаются заранее.

Для уменьшения неравномерности фона изображения и повышения качества фильтрации в более тёмной центральной области изображения производится предварительная обработка изображения. Вначале изображение обрабатывается низкочастотным усредняющим фильтром [63]. Фильтр размывает изображения отдельных блоков, благодаря чему суммарное изображение становится похожим на фоновое, которое получалось бы в отсутствие всех блоков (рис. 4.5).

После это производится преобразование цвета пикселей согласно формуле:

$$c'_{i,j} = 255 \cdot \left(1 - \frac{c_{i,j}}{b_{i,j}}\right), \quad (4.1)$$

где $c_{i,j}$ – цвет пикселя исходного изображения, а $b_{i,j}$ – цвет соответствующего пикселя усреднённого изображения. Данная процедура преобразует цвета пикселей исходного изображения в относительные цвета, тем самым усиливая изображения блоков в более тёмных (с меньшим $b_{i,j}$) областях изображения.

Последующая фильтрация заключается в преобразовании изображения сканирующим высокочастотным фильтром [63], который реагирует на изменение степени почернения на краю пятна. Размер фильтра подбирается таким образом, чтобы его отклик на пятна, похожие на изображения блоков, образующих трек частицы, был бы максимальным. Это свойство фильтра приводит к тому, что края блоков становятся более резкими, а самиbloбы -- более отчетливыми, а их размер и число не меняются. При этом образованные слившимися блоками крупные пятна (например, большое пятно в центре рис. 4.6), после фильтрации практически пропадают, сливаясь с фоном изображения.

В математическом отношении фильтрация представляет собой матричную операцию над цветами пикселей:

$$g_{i,j} = TrF^T C_{i,j}, \quad (4.2)$$

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 $C_{i,j}$.

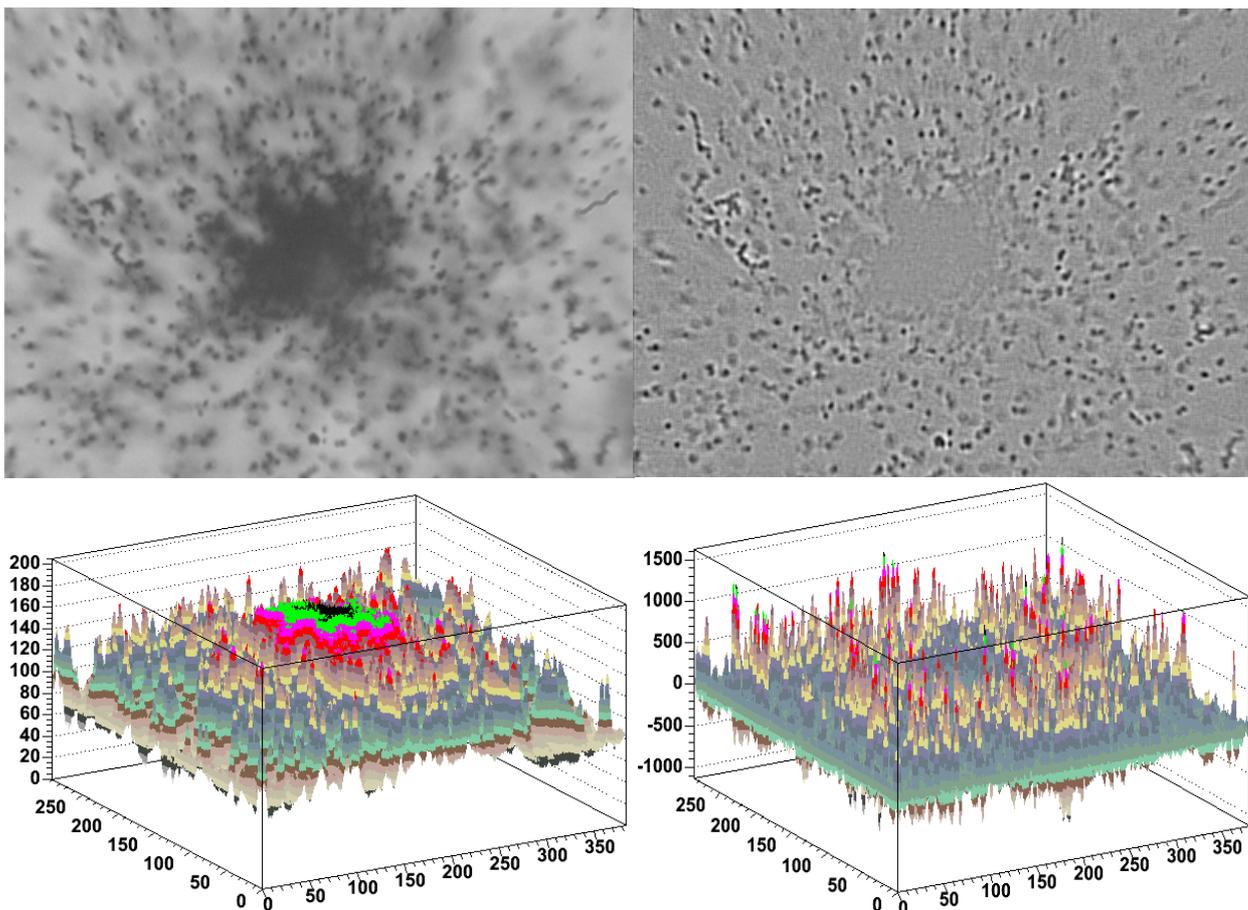


Рис. 4.6. Слева сверху: исходное изображение. Слева внизу: координатно-цветовая гистограмма исходного изображения. Справа сверху: изображение, обработанное высокочастотным фильтром. Справа внизу: его координатно-цветовая гистограмма. Видно, что фильтр усиливает только пятна определённых размеров и формы.

После фильтрации координатно-цветовая гистограмма изображения представляет собой множество узких высоких пиков в тех местах, где на изображении были характерные пятна – изображения блобов. Сравнение

правых и левых частей рис. 4.6 показывает степень усиления блобов при этой операции.

Бинаризация изображений. Бинаризация – это процесс выделения пикселей, которые соответствуют изображениям блобов (присваивания этим пикселям цвета 1). Для этого на изображение накладывается пороговое ограничение: пикселям, цвет которых превышает значение порога, присваивается значение 1, остальным присваивается цвет 0.

Выделение связных областей (кластеризация) Соседние пиксели с цветом 1, выделенные в процессе бинаризации, объединяются в кластеры, которые отвечают пятнам почернения (блобам) в ядерной эмульсии. Таким образом, кластер – это связное множество пикселей с цветом 1. Термин «связное множество» понимается в том смысле, что любые два пикселя, принадлежащие этому множеству, можно соединить непрерывной кривой, проходящей через пиксели того же множества. Непрерывность кривой означает, что пиксели, через которые она проходит, примыкают друг к другу сторонами, но не углами. Используется итеративная процедура выделения связных множеств. Зная координаты (x_i, y_i) каждого пикселя в кластере, можно найти центр масс, средний радиус и площадь кластера.

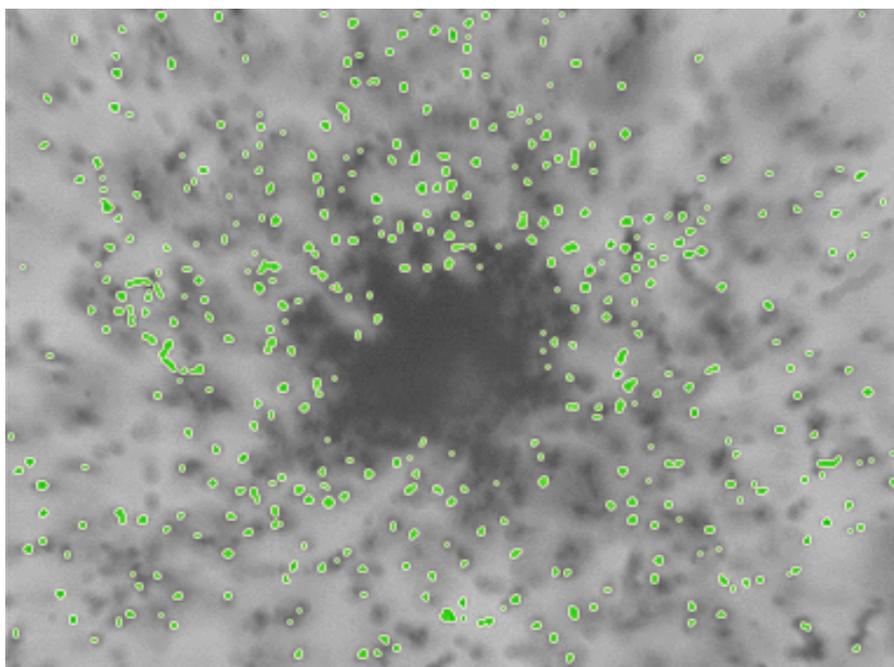


Рис. 4.7. Результат кластеризации центрального поля зрения. Найденные кластеры выделены.

Таким образом, физическим объектам (блобам) сопоставляются математические объекты (кластеры). Результаты кластеризации центрального поля зрения представлены на рис. 4.7.

Центр кластера находится по формуле:

$$\bar{x} = \frac{\sum c_i x_i}{\sum c_i}, \quad (4.3)$$

где c_i – цвет пикселя, а x_i – его координата.

Проверка процедуры кластеризации. Как видно из рис. 4.8 максимум распределения радиусов кластеров (0.35 мкм) хорошо согласуется с характерным для данной эмульсии размером блоба (0.7 мкм).

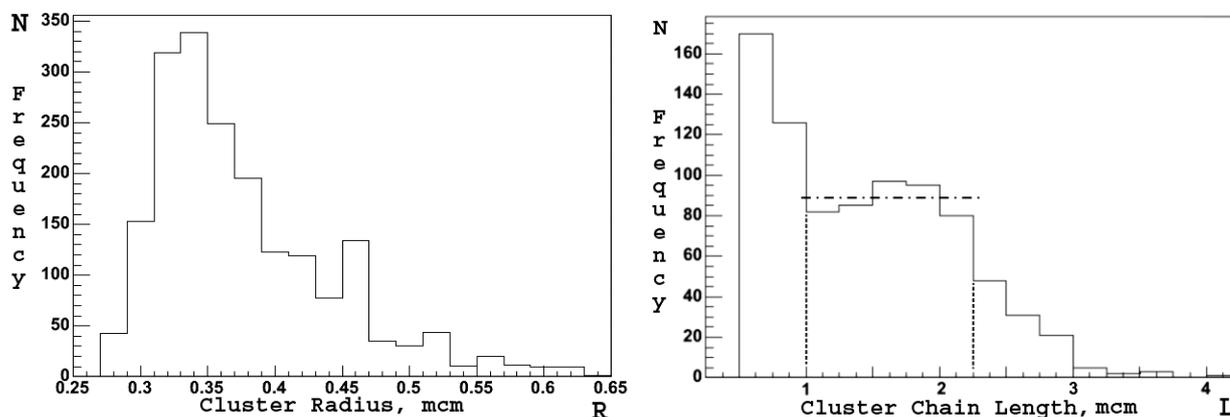


Рис. 4.8. Слева: Распределение средних радиусов $N(R)$ кластеров в мкм. Справа: Распределение длин $N(L)$ вертикальных цепочек кластеров при сканировании с шагом по z (ось абсцисс) равным $1/4$ мкм. Видно, что один и тот же блоб виден на 4-9 глубинах, т.е. при обычной съёмке (шаг 1 мкм) можно ожидать появления блоба на 1-2 глубинах.

Для проверки эффективности работы процедуры кластеризации (т.е. представления блобов в форме кластеров) была проведена видеосъемка одного поля зрения с шагом по глубине $1/4$ мкм. При таком малом шаге один и тот же блоб будет непременно виден на нескольких глубинах, а значит, ему будут соответствовать несколько кластеров с разной глубиной z и незначительно отличающимися координатами (x и y) их центров.

Справа на рис. 4.8 изображено распределение длин цепочек таких

кластеров. Видно, что при шаге $\frac{1}{4}$ мкм один и тот же блок виден на 4-8 глубинах, т.е. при обычной съёмке (шаг 1 мкм) можно ожидать появления блока на 1-2 глубинах.

Процедура кластеризации проверялась также и вручную. При такой проверке микроскопист подсчитывал количество блоков, видимых в поле зрения микроскопа. Результат сравнивался с числом кластеров, найденных в результате автоматического поиска. Эффективность при таком методе проверки оказалась, в среднем, 94% для центрального поля зрения и 98% для нецентрального. Различие связано с меньшей эффективностью регистрации кластеров вблизи центрального пятна.

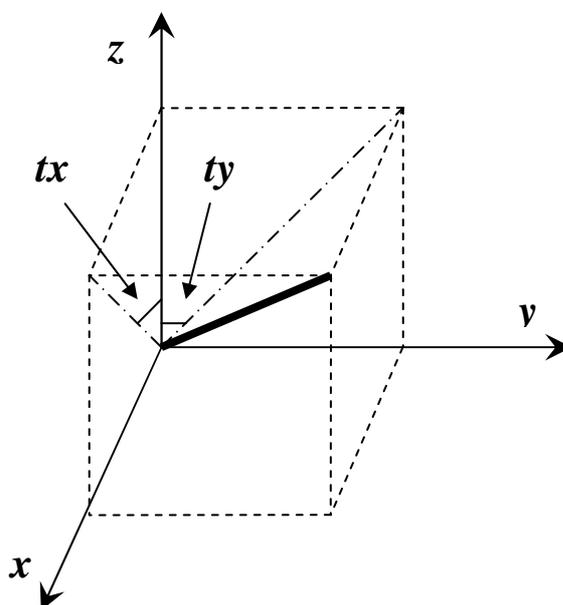


Рис. 4.9. Микротрек изображается прямой линией, заданной точкой с координатами (x, y, z) и тангенсами (tx, ty) углов наклона проекций этой прямой на плоскости XZ и YZ к оси Z .

Реконструкция микротреков

В результате выполнения кластеринга появляется множество точек – центров масс кластеров на плоскости, отвечающей одной определенной глубине. Добавив результаты измерений по оси Z (т.е., по глубине полей зрения), получим множество кластеров, распределённых в исследуемом объёме. Далее встает задача нахождения среди этого множества кластеров

микротреков частиц. (Микротрек – часть трека частицы, лежащая внутри отдельного слоя эмульсии.) Для этого микротрек изображается прямой линией, заданной точкой с координатами (x, y, z) и тангенсами (tx, ty) углов наклона проекций этой прямой на плоскости XZ и YZ к оси Z (рис. 4.9). Ось Z перпендикулярна плоскости эмульсии и сонаправлена пучку частиц. Начало отсчета по оси Z выбирается на передней (относительно пучка) плоскости мишени.

Восстановление микротрека по цепочке кластеров (фитинг). Одна из подзадач, которую необходимо решить, это восстановление микротрека по заданному набору кластеров (проведение прямой линии через известный набор координат центров масс кластеров – фитинг). Эта подзадача решается методом наименьших квадратов (МНК) [64].

Вводятся следующие обозначения:

x_i, y_i, z_i – координаты центра i -го кластера в треке;

$\vec{p} = (x \quad tx \quad y \quad ty)^T$ – вектор параметров трека, где tx и ty – тангенсы углов между осью Z и проекцией трека на плоскость XZ и YZ соответственно;

$f_x^i(\vec{p}) = x + z_i tx, \quad f_y^i(\vec{p}) = y + z_i ty$ – координаты точек пересечения трека с плоскостями $Z = z_i$;

$\vec{f}(\vec{p}) = \begin{pmatrix} \vec{f}_x \\ \vec{f}_y \end{pmatrix} = (f_x^0 \quad f_x^1 \quad \dots \quad f_x^{n-1} \quad f_y^0 \quad f_y^1 \quad \dots \quad f_y^{n-1})^T$ – функция модели трека.

Она составлена из координат точек пересечения трека с плоскостями $Z = z_i$.

$$w_x = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{x_0}^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{x_1}^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_{x_{n-1}}^2} \end{pmatrix}, \quad w_y = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{y_0}^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{y_1}^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_{y_{n-1}}^2} \end{pmatrix};$$

$$W = \begin{pmatrix} w_x & 0 \\ 0 & w_y \end{pmatrix} \text{ – весовая матрица;}$$

$\vec{m} = (x_0 \ x_1 \ \dots \ x_{n-1} \ y_0 \ y_1 \ \dots \ y_{n-1})^T$ – вектор измерений. Он составлен из координат кластеров.

Линеаризованная функция модели трека:

$$\vec{f}(\vec{p}) = \vec{f}(\vec{p}_0) + A \cdot (\vec{p} - \vec{p}_0) + O((\vec{p} - \vec{p}_0)^2), \text{ где } A = \left. \frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{p}} \right|_{\vec{p}=\vec{p}_0}.$$

Метод наименьших квадратов минимизирует функцию

$$M = \left(\vec{f}(\vec{p}_0) + A \cdot (\vec{p} - \vec{p}_0) - \vec{m} \right)^T W \left(\vec{f}(\vec{p}_0) + A \cdot (\vec{p} - \vec{p}_0) - \vec{m} \right).$$

Её минимум находится в точке

$$\vec{p} = \vec{p}_0 + (A^T W A)^{-1} A^T W (\vec{m} - \vec{f}(\vec{p}_0)).$$

Произведя подстановку значений, получим формулы для определения параметров микротреков:

$$tx = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i z_i}{\sigma_{x_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2}}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{x_i}^2} - \left(\sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} \right)^2}, \quad z = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2}}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{y_i}^2}},$$

$$x = tx \cdot z + \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{x_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i z_i}{\sigma_{x_i}^2}}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{x_i}^2} - \left(\sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} \right)^2}.$$

Отбор кластеров для фитинга (трекинг). Микротрек (цепочка кластеров), пересекающий плоскость ядерной фотоэмульсии, строится в соответствии со следующими общими требованиями:

- На каждой глубине внутри эмульсии (т.е. на плоскости кластеров) треку принадлежат не более одного кластера.
- Расстояние между двумя последовательными кластерами не должно превышать заданного значения.
- Число кластеров в микротреке должно быть не менее заданного.

Из-за большого количества кластеров рассмотреть все комбинации их цепочек в полном объёме за разумное время не представляется возможным. Поэтому поиск микротреков проводится в несколько этапов.

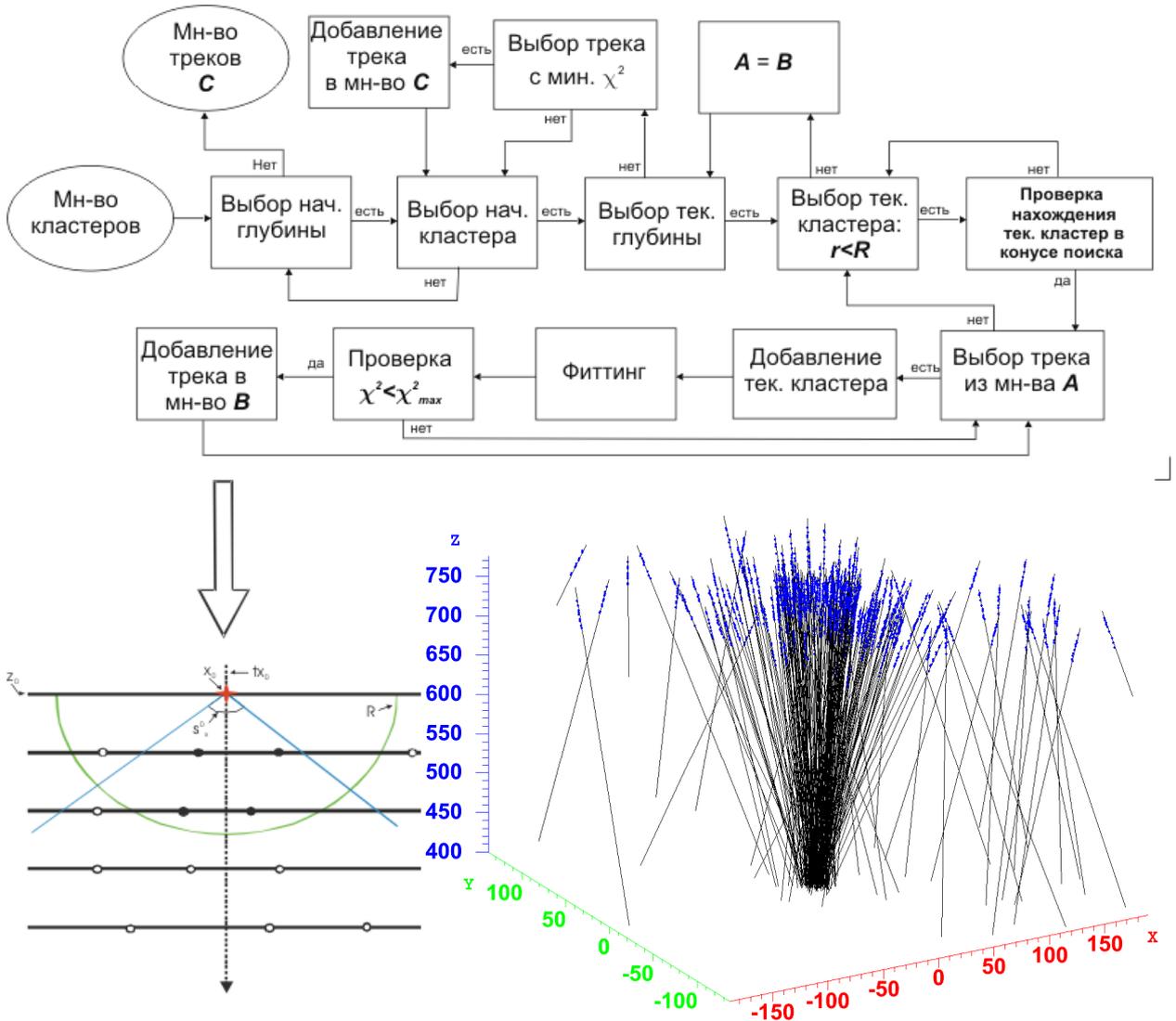


Рис 4.10. Вверху: Блок-схема алгоритма свободного трекинга. Слева внизу: Иллюстрация свободного трекинга (см. текст). Сплошные горизонтальные линии отвечают различным глубинам эмульсии. Ось Z направлена вниз и сонаправлена с пучком частиц (стрелка). Вершина конуса находится в текущем кластере. Направление, вокруг которого строится конус, показано пунктирной линией. Кластеры, попавшие внутрь конуса и расстояние до которых от вершины не превышает R, (отмечены чёрными кружками) будут использоваться при наращивании трека, остальные кластеры (белые кружки) игнорируются. Справа внизу: Результат свободного трекинга. Видно что большинство частиц вылетают из общего центра с $z \sim 400$ мкм.

Свободный трекинг. Алгоритм свободного трекинга представлен на и проиллюстрирован на рис. 4.10. Рассматривается произвольный кластер (x_i^0, y_i^0) на ближайшей к мишени плоскости эмульсии z^0 . В качестве начального направления берется перпендикуляр (tx_0, ty_0) , и вокруг него строится конус с вершиной в (x_i^0, y_i^0, z_i^0) и заданными углами (s_x^0, s_y^0) в плоскостях XZ и YZ между образующими и осью (tx_0, ty_0) . Вокруг выбранного кластера строится сфера, которая заведомо захватывает несколько глубин, и отбираются кластеры, попадающие в эту сферу. По этим кластерам составляются все возможные комбинации микротреков в конусе (множество C). Поочередным добавлением одного кластера из C строится множество цепочек кластеров, которое сортируется по критерию χ^2 .

Вышеописанная процедура осуществляется для каждой цепочки кластеров. При этом за ось конуса берётся направление микротрека, соответствующего цепочке, а вершина конуса строится в точке пересечения этого микротрека с плоскостью, соответствующей координате z последнего кластера в цепочке.

В итоге получается множество микротреков (цепочек кластеров), начинающихся из одного общего кластера (x_i^0, y_i^0) . Выбирается трек с наименьшим χ^2 и числом кластеров не меньшим заданного в соответствующей ему цепочке. Кластеры, входящие в микротрек, маркируются как использованные и в дальнейшем трекинге не участвуют. Этой же процедуре подвергаются все кластеры на следующих плоскостях, так что начало микротрека может находиться на любой глубине по Z . Трекинг прекращается, если пройдены все слои, или в нескольких слоях кандидаты отсутствуют.

В результате этой процедуры получается набор микротреков, как показано на рис. 4.10.

Поиск вершины взаимодействия. Алгоритм поиска вершины взаимодействия следующий (рис. 4.11).

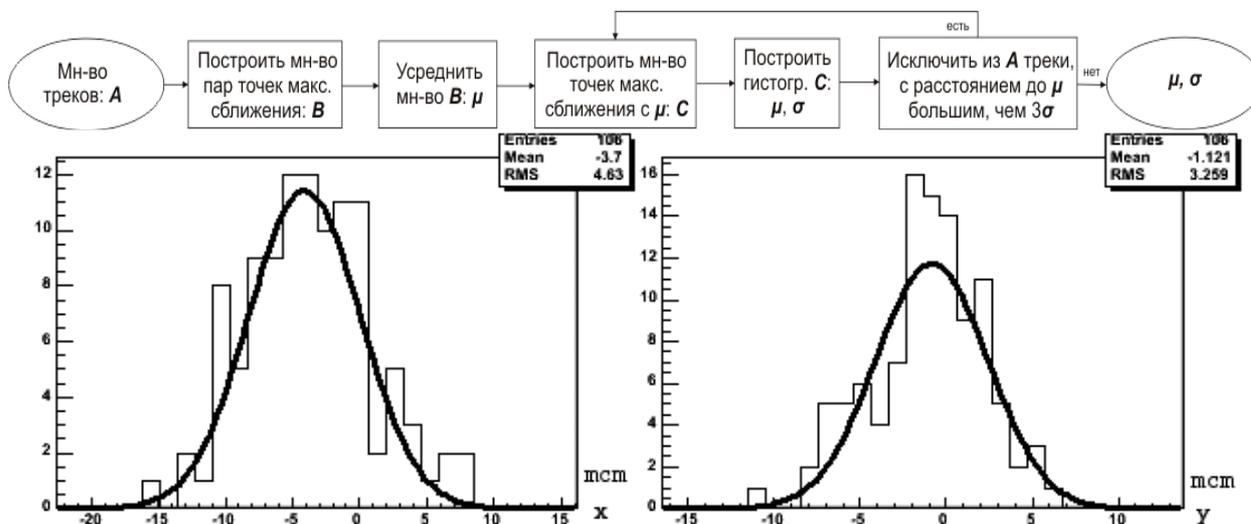


Рис 4.11. Вверху: Блок-схема алгоритма поиска вершины взаимодействия. Внизу: Примеры распределения отклонений координат вершины взаимодействия (по оси x слева и по оси y справа).

Изначально в множество микротреков A входят все найденные микротреки. Чтобы найти начальные значения координат вершины, для каждой пары микротреков из множества A производится поиск пар точек наибольшего сближения (множество B). Далее находится среднее значение μ координат всех точек из B .

Для каждого трека из множества A находится точка наибольшего сближения с μ (множество C), и строятся координатные распределения таких точек (рис. 4.11). Из этих распределений определяются новые значения μ и их среднеквадратичные ошибки σ_μ . Из множества A исключаются микротреки, для которых точки наибольшего сближения с μ лежат на расстояниях, превышающих $3\sigma_\mu$. Процедура повторяется до тех пор, пока все микротреки из A не окажутся внутри $3\sigma_\mu$, т.е. когда из A нельзя будет исключить ни один микротрек. Областью вершины считается эллиптический цилиндр с размерами осей эллипса по X и Y , зависящими от измерительных ошибок, и высотой Z , равной толщине мишени.

Вершинный трекинг. Этот вариант трекинга учитывает, что в эксперименте EMU-15 изучаются центральные столкновения. В этом случае проекция всех треков одного события на плоскость, перпендикулярную пучку, имеет ярко выраженный центр с координатами (x^c, y^c) .

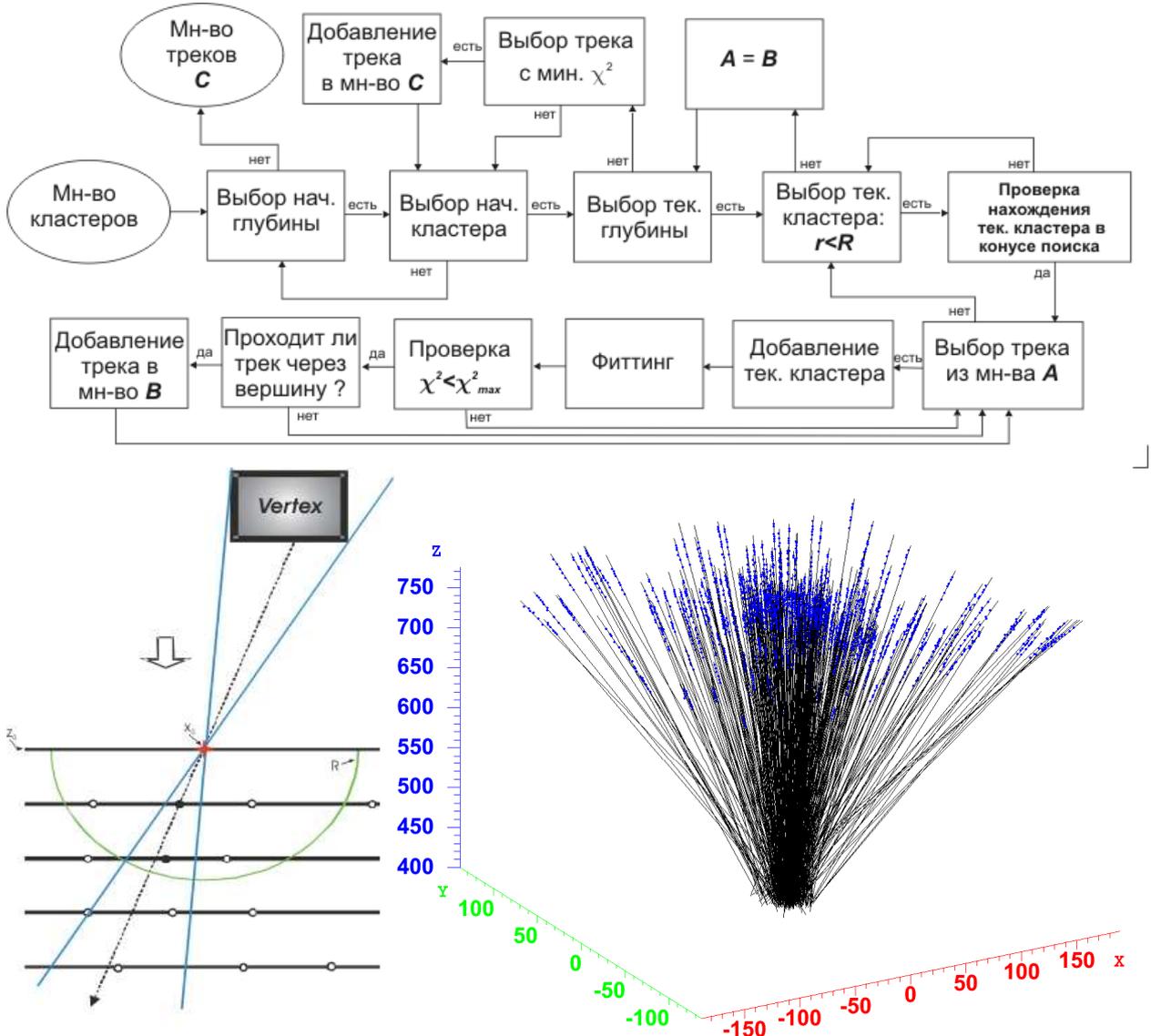


Рис. 4.12. Вверху: Блок-схема алгоритма вершинного трекинга. Слева внизу: Иллюстрация вершинного трекинга (см. текст). Сплошные горизонтальные линии отвечают различным глубинам эмульсии. Ось Z направлена вниз и сонаправлена с пучком (стрелка). Вершина конуса находится в текущем кластере. Направление, вокруг которого строится конус, показано пунктирной линией. Кластеры, попавшие внутрь конуса, расстояние до которых не превышает R (отмечены чёрными кружками), используются при наращивании трека. Остальные кластеры (белые кружки) игнорируются. Справа внизу: Результат вершинного трекинга.

В алгоритме задаётся цилиндр, ось которого параллельна оси Z и проходит через точку $(x^c, y^c, 0)$. Сверху и снизу цилиндр ограничен плоскостями, перпендикулярными оси Z ($Z = z_1^c$ и $Z = z_2^c$) (рис. 4.12). Далее выбирается произвольный кластер (x_i^0, y_i^0) на верхней плоскости эмульсии $Z = z^0$. С нижних слоёв отбираются кластеры (множество C), для которых прямая, соединяющая любой кластер из C с кластером (x_i^0, y_i^0) проходит через заданный цилиндр. Поочерёдным добавлением одного кластера из C строится множество цепочек кластеров. Производится фитинг каждой цепочки, и полученное множество микротроек сортируется по χ^2 . Для каждой цепочки кластеров вышеописанная процедура повторяется. В итоге получается множество микротроек (цепочек кластеров), начинающихся из одного общего кластера (x_i^0, y_i^0) . Затем поочередно отбираются проходящие через тот же цилиндр микротреки с наименьшим значением χ^2 и ограниченным числом кластеров в соответствующей цепочке. Кластеры, формирующие микротрек, в дальнейшем трекинге не участвуют. Далее процедура повторяется для следующего слоя.

Эффективность трекинга. Эффективность трекинга проверялась двумя способами: вручную (Таблица 6) и с помощью модельных событий прохождения заряженной частицы через эмульсию (Таблица 7).

Таблица 6. Проверка эффективности трекинга.

| | |
|---|-----------|
| Всего найдено вручную | 688 |
| Всего найдено программой | 730 |
| Совпало с ручной обработкой | 622 (90%) |
| Не найдено вручную, но найдено программой | 56 |
| Найдено ложных | 52 |

При ручной проверке микротреки в эмульсии находят с помощью обычного микроскопа. Результаты такого поиска сравниваются с результатом автоматического поиска. Эффективность трекинга составляет 90%. Такое

значение эффективности обусловлено высокой плотностью треков частиц в центральной области, что затрудняет распознавание отдельных кластеров и микротреков.

Таблица 7. Проверка эффективности трекинга на модельных событиях.

| | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|
| Количество треков на 1000 мкм^2 | 10 | 30 | 50 | 100 |
| Эффективность трекинга | 99% | 98% | 95% | 92% |

Проверка трекинга на модельных событиях выявила зависимость его эффективности от плотности микротреков.

Продление микротреков в соседний слой эмульсии

Метод сшивки двух микротреков (линкинг). Для сшивки микротреков необходимо вычислить параметры трека, наилучшим образом фитирующего заданный набор микротреков. Эта задача решается методом наименьших квадратов и во многом схожа с задачей фитинга.

Введём линеаризованную функцию модели трека:

$$\vec{f}(\vec{p}) = \vec{f}(\vec{p}_0) + A \cdot (\vec{p} - \vec{p}_0) + O((\vec{p} - \vec{p}_0)^2), \text{ где } A = \left. \frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{p}} \right|_{\vec{p}=\vec{p}_0}.$$

$\vec{p} = (x \quad tx \quad y \quad ty)^T$ – вектор параметров трека;

$f_x^i(\vec{p}) = x + z_i tx$, $f_y^i(\vec{p}) = y + z_i ty$ – координаты точек пересечения трека с

плоскостями $Z = z_i$;

$$\vec{f}_{tx} = (tx \quad tx \quad \dots \quad tx)^T, \quad \vec{f}_{ty} = (ty \quad ty \quad \dots \quad ty)^T;$$

$$\vec{f}(\vec{p}) = \left((\vec{f}_x)^T \quad (\vec{f}_y)^T \quad (\vec{f}_{tx})^T \quad (\vec{f}_{ty})^T \right)^T - \text{функция модели трека};$$

Применяемый метод минимизирует функцию

$$M = \left(\vec{f}(\vec{p}_0) + A \cdot (\vec{p} - \vec{p}_0) - \vec{m} \right)^T W \left(\vec{f}(\vec{p}_0) + A \cdot (\vec{p} - \vec{p}_0) - \vec{m} \right).$$

Её минимум находится в точке

$$\vec{p} = \vec{p}_0 + (A^T W A)^{-1} A^T W (\vec{m} - \vec{f}(\vec{p}_0)).$$

Произведя подстановку, получим:

$$tx = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \left(\sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i z_i}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{tx_i}{\sigma_{tx_i}^2} \right) - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2}}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \left(\sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \right) - \left(\sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} \right)^2}, \quad z = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2}}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{y_i}^2}},$$

$$x = tx \cdot z + \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i}{\sigma_{x_i}^2} \left(\sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \right) - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} \left(\sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i z_i}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{tx_i}{\sigma_{tx_i}^2} \right)}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \left(\sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \right) - \left(\sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} \right)^2}.$$

Сшивка микротреков из двух соседних слоёв эмульсии. Для определения угловых характеристик (псевдобыстрот) вторичных частиц, образовавшихся при ядерном взаимодействии, производится сшивка микротреков из соседних слоев эмульсии (рис. 4.13). На начальном этапе этой процедуры каждый микротрек из эмульсионного слоя А сшивается с каждым микротреком из соседнего слоя В. Из всего многообразия вариантов выбирается трек с минимальным χ^2 , проходящий через вершину взаимодействия. В результате получается множество треков (так называемая мишенная диаграмма), состоящих из двух частей и имеющих меньшую угловую неопределённость, чем каждый отдельный микротрек (рис. 4.14).

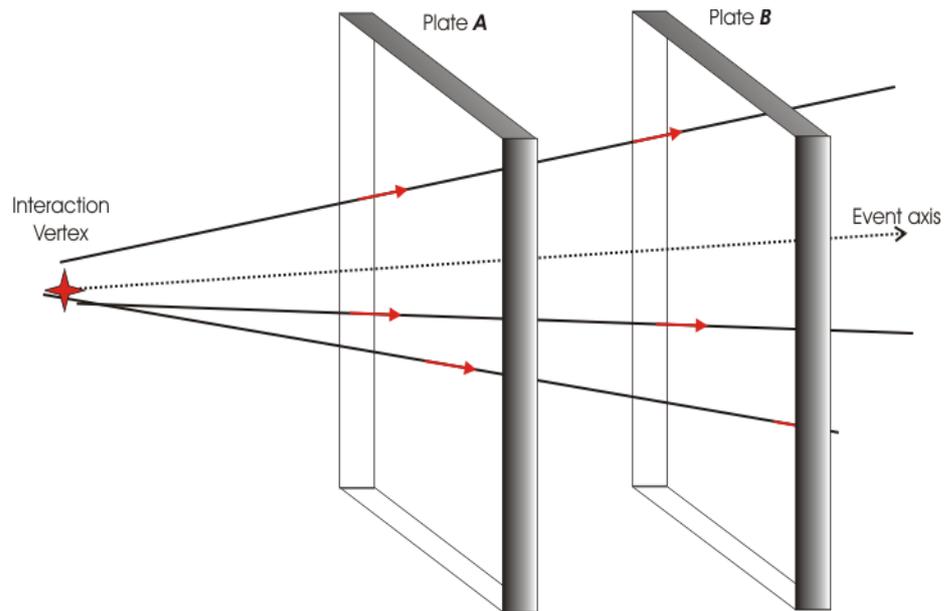


Рис. 4.13. Продление микротреков в соседний слой эмульсии..

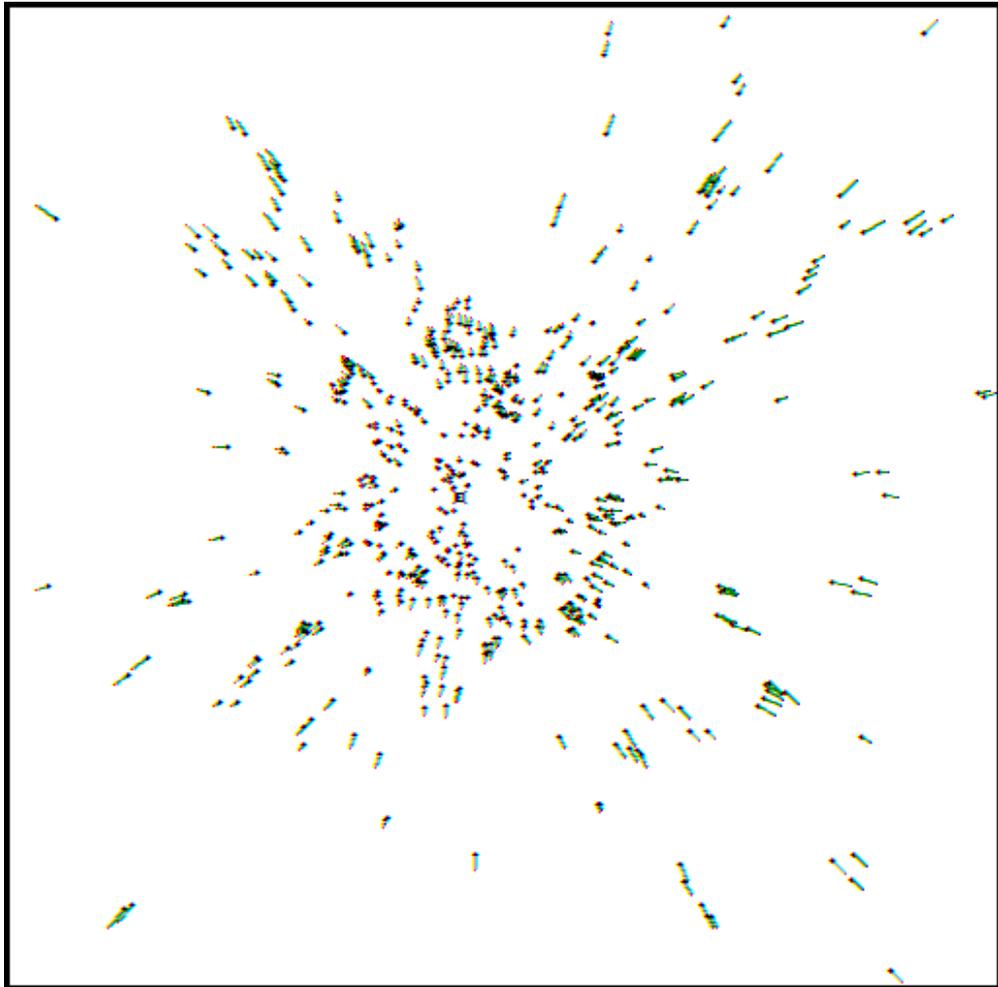


Рис. 4.14. Результат трекинга и шивки двух слоёв эмульсии: мишенная диаграмма для 647 частиц (событие 5c15e).

Поиск оси события.

Направление движения первоначального ускоренного ядра свинца может отличаться от нормали к плоскости события вследствие расхождения пучка. В то же время ось события задана направлением движения первоначального ядра. Алгоритм поиска оси события (рис. 4.15) во многом сходен с алгоритмом поиска вершины взаимодействия. На основе данных о её координатах x_c , y_c строится множество точек максимального сближения треков из множества A с вершиной c . Из первоначального множества треков A исключаются все треки, точки максимального сближения которых с вершиной c находятся за пределами $3\sigma_c$, где σ_c - стандартная ошибка определения положения точки c . Углы оставшихся треков с осью события усредняются, и находится первоначальное направление оси. Затем строятся

гистограммы угловых распределений треков относительно этой оси (рис. 4.15), из которых находятся новые значения направления оси. Из A исключаются треки, угол между направлением которых и направлением оси превышает $3\sigma_i$, где σ_i - ошибка определения угла. Затем снова строятся гистограммы угловых распределений, и процедура повторяется до тех пор, пока углы между направлениями всех треков не окажутся внутри $3\sigma_i$, т.е. когда из A нельзя будет исключить ни один трек.

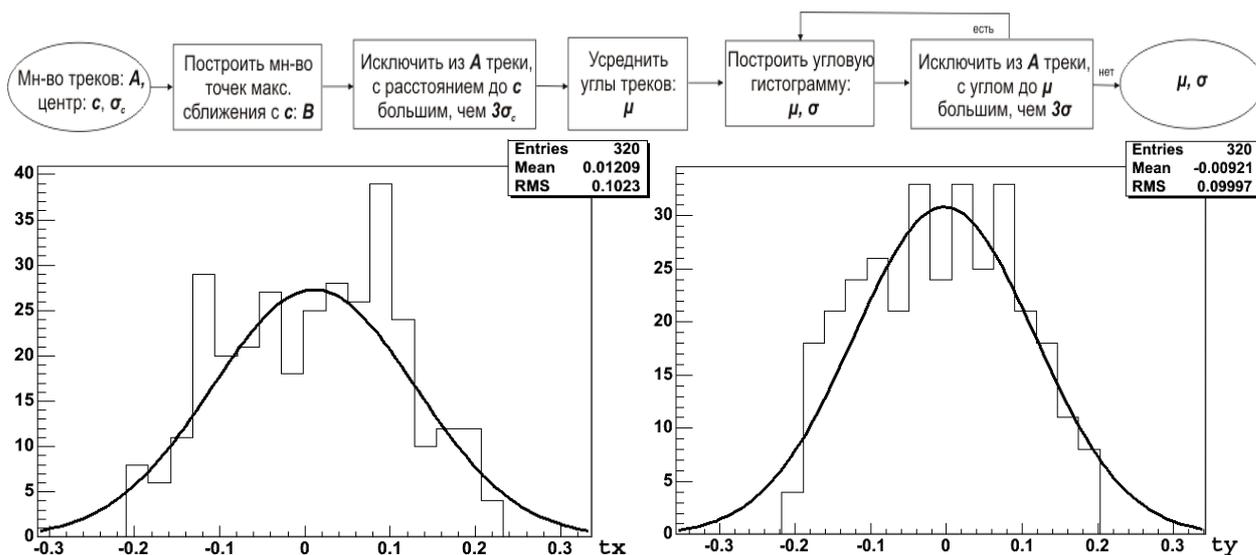


Рис 4.15. *Вверху:* Блок-схема алгоритма поиска оси события. *Внизу:* Пример угловых распределений треков относительно оси события (tx слева и ty справа).

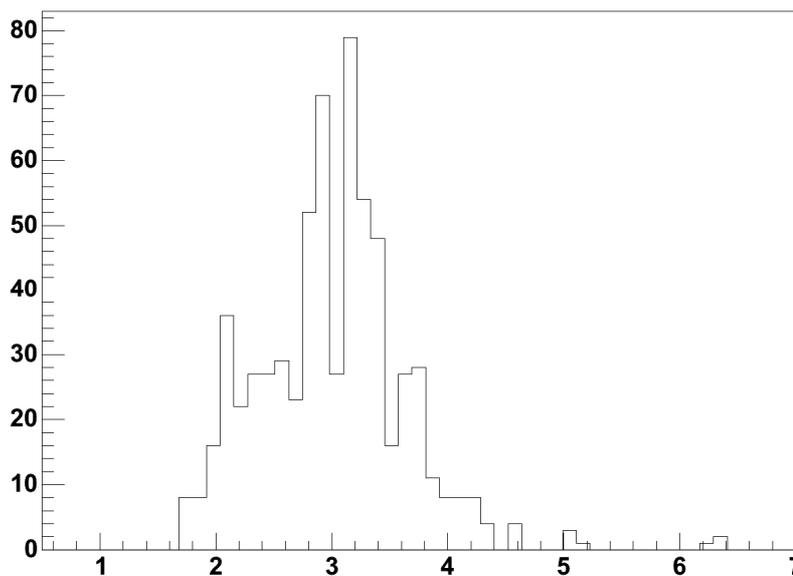


Рис. 4.16. Распределение псевдобыстрот вторичных заряженных частиц в событии 5c15e после автоматизированной обработки.

Реализация методики

Методика изложенная в данной главе была реализована в виде библиотеки программ. Первая программа, включающая в себя алгоритмы фильтрации, бинаризации, кластеринга, поиска вершины взаимодействия, свободного и вершинного трекинга, была реализована в виде обработчика изображений для программы автоматизации, рассмотренной в предыдущей главе (рис. 3.2). Это позволило произвести обработку изображений, поиск кластеров, вершины взаимодействия, и микротреков в режиме реального времени за время менее 1 мин. Диаграмма работы обрабатывающего модуля эксперимента EMU-15 представлена на рис. 4.17. Алгоритмы линкинга, поиска оси события и физического анализа были реализованы в отдельной программе. Для реализации обеих программ использовался язык C++.

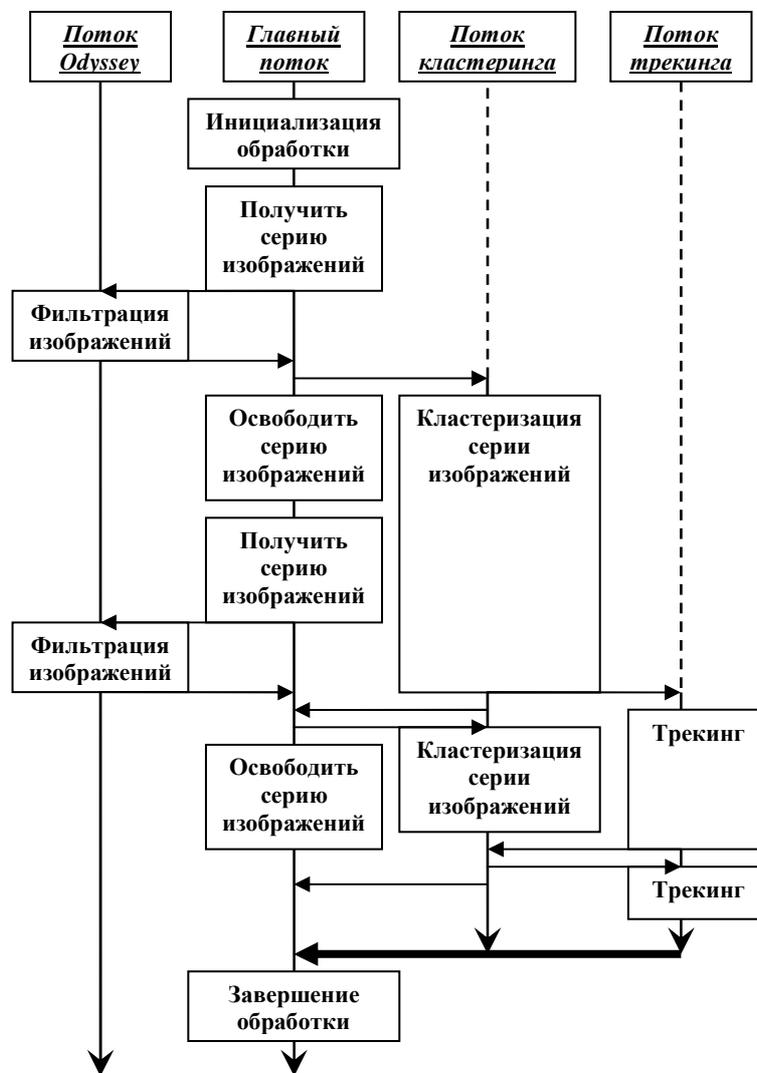


Рис. 4.17. Диаграмма работы обрабатывающего модуля эксперимента EMU-15.

В соответствии с алгоритмом программы обработки изображений, созданной в ходе выполнения диссертационной работы, специально для эксперимента EMU-15, последовательно производится выделение «чёрных» (фоновых) пикселей, фильтрация изображений, бинаризация изображений, выделение связных областей (кластеризация), фильтрация кластеров. Выполнена тщательная проверка всех этапов программы, для чего проведена методическая съемка реального взаимодействия с шагом по глубине $\frac{1}{4}$ микрона. Практически полное соответствие результатов работы программы характеристикам реальной эмульсии подтверждает правильность разработанного и выполненного алгоритма кластеризации.

Проверена эффективность блока программ трекинга посредством визуальных измерений и на модельных взаимодействиях. Эффективность восстановления треков заряженных частиц более 90%. Полученные таким образом экспериментальные данные позволяют исследовать особенности угловых распределений частиц, проводить поиск многочастичных корреляций, появление которых можно ожидать при адронизации возбужденной ядерной материи, и проанализировать эти распределения с целью поиска сигналов, специфичных для кварк-глюонной плазмы. Результаты обработки продемонстрированы на примере события 5c15e.

Таким образом, успешно решенная задача распознавания образов актуальна при изучении отдельного события. Детальное исследование индивидуальных взаимодействий может помочь вскрыть новые редкие явления, и получаемые при этом выводы будут статистически значимы из-за большого числа частиц, рожденных в отдельно взятом событии.

В результате работы над настоящей диссертацией был создан банк данных и произведена предварительная обработка 100 событий.

Использование комплекса ПАВИКОМ в других ядерно-физических исследованиях

Исследование кластеризации нуклонов в легких ядрах посредством изучения процессов мультифрагментации в эксперименте «БЕККЕРЕЛЬ»

Изучение процессов фрагментации легких радиоактивных ядер, а также получение обзорной информации по зарядовым состояниям вторичных частиц при фрагментации промежуточных и тяжелых ядер является целью исследований, выполненных в рамках эксперимента «БЕККЕРЕЛЬ» [65,66]. В коллаборации участвовали Объединенный институт ядерных исследований, Дубна – головной институт; Физический институт имени П.Н.Лебедева РАН, Москва; Университет имени П. Шафарика, Кошице, Словакия; Петербургский институт ядерной физики РАН, Гатчина; Институт космических исследований, Магурель-Бухарест, Румыния; Институт экспериментальной физики САН, Кошице, Словакия. (Все коллабораторы внесли различный вклад в реализацию проекта. В частности, группа ПАВИКОМ использовала комплекс для видеообработки взаимодействий в ядерной эмульсии легких ядер вторичных пучков нуклотрона ОИЯИ).

Задача эксперимента состоит в исследовании кластерной структуры ядер и возможных коллективных возбуждений ядерной материи. В этой связи особое внимание уделяется процессу множественного образования вторичных частиц без обмена квантовыми числами между сталкивающимися ядрами (дифракционная диссоциация ядер), позволяющему как бы «заглянуть» в структуру изучаемого ядра.

В эксперименте слои фотоэмульсии с размерами 100×200 мм² и толщиной эмульсионного слоя около 600 мкм облучаются продольно вторичными пучками легких релятивистских ядер He^4 , Li^6 , Li^7 , Be^7 , B^{10} , C^{12} , N^{14} , O^{16} , Ne^{22} , Mg^{24} и Si^{28} , полученными на нуклотроне ОИЯИ с энергией свыше 1 ГэВ на нуклон. Использование пучка нуклотрона для исследования

фрагментации дает возможность достижения режима предельной фрагментации, коллимации продуктов фрагментации в узком конусе, а также минимальных ионизационных потерь продуктов реакций.

Программный пакет, изначально созданный для обработки данных эксперимента ЕМУ-15, послужил базой для развития методики сканирования и создания программного пакета для автоматизации измерений заряда ядер для эксперимента БЕККЕРЕЛЬ [45].

Изучение зарядового распределения ядер в космических лучах и поиск сверхтяжелых ядер в оливинах из метеоритов

Техника твердотельных трековых детекторов нашла применение и для исследования реликтовых треков, оставленных частицами космических лучей в минералах, входящих в состав некоторых метеоритов. Метод, выбранный для поиска сверхтяжелых ядер и состоящий в изучении треков ядер в оливинах из метеоритов, представляется весьма перспективным.

В первых экспериментах по поиску сверхтяжелых ядер в составе космических лучей использовались толстые слои ядерной эмульсии, экспонировавшейся в верхних слоях атмосферы на шарах-зондах. В дальнейшем для этой цели использовались также многослойные детекторы из полимерных материалов в сочетании с черенковскими детекторами. В этих экспериментах было идентифицировано несколько десятков треков ядер с $86 \leq Z \leq 100$ но ни одного трека ядра с $Z \geq 110$. Анализ этих результатов показал, что для эффективного поиска сверхтяжелых ядер необходимо использовать методику с более высокой чувствительностью, что требует создания на орбитальных станциях трековых или электронных детекторов с огромными площадями порядка 100 м^2 и длительным, не менее года, временем экспозиции.

В 2005 г. на ПАВИКОМ начата реализация проекта ОЛИМПИА («Оливины из метеоритов – поиск тяжелых и сверхтяжелых ядер») [17], который фактически является продолжением исследований, начатых в ЛЯР ОИЯИ. Проект выполняется группой ПАВИКОМ в коллаборации с

Институтом геохимии и аналитической химии им. Вернадского РАН, Научно-исследовательским институтом ядерной физики им. Д.В.Скобельцына МГУ, Институтом геохимии окружающей среды НАНУ. В этой работе используется способность силикатных кристаллов из метеоритов (оливинов, пироксенов) регистрировать и сохранять в течение длительного времени ($> 10^8$ лет) треки ядер с $Z \geq 20$ (рис. 4.26). 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 $Z \geq 90$, а в кристаллах из поверхностных участков метеорита (глубина ≤ 1 см) до 10^4 треков. Таким образом, фактор длительной экспозиции метеоритов в космосе приводит к огромному преимуществу данного метода по сравнению с методами, основанными на использовании различных спутниковых и аэростатных детекторов. Измеряя параметры треков и зависимость их плотности от глубины проникновения частицы в метеорит, можно не только идентифицировать частицы, но и определить их спектры.

Измерение потоков и спектров тяжелых и сверхтяжелых космических ядер является чувствительным способом изучения состава источников космических лучей, процессов, происходящих как в самих источниках, так и в межзвездной среде, в которой распространяются космические лучи, и моделей удержания космических лучей в галактике. К сожалению, существующие в настоящее время экспериментальные данные по распространенности тяжелых ядер (с $Z > 30$) во Вселенной, а также по спектрам и потокам этих ядер в общем потоке космических лучей весьма бедны, а для трансфермиевых ядер достаточно надежные данные вообще отсутствуют. Точно также отсутствуют какие-либо данные и о возможном существовании экзотических сверхтяжелых ядер. Проведение в рамках начатой работы поиска следов тяжелых и сверхтяжелых ядер в оливинах из метеоритов могло бы прояснить многие из этих вопросов. Прежде всего, эта работа позволила бы уточнить существующие данные по потокам и спектрам ядер группы урана, которые в настоящее время недостаточно точны. Далее, можно было бы проверить найденное ранее указание на существование в

оливинах из метеоритов длинных треков, соответствующих трансфермиевым ядрам с $Z \geq 110$ [17] и провести поиск таких ядер. Наконец, нельзя исключать возможность нахождения каких-то необычных треков, связанных с экзотическими ядрами.

Задача исследования тяжелых и сверхтяжелых ядер в космических лучах и поиск среди них трансфермиевых ядер с зарядами $Z \geq 110$ принадлежат к числу наиболее значимых и актуальных задач современной ядерной физики и астрофизики [67]. В ходе выполнения обсуждаемой работы для просмотра образцов, поиска и обработки треков тяжелых и сверхтяжелых ядер космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов (приблизительный объем оливина в двух подготовленных для обработки метеоритах Марьялахти (рис. 4.18) и Игл Стейшн составляет 6 куб.см) используется комплекс ПАВИКОМ. Что, как подтвердили уже проведенные нами методические исследования с кристаллами оливинов из метеоритов, обеспечивает принципиально важное быстроедействие в ходе обработки материала и необходимую точность и надежность измерений [68-80].



Рис. 4.18. Слева: метеорит Марьялахти и его части. Справа: видеоизображение в отожженном кристалле оливина; размер поля зрения 80×60 мкм, в центральной части видно начало трека реликтового ядра.

Особенностью методики обработки трековых детекторов данного эксперимента (оливинов из метеоритов) является необходимость в шлифовке, т.е. необратимом разрушении части кристалла. В рамках проекта

ОЛИМПИА потребовалось создать методику сканирования всей площади кристалла, а также базу данных изображений для сохранения информации о треках в кристалле. Для этого был разработан специализированный модуль программы автоматизации, способный записывать получаемые изображения на жесткий диск компьютера, для их последующей записи на резервные носители информации.

Исследование осцилляций нейтрино: адаптация программного обеспечения ПАВИКОМ для обработки первичных данных эксперимента OPERA

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.

Недавние эксперименты с солнечными нейтрино, в которых наблюдались переходы электронных нейтрино в нейтрино других ароматов, дали достаточно надежное доказательство существования нейтринных осцилляций, и, следовательно, ненулевых масс нейтрино [81,82].

Напомним, что осцилляции возможны, если нейтрино обладает массой и имеет место смешивание. В этом случае левые компоненты нейтринных полей ν_α ($\alpha = e, \mu, \tau$), являющиеся собственными состояниями лагранжиана слабого взаимодействия, не тождественны собственным массовым состояниям нейтрино ν_i , а представляют собой линейные комбинации $\nu_\alpha = \sum U_{\alpha i} \nu_i$, где $U_{\alpha i}$ – унитарная матрица смешивания. Гипотеза о возможности нейтринных осцилляций была впервые высказана Б. М. Понтекорво еще в 1957 г [83]. Однако долгое время обнаружить эти осцилляции не удавалось. Успех недавних экспериментов в значительной мере обусловлен использованием так называемых «дальних» нейтрино, т. е. нейтрино, которые проходят от источника до детектора значительное расстояние L . Дело в том, что чувствительность экспериментов к малой величине разности квадратов масс $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ определяется пролетной базой эксперимента

L , т. е., как раз расстоянием между источником нейтрино и детектором. Для наблюдения осцилляций необходимо, чтобы пролетная база была близка к так называемой «длине осцилляций» $L = 4\pi E_\nu / \Delta m_{ij}^2$, которая, при малых значениях Δm_{ij}^2 , может быть очень большой.

Заметим, что данные по атмосферным нейтрино дают также 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. В эксперименте OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) [32], в котором участвуют физики из 39 институтов 13 стран мира, будет исследоваться область параметров нейтринных осцилляций, на которую указывают данные, полученные в Супер-Камиоканде. Таким образом, эксперимент OPERA с пучком «дальних» нейтрино от ускорителя (пролетная база составляет 730 км), должен дать определенный ответ относительно проблемы аномалии атмосферных нейтрино. Кроме того, этот эксперимент чувствителен к осцилляциям $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, что позволит исследовать элементы матрицы смешивания на основе анализа, учитывающего все три нейтринных аромата.

OPERA - фотоэмульсионный эксперимент на "появление", в котором осцилляции $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ будут изучаться путем прямого наблюдения распадов τ -лептонов, образованных в ν_τ -CC взаимодействиях.

В эксперименте OPERA ближний детектор отсутствует и будет использован только дальний. Это свинцово-фотоэмульсионный детектор модульной конструкции с полезной массой около 1,8 кт, из которой масса фотоэмульсии составляет около 100 т, что не имеет аналогов в экспериментальной физике. Структура единичного элемента-блока определяется средней длиной пробега τ -лептона, которая при энергиях нейтринного пучка CNGS [84] составляет около 1 мм. В составе блока слои ядерной фотоэмульсии толщиной 50 мкм, политой с двух сторон на 200 мкм пластиковую основу, чередуются с 1мм свинцовыми пластинами. Координаты траектории заряженной частицы на границе эмульсии

определяются с высокой точностью (0,1 – 0,2 мкм), что обеспечивает точность измерения углов не хуже 5 – 8 мрад. Если ν_τ взаимодействует в какой-либо из свинцовых пластин, то с наибольшей вероятностью распад τ -лептона произойдет в следующей за ней пластине свинца. При прослеживании треков в эмульсионных слоях, прилегающих к этой пластине, на одном из них будет наблюдаться излом. Каждый блок такой конфигурации имеет размер – $10,2 \times 12,7 \times 7,5$ см³, вес – 8,3 кг (7,9 кг – свинец и 0,4 кг – эмульсия) и содержит 56 свинцовых пластин и 57 пластин с двухсторонней фотоэмульсией, что при толщине 7,5 см соответствует $10X_0$. Общее число блоков составляет 206336.

Полное число событий, обусловленных взаимодействиями мюонных нейтрино от пучка CERN в детекторе за пять лет экспозиции должно составить около 25000. Обработка такого громадного массива данных становится возможной лишь благодаря недавним достижениям в развитии автоматизированных сканирующих систем, в которых используются микроскопы, контролируемые компьютерами. Такие системы сейчас имеются в распоряжении европейских и японских участников эксперимента OPERA. Единственной установкой такого класса в России является измерительный комплекс ПАВИКОМ.

Результаты работы этого комплекса неоднократно обсуждались на международных конференциях и рабочих совещаниях мирового эмульсионного сообщества и всегда вызывали большой интерес и положительную реакцию аудитории. Сочетание технических возможностей комплекса, наличия высококвалифицированной научной группы с опытом эксплуатации и обработки экспериментального материала трековых детекторов позволяет рассчитывать на успех в случае использования ПАВИКОМ для обработки эмульсионного материала эксперимента OPERA.

В 2005 году ПАВИКОМ был включен в число европейских автоматизированных центров по обработке эмульсии эксперимента OPERA. Однако для использования этого комплекса в эксперименте OPERA необходимо было провести ряд подготовительных работ, связанных с

модернизацией аппаратуры, отладкой специализированного пакета программ.

Прямое использование стандартных для OPERA пакетов программ автоматизации измерений Sysal [85,86] и FEDRA [87] оказалось невозможным из-за различий в интерфейсах контроллеров микроскопов ESS и ПАВИКОМ. Попытка адаптации этих программных пакетов не увенчалась успехом из-за недостаточной функциональности, предоставляемой контроллером микроскопа ПАВИКОМ-2. Поэтому было принято решение о разработке специализированного модуля (рис 4.19) для программы автоматизации комплекса ПАВИКОМ, который был бы совместим с FEDRA и использовал предоставляемые этим пакетом стандартные для OPERA алгоритмы обработки изображений и поиска микротрекков.

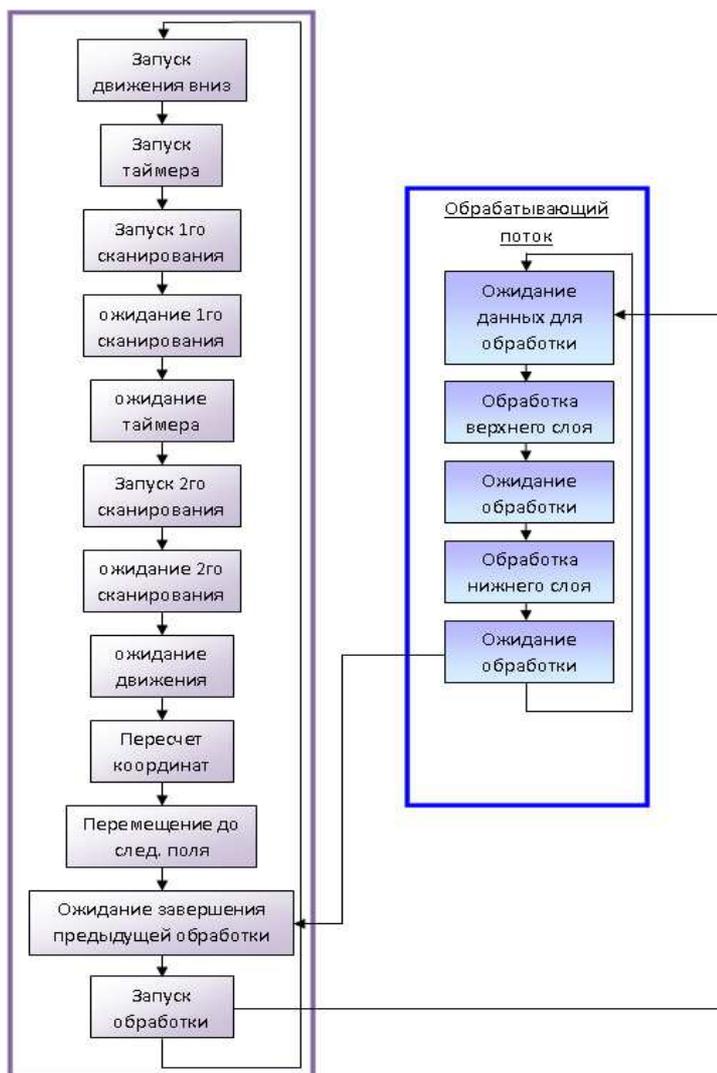


Рис. 4.19. Диаграмма взаимодействия управляющего модуля и обрабатывающего модуля эксперимента OPERA.

Адаптация комплекса ПАВИКОМ [56] к задачам эксперимента OPERA дает российским физикам уникальную возможность участия в обработке данных в одном из наиболее амбициозных международных экспериментов, результаты которого могут иметь первостепенное значение для физики элементарных частиц и астрофизики.

Заключение

В результате работы над настоящей диссертацией была разработана методика ядерно-физических исследований на основе автоматизированной обработки данных трековых детекторов и осуществлен ввод в эксплуатацию одного из автоматизированных микроскопов измерительного комплекса ПАВИКОМ. Разработаны программы автоматического перемещения стола микроскопа при разных режимах сканирования и соответствующее программное обеспечение для обработки и сохранения видеоизображений. Продуманная модульная структура программы автоматизации и реализация безостановочного сканирования и обработки изображений в режиме реального времени создали принципиальную возможность для автоматизации обработки данных экспериментов EMU-15, OPERA, ОЛИМПИЯ, а также будущих экспериментов.

К основным результатам диссертации относятся:

1. Разработано программное обеспечение (ПО), которое дало возможность автоматизировать труд микроскописта на микроскопе ПАВИКОМ-2. ПО позволяет производить безостановочное сканирование по заданной траектории и производить обработку изображений в режиме реального времени. ПО является универсальным, т.е. не зависит от конкретного типа детектора и схемы эксперимента. ПО обеспечило возможность проектирования и успешной реализации современной многопроцессорной структуры комплекса ПАВИКОМ. Модульное строение ПО делает его весьма гибким и позволяет легко адаптировать к нуждам различных экспериментов.
2. Созданная методика обработки данных эксперимента EMU-15 позволила с высокой (~90%) эффективностью находить микротреки в ядерной фотоэмульсии. При этом разработаны оригинальные алгоритмы обработки изображений: фильтрация, бинаризация и кластеризация (поиск изображений зёрен металлического серебра в ядерной фотоэмульсии).

Разработаны высокоэффективные алгоритмы поиска микротреков в ядерной фотоэмульсии, как с использованием, так и без использования информации о вершине события. Реализация методики в виде программного модуля и его применение совместно с ПО автоматизированного микроскопа ПАВИКОМ-2 позволило распознавать и восстанавливать треки вторичных заряженных частиц, рождённых во взаимодействиях ядер свинца с энергией 158 ГэВ/нуклон и с множественностью более 1500 частиц за время менее 1 мин.

3. На основе разработанной методики автоматизированного сканирования

- создана программа автоматизации измерения заряда ядер для эксперимента БЕККЕРЕЛЬ;
- создан метод безостановочного сканирования для получения базы данных изображений треков космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов проекта ОЛИМПИА;
- выполнена принципиальная адаптация комплекса ПАВИКОМ к задачам эксперимента OPERA.

В заключение автор считает приятным долгом поблагодарить всех своих коллег, оказывавших содействие в выполнении данной работы: научного руководителя Мерзона Г.И., руководителя группы ПАВИКОМ Полухину Н.Г., сотрудников Старкова Н.И., Владимирова М.С., Гончарову Л.А., Русецкого А.С. за помощь в проведении исследования и измерений.

Список литературы

- 1) W. C. Röntgen, On a new kind of rays. "Nature ", **53** (1896) 274–276
- 2) A. H. Becquerel, *Comptes Rendus* **122**, 420 and 501 (1896)
- 3) Hess, V. Über den Ursprung der durchdringenden Strahlung. *Phys. Zsch.* **14**, 610–617 (1913).
- 4) C.T.R. Wilson, Phil. Trans., v. 189, 265 (1897).
- 5) Glaser D. A., Some effects of ionizing radiation on the formation of bubbles in liquids, *Phys. Rev.*, 1952, v.87, №4
- 6) Клайнкнехт К. Детекторы корпускулярных излучений. М., 1990.
- 7) 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.
- 8) Marx, Jay N.; Nygren, David R., The time projection chamber, *Physics Today*, Volume 31, Issue 10, October 1978, pp.46-53
- 9) Kenneth G. McKay, Electron-Hole Production in Germanium by Alpha-Particles, *Phys. Rev.* **84**, 829-832 (1951)
- 10) Группен К., Детекторы элементарных частиц, 1999
- 11) Амосов В.В, Гуцин 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
- 12) Ammosov V.V., Gushchin E.M., Somov S.V., Timofeev M.K., Ryabov V.A. Tipografshchik G.I., The fibre track detector *Radiation Measurements*, 1995, vol 25, № 1-4, pp. 183-184;
- 13) Гуцин Е.М., Рябов В.А., Сомов С.В., Микроканальный сцинтилляционный трековый детектор, Краткие сообщения по физике ФИАНб 1995 № 5-6, стр. 10-17

- 14) Гушин Е.М., Рябов В.А., Сомов С.В., Наблюдение треков заряженных частиц по черенковскому излучению, Письма в ЖТФ, 1995, т. 21, вып. 17, стр. 42-45
- 15) Price P.B., Fleischer R.L., Peterson D.D. et al. (1967) Identification of isotopes of energetic particles with dielectric track detectors. *Phys.Rev.* 164, 1618-20.
- 16) Price P.B., Fleischer R.L., Peterson D.D. et al. (1968) High resolution study of low energy cosmic rays with Lexan track detectors. *Phys.Rev.Lett.* 21, 630-3.
- 17) В.Л. Гинзбург, Н.Г. Полухина и др., Проблемы и перспективы поиска следов тяжёлых и сверхтяжёлых ядер в оливинах из метеоритов, ДАН, 2005, т.402, № 4, с. 472-474
- 18) Burger G., Frunauer F. and Paretzke H. (1970) The applicability of track detectors in neutron dosimetry. In: *Proc.Symp. Adv. Rad.Detectors.* International Atomic Energy Agency, Vienna, paper Sm-143. 17.
- 19) Fremlin J.H., Abu-Jarad F. (1980) Alpha-emitters in the environment. I:Natural sources. *Nucl. Instr. Meth.* 173, 197-200.
- 20) Frank A.L., Benton E.V. (1975) Active and passive radon-daughter dosimeters using track-etch detectors. Dept. of Physics, Univ. of San Francisco, Tech.Report 39.
- 21) Savvides E., Manolopoulou M., Papastefanou C., Charalambous S. (1985) A simple device for measuring radon exhalation from the ground. *Int. J. Appl. Radiat. Isotop.* 36, 79-81.
- 22) Birot A., Adroguer B., Fontan J. (1970) Vertical Distribution of Radon 222 in the atmosphere and its use for study of exchange in the lower troposphere. *J.Geophysics. Res.* 75, 2373-83.
- 23) Fowler F.H., Perkins D. H. (1961) The possibility of therapeutic applications of beams of negative mesons. *Nature* 189, 524-8.
- 24) Benton E.V., Curtin S.B., Raju M.R., Tobias C.A. (1970) Studies of negative pion beams by means of plastic nuclear track detectors. In: *Proc. 7th Int.*

- Colloq. Corpuscular Photography and Visual Solid Detectors, Barselona, pp. 423-8.
- 25) Particle Detectors, Physical Review D, July 24, 2008
- 26) Пауэлл С., Фаулер П., Перкинс Д., Исследование элементарных частиц фотографическим методом, пер. с англ., М., 1962.
- 27) Fowler P.H., Adams R.V., Cowen V.G., Kidd J.M. (1970) The charge spectrum of very heavy cosmic ray nuclei. Proc. Roy.Soc.Lond.A318, 1-43.
- 28) 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
- 29) 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.
- 30) K. Kodama, et.al, Detection and analysis of tau-neutrino interactions in DONUT emulsion target, Nuclear Inst. And Meth. A 493 (202), 45-66
- 31) E. Eskut et al, Final results from a search for nu-mu to nu-tau oscillations with the CHORUS experiment, Publ. Ref.: CERN-PH-EP/2007-034, arXiv:0710.3361, Nucl. Phys. B. 793, 326-343 (2008).
- 32) R Acquafredda et al 2009, The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino, *JINST* P04018, Volume 4, April 2009
- 33) Э.Г. Боос, Автоматизация обработки треков в пузырьковых камерах
- 34) Ikuo Tezuka, CHORUS results and developments of emulsion technique.
- 35) I.M. Papadopoulos, Nuclear Emulsion Readout Techniques Developed for the CHORUS Experiment.
- 36) Toshiyuki Nakano, Emulsion Scanning Technologies.
- 37) Hoshino K, Niwa K et al, 1974, Proceedings of international cosmic ray symposium of high energy phenomena (Tokyo) 149

- 38) N. D'Ambrosio, High-Speed Automatic Microscopy for Real Time Tracks Reconstruction in Nuclear Emulsion, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 53, NO. 3, JUNE 2006
- 39) L. Arrabito et al., Hardware performance of a scanning system for high speed analysis of nuclear emulsions, Nuclear Instr. and Meth. A 568 (2006) 578-587
- 40) N. Armenise et al, High speed particle tracking in nuclear emulsions by last-generation automatic microscopes, Nuclear Instr. and Meth. A 551 (2005) 261-270
- 41) G. Sirri, Fast automated scanning of opera emulsion films, Nuclear Inst. and Meth. B 172 (2007) 324-326
- 42) M. De Serio, High precision measurements with nuclear emulsions using fast automated microscopes, Nuclear Instr. And Meth. A 554 (2005) 247-254
- 43) Беловицкий Г.Е, Конобеевский Е.С., Завразина В.П., Зуев С.В., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Александров А.Б., Лукьянов С.М., Соболев Ю.Г., Выделение траекторий заряженных частиц в ядерных фотоэмульсиях, Известия РАН, 2006, т. 70, № 5, с. 646-649
- 44) Александров А.Б., Апачева И.Ю., Гончарова Л.А., Мерзон Г.И., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Фейнберг Е.Л., Методика автоматизированной обработки данных эмульсионных трекеров для исследования Pb-Pb взаимодействий при энергии 158 ГэВ/нуклон, 2005, препринт ФИАН № 23
- 45) Александров А.Б., Владимиров М.С., Гончарова Л.А., Коновалова Н.С., Орлова Г.И., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Чернявский М.М., Щелканов А.О., Автоматизация измерений в толстослойных ядерных эмульсиях при продольном облучении ядрами с энергией 1ГэВ на нуклон с целью получения обзорной информации по зарядовым состояниям вторичных частиц, 2007, препринт ФИАН № 4
- 46) Александров А.Б., Апачева И.Ю., Гончарова Л.А., Коновалова Н.С., Орлова Г.И., Полухина Н.Г. Старков Н.И., Фейнберг Е.Л., Чернявский М.М., Методика измерения зарядов релятивистских ядер в фотоэмульсии на автоматизированном комплексе ПАВИКОМ, 2005, препринт ФИАН № 29

- 47) Vladymyrov M.S., Aleksandrov A.B., Chernyavsky M.M., Goncharova L.A., Orlova G.I., Polukhina N.G., Starkov H.I., Tsarev V.A., Galkin V.I., Publichenko P.A., Roganova T.M., Sazhina G.P., PAVICOM facility for treatment of OPERA experimental data, Proceedings of science, Nufact08, 2008, p. 143, Valencia, June 2008
http://pos.sissa.it/archive/conferences/074/143/Nufact08_143.pdf
- 48) Александров А. Б., Гончарова Л. А., Давыдов Д. А., Фейнберг Е.Л., Полухина Н. Г., Публиченко П.А., Роганова Т.М., Автоматизированные методы обработки трековых детекторов на базе комплекса ПАВИКОМ, Письма в ЭЧАЯ, 2007, т.4, №1 (137), с.170-175.
- 49) А.Б.Александров, Л.А.Гончарова, Н.С.Коновалова, Г.И.Орлова, Н.Г.Пересадько, Н.Г.Полухина, Н.И.Старков, И.Ю.Тарасова, М.М.Чернявский, А.О. Щелканов, Методика измерения зарядов релятивистских ядер в фотоэмульсии на автоматизированном комплексе ПАВИКОМ, ПТЭ, 2007, vol.50, N 4, p.469
- 50) Aleksandrov A., Polukhina N., Starkov N., The Pattern Recognition Software for Automatic Treatment of Track Detector Data at the PAVICOM Completely Automated Measuring Facility, 23rd International Conference on Nuclear Tracks in Solids; Program&Abstracts; p.84; Beijing, China, September 11-15, 2006.
- 51) Alexandrov A., Kashkarov L., Polukhina N., Starkov N., The Pattern Recognition Software for Automatic Treatment of Track Detector Data at the PAVICOM Completely Automated Measuring Facility, Radiation Measurements Volume 43, Supplement 1, August 2008, Pages S120-S124 Proceedings of the 23rd International Conference on Nuclear Tracks in Solids
- 52) Тумендэлгэр Ц. и др. «Калориметрия электроядерной мишени для уран-свинцовой сборки при энергии протонов 1.5 ГэВ» Препринт ОИЯИ Р1-99-247. 1999.
- 53) Кривопустов М.И. и др. «О первом эксперименте по калориметрии уранового blankets на модели U/Pb-сборки электроядерной установки

- «ЭНЕРГИЯ ПЛЮС ТРАНСМУТАЦИЯ» на пучке синхрофазотрона ОИЯИ при энергии протонов 1.5 ГэВ». Препринт ОИЯИ Р1-2000-168. 2000.
- 54) Публиченко П.А., Галкин В.И., Дербина В.А., Замчалова Е.А., Копенкин В.В., Котельников К.А., Манагадзе А.К., Назаров С.Н., Оседло В.И., Ошуев Д.С., Полухина Н.Г., Ракобольская И.В., Роганова Т.М., Сажина Г.П., Свешникова Л.Г., Суходольская В.А., Яшин И.В., «Исследование тяжелых ядер в космических лучах», Известия РАН, сер. физ., Т.66, N.11, 2002, с.1627-1630
- 55) Публиченко П.А., Дербина В.А., Свешникова Л.Г., Полухина Н.Г., Котельников К.А., Методика автоматического сканирования рентгеновских пленок, препринт ФИАН №8, 2003
- 56) Chernavskaya O.D. et. al. CERN Experiment EMU-15 on Ultrarelativistic Very Heavy Ion Central Collision.// Preprint N 7 of Lebedev Physical Institute of RAS, 1994.
- 57) Chernavskaya O.D. et.al. The Central Pb-Pb Interactions with Energies 158 GeV/nucleon// 28th International Conference on High Energy Physics, Proc., Warsaw, 1996, V.1. P.941-942.
- 58) Добротин Н.А. и др. Исследования центральных Pb-Pb взаимодействий при высоких энергиях// Изв.АН, сер. физ. 1999. т.63. №3. с.485-488.
- 59) Boos E.G., Kvochkina T.N., Loktionova N.A. et al.; Investigation of Central Pb-Pb Interactions at Energies of 160 GeV/Nucleon with the Help of the Emulsion Magnetic Chamber; "Experiments at CERN in 1996", Geneva, ISSN 0259-093X, p.122-123.
- 60) Aleksandrov A.B., Apacheva I.Yu., Feinberg E.L., Goncharova L.A., Konovalova N.S., Martynov A.G., Polukhina N.G., Rousettsskii A.S., Starkov N.I., Tsarev V.A. «COMPLETELY AUTOMATED MEASUREMENT FACILITY (PAVICOM) FOR TRACK-DETECTOR DATA PROCESSING» Nuclear Instruments&Methods in Physics Research, A, 535 (2004) 542-545.
- 61) Aleksandrov A.B., Apacheva I.Yu., Feinberg E.L., Goncharova L.A., Martynov A.G., Polukhina N.G., Rousettsskii A.S., Starkov N.I., Tsarev V.A. «COMPLETELY AUTOMATED MEASUREMENT FACILITY (PAVICOM)

FOR TRACK-DETECTOR DATA PROCESSING» Proc.of “Channeling 2004” - International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena (November 2-6, 2004, Frascati), Proc. of SPIE, vol. 5974 (2005), 408-419.

62) Мыльцева В.А., Кочетов И.А. и др. Характеристики ядерных фотоэмульсий различных модификаций на основе эмульсии P-2// ПТЭ. 2002. №6. С.34-37.

63) Прэтт У., Цифровая обработка изображений т.2 , Мир 1982

64) R.K.Bock et. al., Data analysis techniques for high-energy physics – 2nd ed., Cambridge University Press, 2000.

65) Belaga V. V. et al. Phys.Atom.Nucl.58:1905-1910, 1995.

66) Belaga V. V. et al. Phys.Atom.Nucl.60:791-795, 1997.

67) Ginzburg, V.L., “Physics and Astrophysics, A Selection of Key Problems”, Pergamon, New York, 1985.

68) Кашкаров Л.Л., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Калинина Г.В., Ивлиев А.И., Александров А.Б., Гончарова Л.А., Апачева И.Ю., Новая методика определения параметров треков, образованных в оливине палласитов ядрами сверхтяжелых элементов космических лучей, Электронный научно-информационный журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН» №1(24), 2006 ISSN 1819-6586 http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2006/informbut_1_2006/planet-6.pdf

69) Kashkarov L.L., Polukhina N.G., Starkov N.I., Kalinina G.V., Ivliev A.I., Alexandrov A.B., Goncharova L.A., Apacheva I.Yu., Geometrical Track Parameters in the Pallasite Olivine: Identification of the Cosmic Ray Heavy Nuclei, 23rd International Conference on Nuclear Tracks in Solids; Program&Abstracts; p.226; Beijing, China, September 11-15, 2006

70) Kashkarov L.L., Polukhina N.G., Starkov N.I., Kalinina G.V., Ivliev A.I., Aleksandrov A.B., Goncharova L.A., Tarasova I.Yu., Geometrical track parameters in the pallasite olivine: identification of the cosmic ray heavy nuclei., Radiation Measurements (in press). Proceedings of the 23rd International Conference on Nuclear Tracks in Solids, Beijing, China, 11–15 September, 2006

23-rd Int. Conf. on Nucl. Tracks in Solids (Beijing, China, September 11 – 15, 2006). Radiation Measurements Volume 43, (2008) S266 – S268

71) Александров А.Б., Багуля А.В., Гончарова Л.А., Ивлиев А.И., Калинина Г.В., Кашкаров Л.Л., Коновалова Н.С., Полухина Н.Г., Русецкий А.С., Старков Н.И., Калибровочные измерения динамических и геометрических параметров треков в кристаллах оливина, образованных ускоренными ядрами Хе и U., "ВЕСТНИК ОТДЕЛЕНИЯ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН" электронный научно-информационный журнал № 1(25)'2007, ISSN 1819 – 6586, URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2007/informbul-1_2007/planet-9.pdf

72) Александров А.Б., Багуля А.В., Гончарова Л.А., Ивлиев А.И., Калинина Г.В., Кашкаров Л.Л., Коновалова Н.С., Полухина Н.Г., Русецкий А.С., Старков Н.И., О методике “сшивки” участков длиннопробежных треков при последовательном послойном травлении кристаллов оливина миллиметровых размеров из палласитов., "ВЕСТНИК ОТДЕЛЕНИЯ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН" электронный научно-информационный журнал № 1(25)'2007 ISSN 1819 – 6586 URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2007/informbul-1_2007/planet-10.pdf

73) А.Б.Александров, А.В.Багуля, Л.А.Гончарова, А.И.Ивлиев, Г.В.Калинина, Л.Л.Кашкаров, Н.С.Коновалова, Н.Г.Полухина, Н.И.Старков, В.А.Царев, Разработка методики идентификации заряда ядер космических лучей в кристаллах оливинов из метеоритов на основе автоматизированных измерений структурных микро-нарушений кристаллической решетки., Материалы VIII Международной конференции «Физико-химические и петрографические исследования в науках о Земле», Москва, 9-11 октября 2007 г. С. 173-174

74) 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 *ISSN издания 0455-0595*

75) 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., Изучение зарядового распределения галактических космических лучей и поиск следов сверхтяжелых ядер в кристаллах оливина из метеоритов , Краткие сообщения по физике ФИАН, 2008, т.9, 34-47 *ISSN издания 0455-0595*

76) 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., Калибровочные измерения характеристик треков ядер сверхтяжелых элементов в кристаллах оливина из метеоритов., Приборы и техника эксперимента 2009, т.2, стр. 1-5 *ISSN издания 0032-8162*

77) 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., Угловое распределение треков ядер VH- и VVH-групп космических лучей в отдельных кристаллах оливина из палласита Марьялахти, Электрон. науч.-информ. журнала «Вестник Отделения наук о Земле РАН» 2008, 1, 25,
http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2008/informbul-1_2008/planet-2.pdf

78) 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., Метод определения заряда ядер космических лучей по параметрам треков в кристаллах оливина из палласита Марьялахти, Электрон. науч.-информ. журнала «Вестник Отделения наук о Земле РАН» 2008, 1, 25,
http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2008/informbul-1_2008/planet-15.pdf

- 79) Александров А.Б, Багуля А.В., Владимиров М.С., Гончарова Л.А., Ивлиев А.И., Калинина Г.В., Кашкаров Л.Л, Коновалова Н.С., Н.М Окатьева, Полухина Н.Г., Русецкий А.С., Старков Н.И., Царев В.А., Методика определения заряда сверхтяжелых ($Z>50$) ядер космических лучей путем измерения травимой длины и скорости травления треков в оливине из метеоритов., 9-я Международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», Москва, 7-10 октября 2008 г, материалы конференции, 2008, стр. 13-17
- 80) Aleksandrov A.B., Bagulya A.V., Vladimirov M.S., Goncharova L.A., Ivliev A.I., Kalinina G.V., Kashkarov L.L., Konovalova N.S., Okateva N.M., Polukhina N.G., Rusetskii A.S., Starkov N.I., Tsarev V.A., Meteorites as a natural detectors of very heavy galactic cosmic ray nuclei: some aspects of the experimental track studies., Programme and Book of Abstracts Memorial International Conference CAMMAC (COMETS, ASTEROIDS, METEORS, METEORITES, ASTROBLEMS, CRATERS) 2008, Украина, г. Винница, 28 сентября – 3 октября 2008 г., стр. 84-85
- 81) B. Aharmim et al., Electron Energy Spectra, Fluxes, and Day-Night Assymetries of ^8B Solar Neutrinos from the 391-Day Salt Phase SNO Data Set, Phys.Rev.C72:055502,2005
- 82) B. Aharmim et al., Independent Measurements of the Total Active ^8B Solar Neutrino Flux Using an Array of ^3He Proportional Counters at the Sudbury Neutrino Observatory, Phys. Rev. Lett.101:111301,2008
- 83) Б. Понтекорво. Мезоний и антимезоний. Журнал экспериментальной и теоретической физики, Т.33, С.549—551 (1957)
- 84) L. Bruno et al., CNGS progress report 2004, AB-Note-2004-063-CNGS
- 85) S. Amendola et al., SySal: System of Salerno, Proc. The first International Workshop on Nuclear Emulsion Techniques (12-14 June 1998, Nagoya, Japan)
- 86) C. Bozza, Automatic microscope systems in the CHORUS experiment, NIM A 478 (2002) 411-414

87) V. Tioukov, I. Kreslo, Y. Petukhov, G. Sirri, The FEDRA – Framework for emulsion data reconstruction and analysis in the OPERA experiment, Nucl. Inst. and Meth. A 559 (2006) 103-105