

**Российская академия наук
Физический институт имени П.Н.Лебедева**

На правах рукописи

Полухина Наталья Геннадьевна

**Исследования актуальных проблем ядерной физики на основе методики
полностью автоматизированной обработки трековых детекторов на
многофункциональной установке ПАВИКОМ**

Специальность 01.04.23 – физика высоких энергий

Диссертация
в форме научного доклада на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва 2006

Работа выполнена в Физическом институте им.П.Н.Лебедева РАН.

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, доцент Смирнитский В.А.

Доктор физико-математических наук, профессор Ольшевский А.Г.

Доктор физико-математических наук, профессор Поносов А.К.

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт ядерной физики им.Д.В.Скобельцына МГУ.

Защита состоится 17 апреля 2006 года в _____ часов на заседании специализированного ученого совета Д 002.023.02 Физического института имени П.Н.Лебедева РАН по адресу: 119991 Москва, Ленинский проспект, 53.

С диссертацией в виде научного доклада можно ознакомиться в библиотеке ФИАН.

Диссертация в виде научного доклада разослана _____ марта 2006 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Я.Н.Истомин

Актуальность темы. Трековые детекторы широко используются в экспериментах по физике частиц на протяжении уже многих десятилетий. Столь продолжительная жизнь методики, безусловно, связана с уникальным пространственным разрешением и возможностью разделения треков частиц. Ни один из применяемых сейчас детекторов элементарных частиц не может обеспечить пространственное разрешение, которое, в частности, дает ядерная эмульсия: при размере зерна 0.3 – 1 мкм, отклонение зерен от восстановленной траектории движения частицы в среднем не превышает 0.8 мкм, а при определенных условиях может быть уменьшено до 0.2 мкм. Использование двусторонней эмульсии позволяет определять направление движения частиц с погрешностью менее одного миллирадиана. 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 приборов с зарядовой связью (CCD-камеры) для регистрации и оцифровывания оптических изображений и вычислительным возможностям

современных компьютеров. Благодаря применению этих достижений прецизионной механики, возможностям средств вычислительной техники и разработке необходимого программного математического обеспечения стала реальностью полная автоматизация труда микроскопистов. При измерениях в таком автоматическом режиме оцифрованные изображения следов заряженных частиц и ядер в трековых детекторах, полученные при помощи CCD-камер, вводятся в компьютеры, математическое обеспечение которых позволяет производить поиск, распознавание и изучение треков, восстанавливать их пространственное положение. Такой автоматизированный метод измерений практически полностью исключает использование изнурительного визуального труда микроскопистов и ускоряет процесс обработки приблизительно на три порядка по сравнению с ее длительностью при использовании так называемых полуавтоматов. Новый метод позволяет обрабатывать большие массивы экспериментальных данных и существенно увеличивать статистику событий, что раньше было практически нереально. Создание подобных автоматизированных комплексов 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.

Личный вклад автора и основная цель цикла работ. Основной целью цикла работ, выполненного автором, была реализация нового подхода к анализу экспериментального материала, связанного с исследованиями на базе автоматизированных комплексов для обработки данных трековых детекторов. При непосредственном прямом и решающем участии автора на всех этапах, начиная от приобретения элементов оборудования, создания комплекса, его освоения, разработки программного обеспечения и до руководства многочисленными исследованиями создан и освоен высокотехнологичный Полностью АВтоматизированный Измерительный КОМПлекс (ПАВИКОМ). ПАВИКОМ изначально создавался для обработки событий, зарегистрированных с помощью ядерных фотоэмульсий, облученных пучком ядер свинца с энергией 158А ГэВ на ускорителе SPS (CERN) 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. Однако в настоящее время возможности

ПАВИКОМ - его универсальность, быстрое действие и постоянно обновляемое программное обеспечение, не только позволяют обеспечить потребности исследований, проводимых в ФИАН, но эффективно используются также другими российскими лабораториями и институтами. При этом участие группы ПАВИКОМ отнюдь не сводится к предоставлению установки в аренду. Для каждого эксперимента группой ПАВИКОМ как минимум, дорабатывается старое или разрабатывается специальное программное обеспечение, часто производится доработка аппаратуры или необходимое приспособление установки и изменение метода измерений. Автор непосредственно занимался на всех этапах созданием и освоением комплекса ПАВИКОМ, в частности, автоматизированным сканированием различных типов трековых детекторов (ядерных эмульсий, рентгеновских пленок, твердотельных трековых детекторов); предложенный автором метод обработки видеоизображений, основанный на суммировании цифровой информации в определенном пространственном направлении и тем самым повышении вероятности обнаружения искомого эффекта (например, линии спектров электронов внутренней конверсии), используется как основная идея ряда программ ПАВИКОМ. В настоящее время диссертант – руководитель и ответственный исполнитель всех экспериментальных работ, выполняемых на комплексе ПАВИКОМ.

Научная новизна и практическая ценность. На сегодняшний день благодаря широкому применению в промышленности пластиковых детекторов, задача автоматизированных стандартизованных измерений для них в значительной мере решена. Большой прогресс достигнут также в создании автоматической обработки информации в ядерных эмульсиях, используемых, главным образом в фундаментальных научных исследованиях. Впервые полностью автоматизированные системы обработки для ядерных эмульсий появились в Японии в 90-х гг. Всего в мире в настоящее время действует около 40 таких систем, в том числе 20 – в Европе, где на протяжении последних двух лет число таких автоматизированных комплексов стремительно растет.

Единственный в России комплекс, удовлетворяющий современным мировым стандартам – созданный в ФИАНе высокотехнологичный **Полностью АВтоматизированный Измерительный КОМПлекс (ПАВИКОМ)** для обработки данных эмульсионных и твердотельных трековых детекторов. Главным отличием этого комплекса от всех других подобных систем в мире

и его уникальным достоинством является универсальность – на автоматизированных установках комплекса обрабатываются и ядерные эмульсии, и пластиковые детекторы, и кристаллы оливинов из метеоритов. В настоящее время ведется совместная обработка данных 9 экспериментов, в которых участвуют сотрудники 6 российских институтов, а также коллеги из Украины, Японии, Монголии и Словении; активное сотрудничество осуществляется с НИИЯФ МГУ, в Российской академии наук – с ИЯИ, СПбФТИ, в Минатоме – ИТЭФ и ОИЯИ, кроме того, с ЦЕРНом. Хотя базисные установки, составляющие основу всего комплекса, создавались первоначально для экспериментов по физике частиц высоких энергий, в работах автора с другими лабораториями и институтами комплекс был использован для исследований целого ряда проблем, связанных с изучением структуры гало ядер, анализом ядерных реакций при низких энергиях, исследованием спектров электронов внутренней конверсии изотопов редкоземельных элементов, для изучения космических лучей, множественной генерации частиц при соударениях релятивистских ядер. По существу, охвачен широкий спектр актуальных проблем современной ядерной физики. Свидетельством международного признания высокого потенциала группы ПАВИКОМ, основанного на сочетании технических возможностей комплекса и наличии высококвалифицированной научной группы с опытом эксплуатации и обработки экспериментального материала трековых детекторов, является включение ПАВИКОМ в число европейских автоматизированных центров по обработке эмульсии эксперимента ОПЕРА. Начавшаяся адаптация комплекса ПАВИКОМ к задачам эксперимента ОПЕРА даст 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.

Апробация работы. Результаты работы комплекса ПАВИКОМ неоднократно обсуждались на международных конференциях и рабочих совещаниях мирового эмульсионного сообщества. В частности, материалы диссертации докладывались на 20, 21, 23, 24 и 27 International Cosmic Ray Conferences (1987, 1990, 1993, 1995, 2001); на 5-th International Symposium of Very High Energy Cosmic Ray Interactions (1988); на 28th International Conference on High Energy Physics (1996); на 6th Conference on the Intersections of Particle and Nuclear Physics (1997); на 4th Rencontres du

Vietnam (2000); на 54 Международном совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (2004); на International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena (2004); на LV National Conference on Nuclear Physics “Frontiers in the Physics of Nucleus” (2005); на 5th Conference Nuclear and Particle Physics (2005).

По теме диссертации опубликовано 56 работ в отечественных и зарубежных журналах: Ядерная физика, Nuclear Instruments&Methods in Physics Research, Известия РАН, Physics Letters, Доклады Академии наук, SPIE, Элементарные частицы и атомное ядро, Приборы и техника эксперимента и др. (см. Приложение – Список публикаций по теме диссертации).

Исследования актуальных проблем ядерной физики на основе методики полностью автоматизированной обработки трековых детекторов на многофункциональной установке ПАВИКОМ

Содержание

- I. Введение. Трековые детекторы: области применения в научных исследованиях и автоматизированная обработка данных. 10**
- II. Технические характеристики комплекса ПАВИКОМ. 19**
- III. Исследования актуальных проблем ядерной физики на основе методики полностью автоматизированной обработки экспериментальных данных, получаемых с использованием трековых детекторов на многофункциональной установке ПАВИКОМ. 24**
 - 3.1. Поиск возможных сигналов образования суб-адронных состояний ядерной материи при высоких температурах и плотностях по данным эксперимента EMU-15. 24**
 - 3.2. Изучение ядерного состава и энергетического спектра первичного космического излучения при высоких энергиях прямыми методами по данным эксперимента RUNJOB. 43**
 - 3.3. Исследование кластеризации нуклонов в легких ядрах посредством изучения процессов мультифрагментации в эксперименте «БЕККЕРЕЛЬ». 47**
 - 3.4. Автоматизированная обработка твердотельных трековых детекторов в проекте «Энергия плюс Трансмутация» - исследование электроядерного способа производства энергии и изучение трансмутации радиоактивных отходов. 51**

3.5.	Тестовые измерения для автоматизированной обработки данных эксперимента «ПЛАТАН» с целью исследования первичных космических лучей солнечного и галактического происхождения методом многослойных твердотельных трековых детекторов.	55
3.6.	Экспериментальное исследование спектров электронов внутренней конверсии методом ядерной спектроскопии.	57
3.7.	Исследование структуры легких нейтроноизбыточных ядер.	60
3.8.	Методика измерения на ПАВИКОМ зарядов релятивистских ядер в фотоэмульсии для изучения азимутальной анизотропии вылета многозарядных продуктов реакции в направлении, перпендикулярном плоскости ядерной реакции. Первый этап полной автоматизации измерений в толстослойных эмульсиях при продольном облучении.	64
IV.	Планируемые работы и перспективы развития комплекса.	72
4.1.	Исследование осцилляций нейтрино: модернизация аппаратуры и адаптация программного обеспечения ПАВИКОМ для обработки первичных данных эксперимента OPERA.	72
4.2.	Изучение зарядового распределения ядер в космических лучах и поиск сверхтяжелых ядер в оливинах из метеоритов.	76
4.3.	Обучение студентов физических факультетов автоматизированным методам обработки данных трековых детекторов на базе комплекса ПАВИКОМ.	79
V.	Заключение.	81
VI.	Литература.	85
VII.	Приложение. Список публикаций по теме диссертации.	96

I. Введение. Трековые детекторы: области применения в научных исследованиях и автоматизированная обработка данных.

Уже с первых шагов развития экспериментальных исследований в области ядерной физики и физики элементарных частиц, широкое применение получили различные трековые детекторы, в которых применялись визуальные методики обработки данных. Это пузырьковые и искровые камеры, ядерные эмульсии, кристаллы хлористого серебра и травимые твердотельные трековые детекторы [1-8]. Такая популярность трековых детекторов не случайна и обусловлена целым рядом их достоинств: наглядностью результатов эксперимента; относительной простотой и дешевизной; способностью накапливать информацию в течение длительного времени; высоким пространственным разрешением.

Таблица характеристик различных детекторов.

Тип детектора	Название	Пространственное разрешение, см	Временное разрешение, с	Время восстановления, с
Трековые детекторы (регистрируют факт и момент прохождения частицы, позволяют воспроизвести трек)	Ядерная фотоэмульсия	10^{-4}	-	-
	Камера Вильсона	10^{-1}	10^{-1}	10^{-2}
	Диффузионная камера	10^{-1}	10^{-1}	10^{-2}
	Пузырьковая камера	10^{-2}	10^{-3}	1
Электронные детекторы (вырабатывающие электрический импульс при попадании частицы в детектор)	Сцинтилляционный счетчик	1	10^{-9}	10^{-8}
	Полупроводниковый детектор	1	10^{-9}	10^{-9}
	Пропорциональная камера	10^{-2}	10^{-7}	10^{-6}

Последнее свойство составляет одну из важнейших характеристик трековых детекторов. Наибольшую пространственную точность удается обеспечить с помощью ядерных фотоэмульсий, где она составляет ~ 1 мкм. В пузырьковых камерах при условии полной реализации их возможностей погрешность измерения координат точек не превышала 2 мкм при измеряемых перемещениях 200 мм [9]. Искровые камеры имеют несколько худшее пространственное разрешение, однако они хорошо управляемы, позволяют избежать этапа фотографирования и дают возможность выводить информацию непосредственно в компьютер (см. Таблицу).

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 [10-27]. Одной из первых областей применения трековых детекторов было определение зарядового спектра ядерной компоненты первичного космического излучения [10, 11]. В исследованиях тяжелой компоненты первичных космических лучей также использовались стопки ядерных эмульсий [12]. Преимущества трековых детекторов как интегральных приборов, накапливающих информацию в условиях малых потоков частиц использовалось не только в аэростатных, но и в спутниковых экспериментах с космическими лучами [13]. Долговременное облучение на спутнике стопки полимерных трековых детекторов проводилось для исследования спектров космических ядер, с целью получения информации о процессах нуклеосинтеза и о длине свободного пробега космических ядер в межзвездной среде [14]. В 70-х годах 20 века самыми распространенными трековыми детекторами были пузырьковые и искровые камеры [22]. Например, с их помощью были определены многие свойства странных частиц – масса, время жизни, спин, четность [23]. Большое количество экспериментов с камерами были посвящены изучению резонансных состояний частиц и исследованию слабых взаимодействий [24-27]. Трековая методика широко используется в целом ряде прикладных работ. Приведем только некоторые примеры. Так, данные об энергетическом спектре нейтронов от реактора получают с помощью нейтронных дозиметров, содержащих делящиеся слои и трековые детекторы [15]. 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 твердого тела (из горных пород или конструкционных материалов), попадают в атмосферу, и могут создавать опасный уровень радиации [16]. Контроль времени облучения радоном шахтеров на урановых рудниках проводится с использованием полосок нитрата целлюлозы, закрепляемых на шлемах [17]. Метод регистрации α -частиц от радонового газа использовался в попытках предсказания землетрясений, поскольку, как было замечено, повышение сейсмической опасности в период подготовки землетрясений часто сопровождается возникновением трещин и напряжений, при этом выделяется большее количество радона от содержащихся в земной коре урана и тория [18]. Трековая методика также применяется при изучении процессов обмена в тропосфере, где в качестве индикатора используется радон [19]. Трековые детекторы используются в пучках отрицательных пионов в радиотерапии для изучения событий с высокими линейными потерями энергии [20, 21].

В ядерно-физических экспериментах в качестве трековых детекторов широко используются ядерные эмульсии – гелевые растворы, основным элементом которых являются кристаллы AgBr . Поглощение кристаллами AgBr энергии заряженных частиц, проходящих через эмульсию, приводит к возникновению чувствительных центров в некоторых лежащих на пути частиц зернах бромида серебра (образуется скрытое изображение). После проявления эти зерна превращаются в кристаллики металлического серебра, которые непрозрачны и образуют вдоль трека частицы цепочку квазисферических черных зерен [28]. В зависимости от типа ионизирующей частицы, ее энергии, химического состава геля и процедуры проявки зерна могут образовывать сплошную черную линию, или могут быть отделены друг от друга. Характерный размер зерна – 0,3 – 1 микрон. Во время проявки появляются также фоновые некоррелирующие друг с другом зерна. Этот фон (вуаль), несколько затрудняет последующее распознавание треков частиц. Вместе с тем он помогает определять границу эмульсия-воздух, или эмульсия-стекло, или эмульсия-пластик.

Ядерная эмульсия используется в экспериментах по физике частиц на протяжении уже многих десятилетий. Столь продолжительная жизнь методики, безусловно, связана с уже упоминавшимся выше уникальным пространственным разрешением и возможностью разделения треков частиц. Ни один из известных детекторов элементарных частиц не может обеспечить пространственное разрешение, которое дает эмульсия: при уже названном

размере зерна 0,3 – 1 микрон, отклонение зерен от восстановленной траектории движения частицы в среднем не превышает 0,8 микрона, и при определенных условиях может составлять 0,2 микрона. Использование двусторонней эмульсии позволяет достигать точности в определении углов лучше, чем миллирадиан. К недостаткам ядерной эмульсии следует отнести отсутствие временной привязки – регистрируются все частицы, прошедшие через нее. Это приводит к регистрации значительного числа фоновых частиц и уменьшает время допустимой экспозиции, например, на ускорителе.

Простота твердотельных трековых детекторов (ТТД) обеспечивает им существенное преимущество перед многими другими системами детектирования. Вместе с тем важнейшее значение имеют также средства, которые должны быть использованы для извлечения информации из ТТД. Просмотр больших площадей детекторов, как правило, с большим увеличением представляет собой достаточно сложную техническую проблему. Обработка данных с ТТД первоначально проводилась на оптических микроскопах вручную. При этом оператор должен был визуально находить и фиксировать треки частиц. Это требовало огромных затрат труда и времени оператора. Так например, оценка объема измерений в ядерной эмульсии одного центрального ядро-ядерного взаимодействия при ультрарелятивистской энергии, когда число рождаемых вторичных заряженных частиц достигает ~1500, показывает, что необходимо определить более 10^4 координат частиц. Очевидно, что при таких объемах измерений достаточно велика вероятность появления трудно улавливаемых ошибок.

Поэтому одновременно с развитием методики трековых детекторов, развивались также методы автоматизации измерений. В частности, для ускорения процесса обмера данных пузырьковых камер были разработаны и успешно применялись проекционные микроскопы с ручным или автоматическим слежением за проекцией выбранного трека [29]. Следующим шагом в автоматизации измерений на пузырьковых камерах стали спиральный измеритель [30, 31], сканирующий и измерительный проектор, приборы с прямоугольным растром считывания как на основе катодно-лучевой трубки, так и с механической разверткой [9, 32, 33].

Для подсчета треков в пластиковых детекторах, использовался искровой счет [34]. В [35] было предложено устройство детектирования количества треков в пластике на основе явления пробоя. В [36] описана простая техника для быстрого подсчета протравленных треков с использованием сцинтиллятора. Использовалось также электрохимическое травление [37] для

увеличения протравленных треков в размерах до нескольких сот микрон, что позволяло обходиться лишь небольшим увеличением при просмотре. Однако, наибольшие успехи были достигнуты на пути создания систем полуавтоматического и автоматического анализа изображений.

В полуавтоматических системах перемещение столов проводится автоматически, тогда как задание особенностей и указание меток для измерения изображений производится оператором. Таким образом, главную проблему – нахождение и распознавание следов частиц по-прежнему решает оператор [38, 39]. Примерами таких систем являются Videoplan, SAMICA (Германия), VIDS (Англия), VPA 1000 (Япония).

Ни одна из производимых промышленностью систем для автоматического анализа изображений не была сконструирована специально для обработки данных, получаемых с помощью детекторов с протравленными треками. Это заставляло исследователей либо создавать свои системы обработки, либо самостоятельно дорабатывать или приспособлять коммерческие системы для своих целей [40-42]. При этом необходимо решить две основные задачи. Первая – выделение объектов с уровнем потемнения, большего заданного, и вторая – распознавание особенностей формы объектов. С появлением мощных компьютеров стало возможным создание первых автоматических анализаторов изображений, таких как Quantimet 900, Magiscan 2, Optomax III (Англия), Leitz TAS Reichert-Jung IBAS (Германия). Система Vidimet, изготовленная в Венгрии, использует принципы теории геометрической топологии для распознавания треков любой формы, подсчета их числа и измерения требуемых необходимых параметров, таких, как площадь, минимальная и максимальная оси [43]. Возникновение приборов с зарядовой связью, в которых ССD-камеры используются для регистрации и оцифровки оптических изображений, привело к созданию микропроцессорно-ориентированных систем для автоматической обработки треков частиц в детекторах [44]. Распознавание треков частиц и восстановление их пространственного положения в этих системах выполняется компьютерами по специально разработанным программам. Все это позволяет провести полную автоматизацию вместо изнурительного визуального труда микроскопистов. При измерениях в таком автоматическом режиме оцифрованные изображения следов заряженных частиц и ядер в эмульсии, полученные при помощи ССD-камер, вводятся в компьютеры, математическое обеспечение которых позволяет производить поиск, распознавание и изучение треков. Такой автоматизированный метод

измерений в трековых детекторах ускоряет процесс обработки данных приблизительно на три порядка по сравнению с полуавтоматическими методами. Кроме ускорения измерений, новый метод позволяет обрабатывать большие массивы экспериментальных данных и существенно увеличивать статистику событий для широкого спектра экспериментов, что ранее было практически нереально.

Благодаря широкому применению в промышленности пластиковых детекторов, задача автоматизированных стандартизованных измерений для них на сегодняшний день в значительной мере решена [45, 46, 47]. Большой прогресс достигнут также в создании автоматической обработки информации в ядерных эмульсиях, используемых, главным образом в фундаментальных научных исследованиях [48-53]. Следует заметить, что автоматическое распознавание треков в эмульсии существенно отличается от аналогичной процедуры для других визуальных детекторов: для эмульсий автоматизированное восстановление проникающих треков частиц создается на базе нескольких томографических изображений на разных глубинах [54]. Впервые полностью автоматизированные системы обработки для ядерных эмульсий появились в Японии в 90-х гг. Всего в мире в настоящее время действует около 40 таких систем, в том числе 20 – в Европе, где на протяжении последних 2 лет число таких автоматизированных комплексов стремительно растет.

При использовании оптического микроскопа для любой научной задачи необходимо осуществить несколько основных операций: локализацию поля зрения, определение его координат, проверку изображения и измерение определенных параметров. Эти действия могут быть выполнены компьютером, подключенным к периферическим устройствам, смонтированным на микроскопе (моторами для перемещения стола, ТВ камерой и т.п.).

Основное программное обеспечение для оцифровки изображений (часто называемой «подхватом изображения») и необходимые компьютерные комплектующие являются, как правило, коммерчески доступными продуктами. В системах обработки данных, принятых в Италии (INFN, [49]), используются комплектующие платы производства фирмы Matrox Electronic Systems Ltd –“MATROX Pulsar”, устанавливаемые в компьютеры, управляющие автоматизированным сканированием, и программное обеспечение фирмы Media Cybernetics Co- “HALOPRO Co” (рис.1, три

автоматизированных сканирующих микроскопа для обработки ядерных эмульсий).



Рис. 1. Три автоматизированных микроскопа для сканирования ядерных эмульсий в лаборатории Гран-Сассо Национального Института Ядерных Исследований Италии.

В Японии для обработки видеоизображений используется изготовленный промышленностью по совместным разработкам с университетом Нагойя процессор TRACK SELECTOR (TS, рис.2) [55, 56]. Результатом работы этого процессора являются посылаемые на центральный компьютер координаты всех кластеров, образующих трек. Одна из ранних моделей TS [48] была изготовлена для обработки поля зрения $160 \times 160 \text{ мкм}^2$ (при объективе 50^\times), при этом размер одного пикселя был 0.3×0.3 микрона. Оцифрованное изображение одного зерна занимало 3×3 пикселей. Полная оцифровка и распознавание всех зерен проводились со скоростью 30 полей зрения в секунду, а обработка по глубине всей эмульсии одного поля зрения занимала 33 мс (шаг по глубине в эмульсии менялся при этом от 5 до 30 мкм в зависимости от толщины эмульсии). Как видно, процесс обработки видеоизображения при таком подходе идет существенно быстрее, чем управление механическим передвижением стола и пересылка данных на

центральный компьютер, поскольку большая часть обработки выполняется микрочипами. Эффективность выделения треков с помощью этой системы была проверена авторами при калибровочном облучении пучком падающих перпендикулярно частиц с интенсивностью 3×10^5 треков на см^2 . Величина эффективности оказалась выше, чем 97%.

Обладая чрезвычайно высоким быстродействием и высокой эффективностью распознавания треков, система, использующая TRACK SELECTOR, имеет вместе с тем 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 приспособляемости к разным условиям задач.

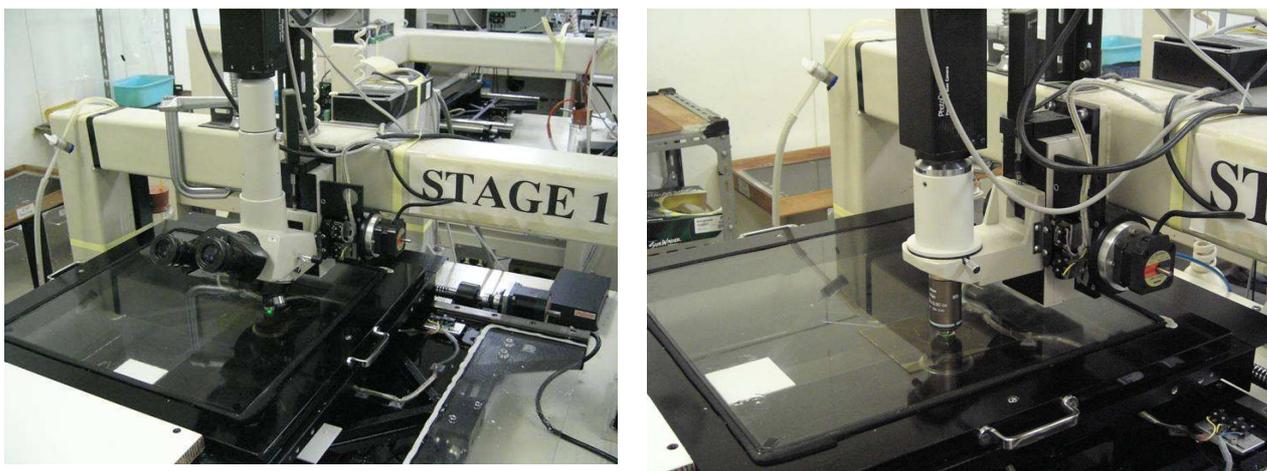


Рис. 2. Два сканирующих автоматизированных микроскопа в университете Нагойя, Япония.

В России единственный комплекс подобного уровня, удовлетворяющий современным мировым стандартам, состоящий из двух автоматизированных микроскопов, был создан в Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН. Это высокотехнологичный **Полностью АВтоматизированный Измерительный КОМПлекс** (ПАВИКОМ) для обработки данных эмульсионных и твердотельных трековых детекторов, используемых в различных физических исследованиях. На установках комплекса ПАВИКОМ

используются два типа промышленных плат оцифровки изображения: система VS-СТТ и плата фирмы КАНДЕЛА, которыми производится только оцифровка 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, и пластиковые детекторы, и кристаллы оливинов из метеоритов.

В последующих разделах доклада описаны технические характеристики комплекса, а также особенности и результаты целого ряда экспериментов, в которых автор принимал непосредственное участие и руководил обработкой соответствующих данных на ПАВИКОМ. Автор непосредственно занимался на всех этапах созданием и освоением комплекса ПАВИКОМ, начиная от приобретения оборудования и до разработки программного обеспечения; в частности, автоматизированным сканированием различных типов трековых детекторов (ядерных эмульсий, рентгеновских пленок, твердотельных трековых детекторов); предложенный автором метод обработки видеоизображений, основанный на суммировании цифровой информации в определенном пространственном направлении и тем самым увеличении вероятности обнаружения искомого эффекта (например, линии спектров электронов внутренней конверсии), используется как основная идея ряда программ ПАВИКОМ; автор неоднократно представлял доклады на международных и российских конференциях. В настоящее время автор – руководитель и ответственный исполнитель всех экспериментальных работ, выполняемых на комплексе ПАВИКОМ.

II. Технические характеристики комплекса ПАВИКОМ.

ПАВИКОМ (Полностью Автоматизированный Измерительный Комплекс) – это уникальный высокоэффективный измерительный комплекс для обработки экспериментального материала, полученного в исследованиях с использованием эмульсионных и твердотельных детекторов.

Установка создана в 2000 году группой сотрудников Физического института им.П.Н.Лебедева [57-61]. ПАВИКОМ создавался и используется для высокотехнологичной обработки данных экспериментов в ядерной физике, физике космических лучей и физике высоких энергий. На комплексе в режиме полной автоматизации осуществляется поиск и оцифровывание координат треков заряженных частиц в материале детектора; распознавание и прослеживание треков с помощью ЭВМ; систематизация и первичная обработка данных. При сканировании детекторов на установках 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:

- получение изображения поля зрения микроскопа с помощью ТВ системы;
- наложение графического указателя на ТВ экран;
- считывание с экрана координат любого пикселя поля зрения;
- наложение графических символов на экран.

3. Оцифровка изображения и распознавание образов:

- аналого-цифровая конвертация изображения на ССД-камере;
- фильтрация, т.е. масштабирование, выбор порога и др.;
- сохранение оцифрованного изображения;
- распознавание образов, т.е. определение пространственных характеристик и анализ формы.

ПАВИКОМ состоит из двух независимых полностью автоматизированных установок ПАВИКОМ-1 и ПАВИКОМ-2, различающихся, прежде всего, величиной перемещений оптических столов, и, соответственно, допустимыми размерами пленок для обработки.

Основные узлы установки ПАВИКОМ -1 (рис.3):

- автоматический прецизионный стол немецкой фирмы MICOS;
- оптическая система, комплектация которой осуществляется в соответствии с решаемой физической задачей;
- персональный компьютер Pentium.



Рис. 3. Установка ПАВИКОМ -1: автоматический прецизионный стол фирмы MICOS с оптической системой, комплектуемой в соответствии с решаемой физической задачей; персональный компьютер осуществляет управление перемещениями стола и подхват видеоизображения, формируемого CCD-матрицей системы VS-СТТ фирмы «Видеоскан».

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 от 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 фирмы «Видеоскан», обеспечивающую ввод оцифрованных высококачественных изображений в персональный компьютер. Эта система имеет следующие характеристики: 1024 уровня «градаций серого»; матрица CCD-камеры имеет размеры 1360×1024 пикселей; размер каждого пикселя 4,65 мкм².

В обязанности оператора входит размещение на столе фотопластинки, фотопленки или пластика и их вакуумный прижим. Установка размещена в «чистой» комнате со стеклянными стенами.

Автоматизированный микроскоп ПАВИКОМ-2 (рис.4) создан на базе микроскопа МПЭ-11, производства ЛОМО. Основные узлы установки ПАВИКОМ-2:

- прецизионный стол немецкой фирмы Carl Zeiss с блоком управления;
- цифровая CCD-камера;
- персональный компьютер.

Пределы автоматического перемещения столика по оси X составляют 0 - 120 мм, по оси Y: 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 X и Y составляет 0,25 мкм, по оси Z – $3,46 \times 10^{-3}$ мкм.

Матрица CCD-камеры имеет размеры 768 × 576 пикселей и глубину цвета 8 бит (256 градаций серого). Изображение в камере создаётся объективом микроскопа, с увеличением до 60^x. Аналоговый видеосигнал, формируемый видеокамерой, подаётся на вход аналого-цифрового преобразователя – карты захвата и оцифровки изображения, которая передаёт оцифрованный видеосигнал в память компьютера.



Рис. 4. Установка ПАВИКОМ-2: на микроскопе ЛОМО МПЭ-11 смонтирован просмотрный автоматический стол фирмы Carl Zeiss с управлением через контроллер MCU-26 и CCD-камера с матрицей 768×576 пикселей.

Математическая обработка оцифрованных изображений осуществляется с помощью компьютера с использованием библиотеки программ, написанных на языке C⁺⁺. При такой обработке выполняется поиск и распознавание образов измеряемых объектов, пространственное восстановление следов частиц в детекторах, определение их координат, определение координат точек взаимодействия и другие операции. При этом специальный пакет программ используется для управления движением столов в процессе измерений.

ПАВИКОМ изначально создавался для обработки ядерных фотоэмульсий, облученных пучком ядер свинца с энергией 158А ГэВ на ускорителе SPS (CERN) 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. Однако в настоящее время возможности ПАВИКОМ - его универсальность, быстроедействие и постоянно обновляемое программное обеспечение, не только позволяют обеспечить потребности исследований, проводимых в ФИАН, но эффективно используются также другими российскими лабораториями и институтами. При этом участие группы ПАВИКОМ отнюдь не сводится к предоставлению установки в аренду. Для каждого эксперимента группой ПАВИКОМ как минимум, дорабатывается старое или разрабатывается специальное программное обеспечение, часто производится доработка аппаратуры или необходимое приспособление установки и изменение метода измерений.

III. Исследования актуальных проблем ядерной физики на основе методики полностью автоматизированной обработки экспериментальных данных, получаемых с использованием трековых детекторов на многофункциональной установке ПАВИКОМ.

3.1. Поиск возможных сигналов образования суб-адронных состояний ядерной материи при высоких температурах и плотностях по данным эксперимента EMU-15.

Основным направлением исследований в эксперименте EMU-15 (ФИАН) было изучение коллективных эффектов и особенностей разлета вторичных частиц в столкновениях ядер атомов свинца, ускоренных до энергий 32 ТэВ/ядро, с атомами свинца мишени. Эксперимент осуществлен в 1996 году на пучке SPS (CERN). Коллаборация EMU-15 состояла только из российских участников и, в этом отношении, была уникальной для CERN. Участие диссертанта в этом эксперименте определялось позицией Contactperson эксперимента [62-64].

Эмульсионная камера эксперимента EMU-15, в которой регистрируются Pb-Pb взаимодействия, имеет форму цилиндра и состоит из тонкой (толщиной 400 мкм) свинцовой мишени и 38 слоев ядерной фотоэмульсии, каждый толщиной 50 мкм, полных на основу толщиной 25 мкм. Один слой ядерной эмульсии располагается непосредственно перед свинцовой мишенью, остальные – за мишенью. Габаритные размеры камеры: длина – 260 мм, диаметр – 95 мм, всего экспонировалось 16 камер. При облучении ускоренными ядрами атомов свинца камеры помещались в поперечное магнитное поле напряженностью 2 Тесла и располагались так, чтобы плоскости свинцовой мишени и ядерных фотоэмульсий были перпендикулярны пучку ядер. Число ядер при облучении каждой камеры составляло около 10^4 частиц. В каждой камере было найдено приблизительно 10 центральных Pb-Pb взаимодействий с множественностью более 10^3 вторичных частиц. Критерием отбора центрального события служит большая множественность вторичных заряженных частиц и отсутствие фрагментов с $Z \geq 2$. Основная методическая проблема эксперимента заключалась в большом объеме измерительных работ в ядерных фотоэмульсиях. Обработка в 38 слоях эмульсии около 100 центральных событий с многими сотнями вторичных заряженных частиц в каждом требует проведения порядка десяти миллионов координатных измерений. Очевидно, что выполнить такой объем

измерительных работ в разумные сроки возможно только с использованием полностью автоматизированной аппаратуры типа комплекса ПАВИКОМ. Именно эта задача явилась стимулом к созданию полностью автоматизированного комплекса.

Ядерная эмульсия регистрирует треки заряженных частиц с точностью лучше, чем 1 микрон, сохраняя при этом их трехмерную структуру. При анализе треков с помощью микроскопа, видно объемное изображение в пределах 5-10 микрон глубины фокуса объектива микроскопа, что много меньше обычной толщины эмульсии (50-600 микрон). Представление о трехмерной структуре трека получается в процессе перемещения фокальной плоскости объектива микроскопа по глубине эмульсии. Таким образом, процесс распознавания трека в эмульсии сильно отличается от распознавания треков в таких визуальных детекторах, как пузырьковая камера, стримерная камера и др., где регистрация информации происходит на всей глубине фокуса. В процессе разработки автоматизированных систем для обработки данных ядерных эмульсий решаются многие специфические проблемы двух и трехмерного распознавания образов. В рамках классического подхода к распознаванию образов, использованного при создании пакета программ для автоматизированной обработки данных EMU-15 [65], сначала необходимо найти границу изображения (зерна или группы зерен). Далее эти границы должны быть сглажены, имея при этом минимальную толщину (в идеале 1 пиксель). Наконец, найденную форму необходимо сравнить с модельным образом или с образом, имеющимся в каталоге для того, чтобы идентифицировать (распознать) его. Типичная картина одного поля зрения оптического микроскопа, полученная с помощью ССД камеры, показана на рис. 5. Картина образована группами пиксельных кластеров разной степени потемнения. К сожалению, максимальный, средний и минимальный уровни серого (уровни потемнения) могут меняться от одного поля зрения к другому. Степень потемнения зависит от интенсивности и однородности освещения, от глубины фокуса (особенно для толстослойных эмульсий). Потенциальные кандидаты в кластеры (зерна), образующие трек частицы, должны иметь сферическую форму. Однако зерна, образующие трек ионизирующей частицы, не отличаются внешне от дисперсных зерен различной природы, составляющих вуаль. Минимально ионизирующая частица производит примерно 30 блобов (зерен) на пути 100 микрон в эмульсии хорошей чувствительности.

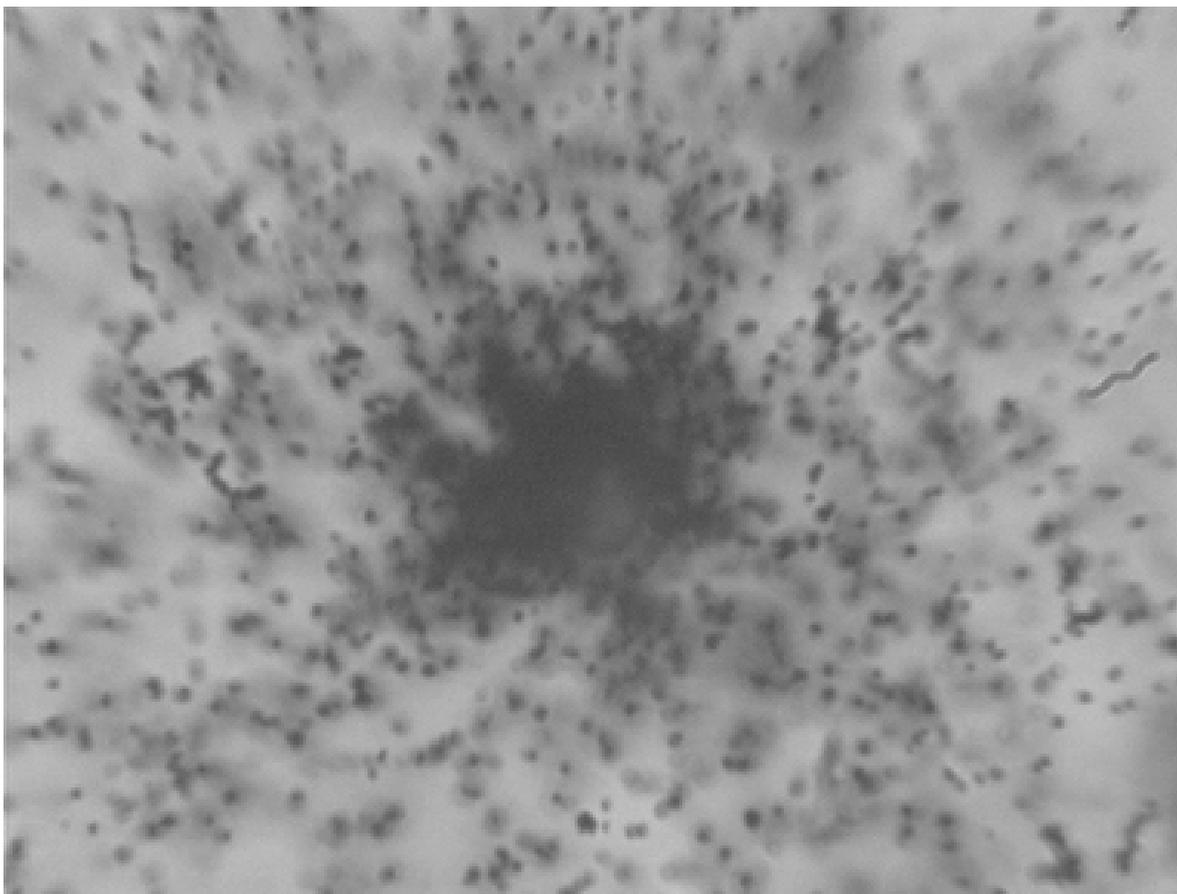


Рис. 5. Типичная картина изображения одного поля зрения 80×60 микрон в оптическом микроскопе при увеличении $60\times$, глубина фокуса около 1 микрона. Показано центральное поле зрения ядро-ядерного взаимодействия с энергией 158 ГэВ/нуклон в ядерной эмульсии толщиной 50 мкм. В центре следы ещё не успели разойтись и идут очень плотно, что делает центральную область более тёмной. Справа видно вытянутое Z-образное пятно, которое является изображением пылинки, попавшей на видеокамеру.

Установка для автоматического сканирования должна распознать трек с учетом ряда условий, а именно:

- возможны промежутки между блобами;
- блоб может не точно попасть в фокус, и тогда его размер будет несколько меньшим;
- точный размер блоба зависит от увеличения микроскопа, разрешения CCD-камеры и локального градиента почернения;
- обычно от 100 до 1000 небольших случайных кластеров могут попасть в поле зрения, и иногда только трехмерный анализ позволяет распознать кластеры, относящиеся к треку частицы.

Задача обработки изображений разбивается на несколько этапов:

1. Предварительный поиск посторонних пятен – «черных» пикселей.
2. Фильтрация изображений.
3. Бинаризация изображений.
4. Выделение связных областей (кластеризация).
5. Сшивка разных полей зрения одной глубины.
6. Отбор кластеров по их размерам.

Результатом обработки изображения является множество кластеров.

Задача восстановления геометрии разлета частиц после ядро-ядерного взаимодействия также разбивается на несколько подзадач:

1. Восстановление трека по цепочке кластеров (трекинг).
2. Продление трека в последующий слой эмульсии.
3. Поиск направления движения первоначального ядра (поиск оси события) и вершины взаимодействия.

В результате восстановления геометрии разлета продуктов ядро-ядерного взаимодействия получают псевдобыстротное распределение вторичных частиц.

В эксперименте EMU-15 использовалась ядерная фотоэмульсия P2T-50 [66]. При прохождении заряженной частицы в эмульсии образуется трек, который после проявки виден как цепочка зёрен и их скоплений (блобов), плотностью 35 ± 5 блобов на 100 мкм трека. Размер одного блоба примерно 0,7 мкм. Количество фоновых блобов (вуаль): $5,6 \pm 1,3$ на 100 мкм. Коэффициент усадки эмульсии равен $2,5 \pm 0,3$. При видеосъёмке в ядерных фотоэмульсиях эксперимента EMU-15 был выбран размер кадра 384×288 пикселей, что при увеличении 60^x соответствует полю зрения 80×60 мкм². Размер одного пикселя равен $(214 \pm 2) \times 10^{-3}$ мкм. Каждый пиксель несет информацию о степени почернения, 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 бинаризованным изображениям присваивается цвет «0» или «1».

На заданных глубинах фотоэмульсии осуществляется последовательная съёмка CCD-камерой 25 полей зрения по спирали вокруг предполагаемого центра события. Съёмка каждого поля зрения производится с шагом перекрытия соседних полей зрения примерно 10 мкм для их последующей сшивки [67].

Поскольку обработка ядерной эмульсии ведется при увеличении 60^x , практически невозможно полностью исключить попадание в поле зрения

случайной пылинки (например, микронного размера ворсинки на видеокамере, как это видно на рис. 5), что приводит к появлению на изображениях тёмных пятен (множеств «чёрных» пикселей), неотличимых от изображений реальных блобов. Эти пятна могут мешать правильному восстановлению треков или приводить к появлению ложных треков. Предварительный поиск таких пятен 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 большим цвета остальных пикселей. После этого пиксели, принадлежащие дефектным областям, можно выделить, задавая порог на цвет, который одинаков 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. Здесь и далее под фоном подразумевается фон изображения, т.е. пиксели, не принадлежащие изображениям блобов и, следовательно, не несущие какой-либо полезной информации.

Фильтрация – это предварительная обработка изображения с целью выделить пятна определённых размеров, обладающие заданной степенью почернения. Для этого изображение преобразуется специальным высокочастотным фильтром размером 5×5 пикселей. Фильтр подобран так, чтобы его отклик на пятна, похожие на изображения блобов, образующих трек частицы, был бы максимальным. Это свойство фильтра приводит к тому, что края блобов становятся более резкими, а сами блобы более отчетливыми, причем размеры их не изменяются.

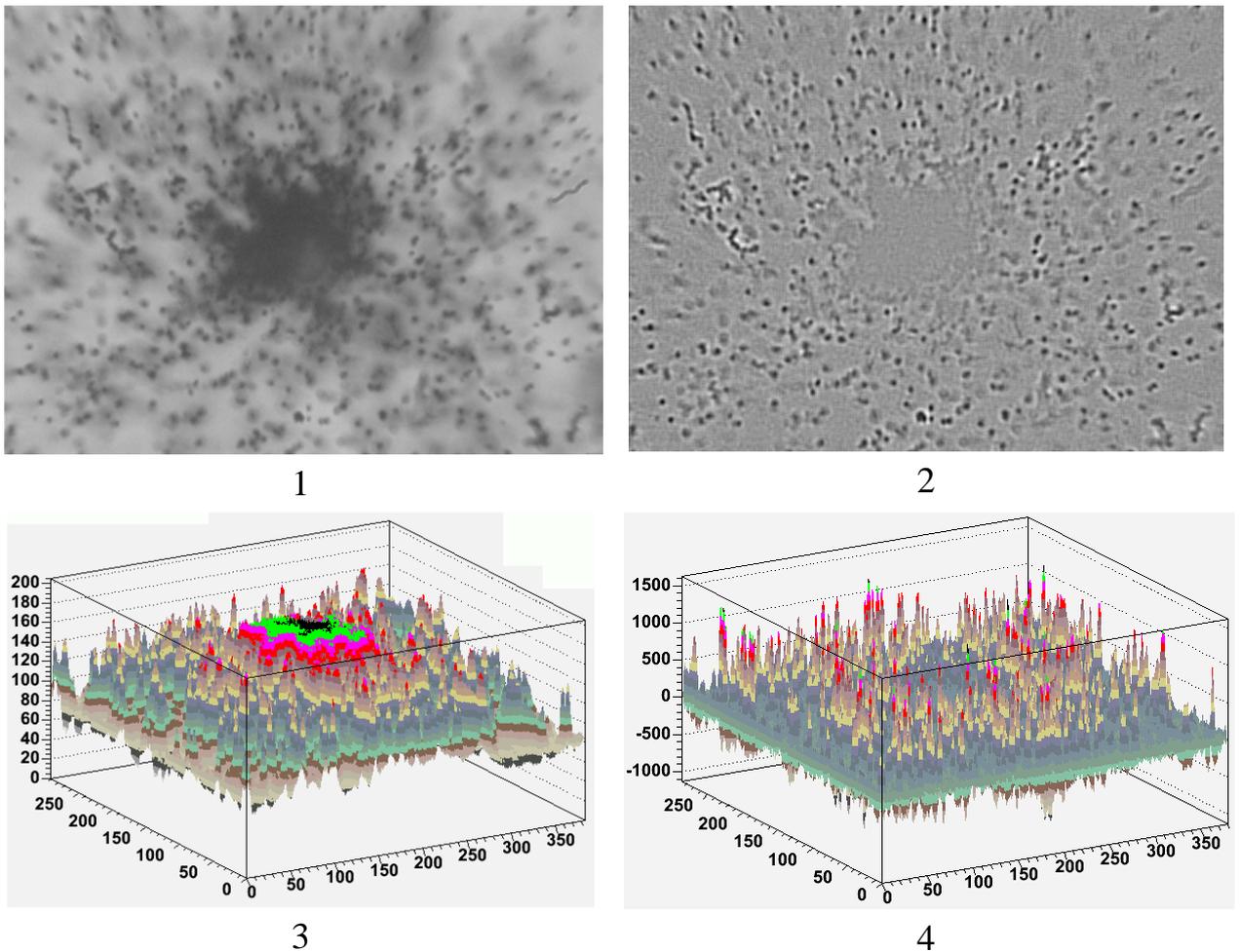


Рис. 6. 1: исходное изображение. 3: координатно-цветовая гистограмма исходного изображения. 2: изображение, обработанное высокочастотным фильтром. 4: его координатно-цветовая гистограмма. Видно, что фильтр усиливает только пятна определённых размеров и формы.

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

$$g_{i,j} = TrF^T C_{i,j}, \quad \{1\}$$

$$F = \begin{pmatrix} -3 & -3 & -3 & -3 & -3 \\ -3 & 5 & 5 & 5 & -3 \\ -3 & 5 & 8 & 5 & -3 \\ -3 & 5 & 5 & 5 & -3 \\ -3 & -3 & -3 & -3 & -3 \end{pmatrix}, \quad \{2\}$$

где $g_{i,j}$ – новый цвет пикселя с координатами (i,j) , F – одна из возможных матриц фильтров и $C_{i,j}$ – матрица, составленная из цвета пикселя (i,j) и цветов окружающих его пикселей, так чтобы цвет пикселя (i,j) был центральным

элементом матрицы $C_{i,j}$. Данное преобразование может выводить цвета пикселей из пространства 256 градаций.

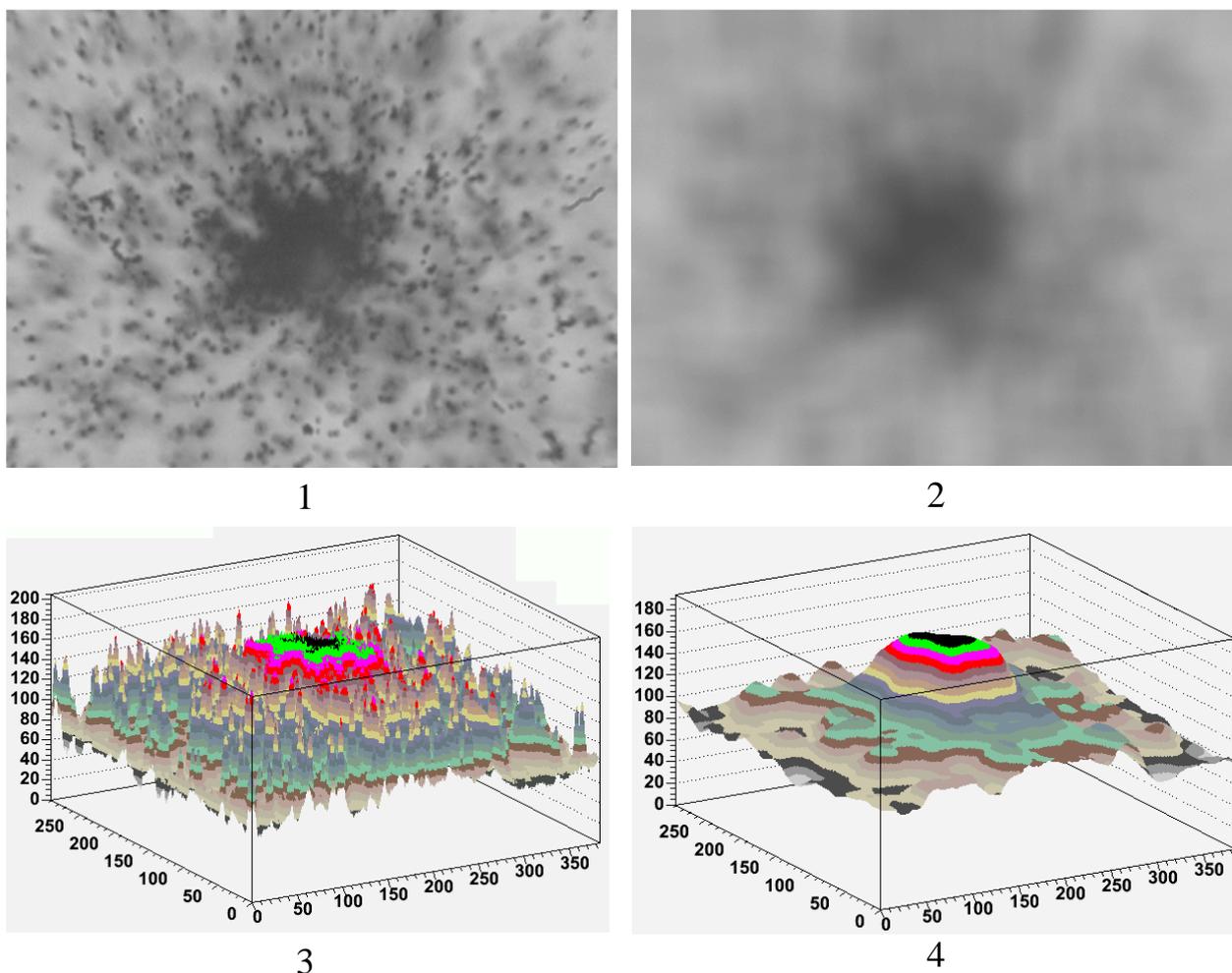


Рис. 7. 1: исходное изображение. 3: координатно-цветовая гистограмма исходного изображения. 2: изображение, обработанное усредняющим фильтром. 4: его координатно-цветовая гистограмма. Видно, что фильтр размывает изображения всех блоков, оставляя только распределение потемнения, близкое к фоновому.

После фильтрации координатно-цветовая гистограмма изображения представляет собой множество узких высоких пиков в тех местах, где на изображении были характерные пятна. Сравнение изображений 3 и 4 на Рис. 6 показывает степень усиления блоков при этой операции.

Бинаризация – это процесс выделения пикселей, принадлежащих изображениям блоков. Сначала изображение обрабатывается усредняющим фильтром. Этот фильтр размывает изображения блоков и распределение почернения изображения становится похожим на фоновое, т.е. на

распределение, которое получалось бы при отсутствии блобов вообще (Рис. 7).

Для повышения чувствительности в центральной области, где плотность следов вторичных частиц велика, вводится пороговая функция:

$$f_{i,j} = (2\bar{b} - b_{i,j}) \frac{\theta_{\max}}{b}, \quad \{3\}$$

где $b_{i,j}$ – цвет пикселя (i,j) изображения, полученного из исходного путём применения усредняющего фильтра, а \bar{b} – положение максимума на цветовой гистограмме этого же изображения. Значение каждого элемента пороговой функции вычисляется по формуле {3}, а значение θ_{\max} задаётся на первом шаге, исходя из соображений оптимального выделения кластеров. После этого выделяются (присваивается цвет, равный «1») пиксели, цвет которых больше чем значение пороговой функции для этого пикселя, остальным присваивается цвет «0». В итоге получается бинаризованное изображение, т.е. изображение, пиксели которого могут иметь цвет либо «0», либо «1».

Соседние пиксели с цветом «1», выделенные в процессе бинаризации, объединяются в кластеры, которые отвечают пятнам почернения в ядерной эмульсии. Кластер – это связное множество пикселей с цветом «1». Слово «связное» понимается в том смысле, что любые два пикселя, принадлежащие множеству, можно соединить плавной кривой, проходящей только через пиксели того же множества. Это означает, что пиксели, через которые она проходит, должны примыкать друг к другу только сторонами, но не углами. Используется рекурсивная процедура выделения связных множеств. Зная координаты (x_i, y_i) каждого пикселя в кластере, можно найти центр масс, средний радиус и площадь кластера. Центр масс кластера находится по формулам:

$$\bar{x} = \frac{\sum c_i x_i}{\sum c_i}, \quad \sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{\sum \sigma_{x_i}^2 c_i^2}{(\sum c_i)^2} \quad \{4\}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum c_i y_i}{\sum c_i}, \quad \sigma_{\bar{y}}^2 = \frac{\sum \sigma_{y_i}^2 c_i^2}{(\sum c_i)^2},$$

где c_i – цвет пикселя до бинаризации.

Таким образом, физическим объектам (блобам) сопоставляются математические объекты – кластеры.

При сканировании эмульсии, каждому полю зрения ставятся в соответствие координаты (x, y, z) , считываемые с контроллера микроскопа. Начало координат каждого поля зрения находится в его геометрическом центре, а оси X и Y параллельны его сторонам. Координаты кластеров отсчитываются от начала координат того поля зрения, в котором они находятся.

На этапе сшивки производится привязка систем координат полей зрения к системе координат центрального поля зрения. Поскольку поля зрения перекрываются, на соседних изображениях имеются общие области, содержащие тождественные кластеры. Процедура сшивки предусматривает такой сдвиг соседних полей зрения, чтобы тождественные кластеры совпали с минимальной ошибкой. Сшитые 25 полей зрения одной глубины показаны на Рис. 8.

Кластеры, сопоставленные блокам, должны иметь примерно одинаковые размеры и форму. Поэтому, следует произвести отбор кластеров по количеству пикселей в кластере для того, чтобы отбросить заведомо большие или малые кластеры. На этом этапе выбираются кластеры, с числом пикселей внутри выбранного диапазона.

Для проверки эффективности работы программы кластеризации (т.е. представления блоков в форме кластеров) была проведена методическая работа – выполнена видеосъемка в эмульсии с шагом по глубине 0,25 мкм и построено распределение длин найденных цепочек кластеров. Кластеризация проверялась также и вручную. При такой проверке было сосчитано количество блоков, видимое в поле зрения микроскопа. Результат сравнивался с числом кластеров, найденных в результате автоматического поиска. Эффективность кластеризации при таком методе проверки оказалась 94% для центрального поля зрения и 98% для нецентрального.

В результате выполнения процедуры кластеризации возникает множество точек – центров масс кластеров на плоскости. Приписав каждой такой плоскости свою координату Z (глубину поля зрения), получаем множество кластеров, распределённых в исследуемом объёме. После этого возникает задача найти среди этого множества треки частиц. Трек частицы параметризуется прямой линией, заданной точкой (x, y, z) , через которую она проходит, и двумя тангенсами углов наклона (t_x, t_y) к оси Z , которая считается перпендикулярной к плоскости эмульсии и сонаправленной с пучком частиц. Начало оси Z выбирается на передней (относительно пучка) плоскости мишени.

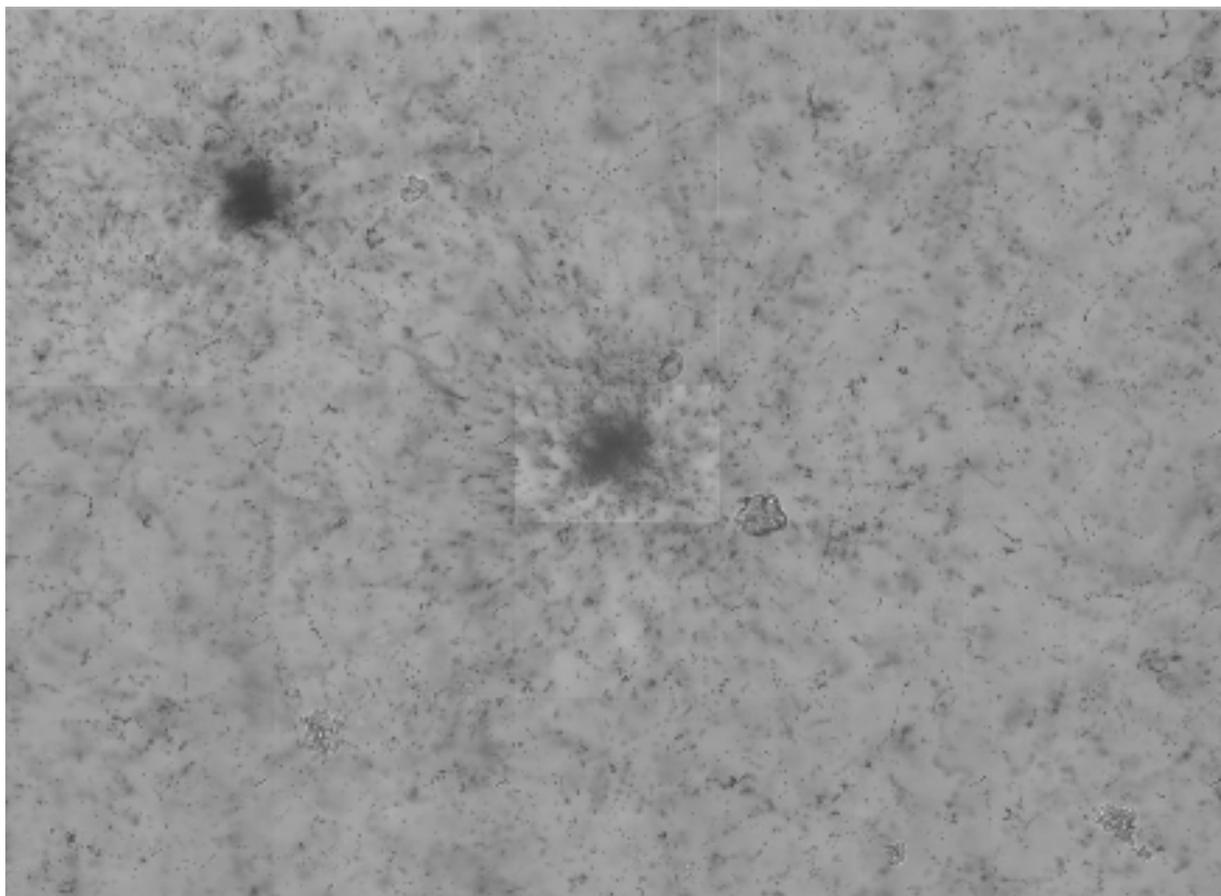


Рис. 8. Сшитые 25 полей зрения одной глубины. Размер изображения 1754×1286 пикселей, что соответствует 377×274 мкм².

Одна из вспомогательных задач, которую необходимо решить, это восстановление трека по заданному набору кластеров (проведение прямой линии через известный набор координат центров масс кластеров – фитинг). Эта задача решается методом наименьших квадратов [68].

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;

$f_x^i(\vec{p}) = x + z_i tx$, $f_y^i(\vec{p}) = y + z_i ty$ – 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 $Z = z_i$.

$$w_x = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{x_0}^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{x_1}^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_{x_{n-1}}^2} \end{pmatrix}, \quad w_y = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{y_0}^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{y_1}^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_{y_{n-1}}^2} \end{pmatrix}; \quad \{5\}$$

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

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

Линеаризованная функция модели трека:

$$\bar{f}(\bar{p}) = \bar{f}(\bar{p}_0) + A \cdot (\bar{p} - \bar{p}_0) + O((\bar{p} - \bar{p}_0)^2), \quad \text{где } A = \left. \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{p}} \right|_{\bar{p}=\bar{p}_0}. \quad \{6\}$$

Метод наименьших квадратов минимизирует функцию

$$M = \left(\bar{f}(\bar{p}_0) + A \cdot (\bar{p} - \bar{p}_0) - \bar{m} \right)^T W \left(\bar{f}(\bar{p}_0) + A \cdot (\bar{p} - \bar{p}_0) - \bar{m} \right). \quad \{7\}$$

Её минимум находится в точке

$$\bar{p} = \bar{p}_0 + (A^T W A)^{-1} A^T W (\bar{m} - \bar{f}(\bar{p}_0)). \quad \{8\}$$

Несложные математические выкладки приводят к следующим формулам:

$$tx = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i z_i}{\sigma_{x_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2}}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{x_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2}} \quad \{9\}$$

$$ty = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{y_i z_i}{\sigma_{y_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{y_i}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2}}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{y_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2}} \quad \{10\}$$

$$x = tx \cdot z + \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{x_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i z_i}{\sigma_{x_i}^2}}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{x_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2}} \quad \{11\}$$

$$y = ty \cdot z + \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{y_i}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{y_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{y_i z_i}{\sigma_{y_i}^2}}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{y_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2}} \quad \{12\}$$

Параметр трека z находится путём усреднения z -координат кластеров, входящих в трек:

$$z = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2}}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{y_i}^2}}. \quad \{13\}$$

Для построения псевдобыстротного распределения вторичных заряженных частиц необходимо «сшить» треки в соседних слоях эмульсии – фактически восстановить траекторию движения вторичной частицы через слои эмульсии. Для этого каждый трек из эмульсионного слоя A сшивается с каждым треком из слоя B . Из всего многообразия вариантов выбирается трек с минимальным χ^2 , удовлетворяющий критерию попадания в вершину взаимодействия. Данная процедура повторяется для всех треков. В результате получается множество треков, состоящих из частей, зарегистрированных в разных слоях, и имеющих меньшую угловую неопределённость, чем каждая отдельная часть трека.

Направление движения первоначального ядра может быть не перпендикулярно плоскости события вследствие расхождения падающего пучка. В то же время ось события близка к направлению движения первоначального ядра. Алгоритм поиска оси события во многом схож с алгоритмом поиска вершины взаимодействия. На основе данных о вершине взаимодействия c строится множество точек максимального сближения треков из множества A с вершиной c . Из первоначального множества треков A исключаются все треки, которые хотя бы в одной точке удалены друг от друга более чем на $3\sigma_c$. Углы оставшихся треков усредняются и находится первоначальное направление оси μ . Затем строятся гистограммы угловых распределений, из которых находятся новые значения направления оси μ и σ . Из A исключаются треки, если угол между ними и направлением оси μ превышает 3σ . Затем снова строятся гистограммы угловых распределений и процедура повторяется до тех пор, пока углы между направлениями всех треков из A и μ не окажутся внутри интервала 3σ , т.е. когда из A нельзя будет исключить ни один трек.

По созданному программному обеспечению для автоматизированной обработки ядро-ядерных взаимодействий при энергии 158 ГэВ/нуклон при поперечном облучении эмульсионной камеры готовится к защите в ноябре 2006 года кандидатская диссертация аспиранта группы ПАВИКОМ А.Б. Александрова.

Анализ ядро-ядерного взаимодействия включает построение псевдобыстротного распределения вторичных частиц и последующий вейвлет-анализ их распределения. Для вычисления псевдобыстрот требуется определение оси события; для этого направления треков усреднялись итерационной процедурой. Ось события принимается за направление движения первоначального ядра. Псевдобыстрота определяется формулой:

$$y = -\ln \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}, \quad \{14\}$$

где θ – угол между направлением трека и осью события.

При столкновениях ядер высоких энергий в эксперименте EMU-15 рождается большое число вторичных частиц. Анализ их распределения в фазовом пространстве составляет основную задачу исследования, так как позволяет сделать заключение о динамике процесса. Это сделать непросто, даже если измеряются только углы вылета частиц (полярный и азимутальный), поскольку число вторичных частиц иногда превышает 10^3 . Задача сводится к распознаванию образов, созданных на плоскости мишенной диаграммы таким количеством точек. Вейвлет-анализ позволяет решить эту задачу [69]. В приведенном в работе [69] событии взаимодействия двух ядер свинца при энергии соударения, в 160 раз превышающей их массу покоя, было обнаружено (помимо известных струй и министруй) характерное кольцевое расположение некоторой подсистемы частиц в мишенной плоскости. Однако, эту структуру удается явно выделить лишь на некоторой шкале (уровне разрешения), когда фон значительно уменьшается. Обнаружение подобных структур представляет значительный интерес, поскольку они могут свидетельствовать о проявлении нового механизма [70] в сильных взаимодействиях, связанного с глюонным аналогом черенковского излучения фотонов. В [39, 81, 83-86] была продемонстрирована практическая применимость этого метода для анализа природы индивидуальных событий и выявления событий с так называемой кольцевой структурой, которые могут быть связаны с испусканием черенковских глюонов. В данной работе для двухмерного вейвлет-анализа спектров частиц был впервые использован вейвлет Добечи – более гладкая функция, по сравнению с применявшимися нами ранее вейвлетом Хаара и «мексиканской шляпой» (второй производной от функции Гаусса) [39, 81, 83-87].

Для применения математического метода вейвлет-анализа к изучению ядро-ядерных взаимодействий после их автоматизированной обработки был

создан специальный интерфейс. Результат этого анализа продемонстрирован на примере исследования внутренней структуры разлета вторичных генерированных частиц локально и на разных масштабах в событии 5c15e эксперимента EMU-15.

Вейвлет-преобразование в применении к нашей задаче можно рассматривать как итерационную процедуру, первый шаг которой представляет изучаемый исходный дискретизованный сигнал в виде его усреднения с некоторой весовой функцией (далее мы будем называть ее скейлинг-функцией) и разницы между этим усреднением и исходным сигналом. Усредненные значения вычисляются только в четных (или только в нечетных) точках. Далее та же процедура дальнейшего усреднения и выделения флуктуаций повторяется с усредненным сигналом. В пределе мы получаем среднее значение изучаемого сигнала на всем интервале и его флуктуации на масштабах кратных 2. В простейшем случае т.н. вейвлета Хаара это сводится к разложению на полусумму и полуразность в соседних точках.

С математической точки зрения вся процедура выглядит как разложение функции по ортонормированному базису:

$$f(x) = \sum_k s_{J,k} \varphi_{J,k}(x) + \sum_{k,j \geq J} d_{j,k} \psi_{j,k}(x) \quad \{15\}$$

где J – номер последнего выполненного шага (уровень наименьшего разрешения; в пределе первая сумма представляет собой просто среднее по всему интервалу), $\varphi_{j,k}(x)$ и $\psi_{j,k}(x)$ - базисные функции, полученные с помощью растяжения и сдвига скейлинг-функции и вейвлет-функции соответственно:

$$\varphi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \varphi(2^j x - k) \quad \{16\}$$

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \psi(2^j x - k)$$

Формально коэффициенты разложения (далее просто коэффициенты s и d) могут быть вычислены по формулам

$$s_{j,k} = \int dx f(x) \varphi_{j,k}(x), \quad \{17\}$$

$$d_{j,k} = \int dx f(x) \psi_{j,k}(x), \quad \{18\}$$

Однако при этом прямые компьютерные расчеты по формулам {17} и {18} занимают довольно большое время и потому на практике их значения находятся с помощью быстрого вейвлет-преобразования (см. {20}, {21}), суть которого описана ниже.

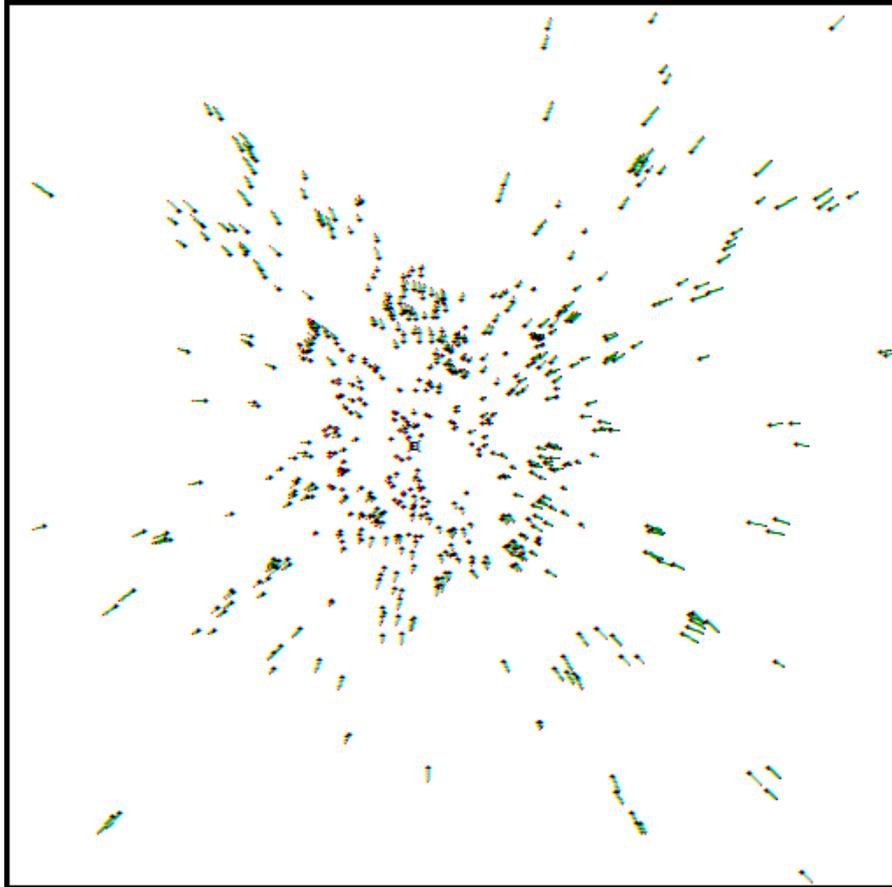


Рис. 9. Мишенная диаграмма события 5с15е после автоматизированной обработки.

Зададим все пределы суммирования в формуле {15}. Функцию $f(x)$ можно рассматривать на любом n -ном уровне разрешения j_n . Тогда разделение между ее усредненными значениями на этом уровне и флуктуациями вокруг них выглядит как

$$f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_{j_n,k} \varphi_{j_n,k}(x) + \sum_{j=j_n}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \psi_{j,k}(x). \quad \{19\}$$

Как было сказано выше, на бесконечном интервале первое слагаемое в {19} несущественно, так что в результате получается "чистое" вейвлет-разложение, причем коэффициенты $s_{j,k}$ и $d_{j,k}$ содержат информацию о составе сигнала на разных масштабах. Их можно вычислить,

непосредственно используя формулы {17}, {18}. Однако этот алгоритм неудобен, так как при вычислении потребуется провести N^2 операций, где N - число имеющихся значений функции. Нами использован намного более быстрый алгоритм, для которого соответствующие формулы приводятся ниже.

В реальных ситуациях с оцифрованным сигналом всегда имеется конечный набор цифр (точек). Поэтому всегда существует наилучший уровень разрешения, когда каждый интервал содержит по одному числу. Соответственно и суммирование по k будет идти в конечных пределах. Удобно изменить шкалу разрешения (или шкалу f), приписав наилучшему уровню разрешения значение $j = 0$. В этом случае легко вычислить вейвлет - коэффициенты для более усредненных уровней $j \geq 1$.

Многомасштабный анализ приводит естественным путем к иерархической и быстрой схеме вычисления вейвлет-коэффициентов заданной функции. В общем случае, итерационные формулы быстрого вейвлет-преобразования имеют вид

$$s_{j+1,k} = \sum_m h_m s_{j,2k+m}, \quad \{20\}$$

$$d_{j+1,k} = \sum_m g_m s_{j,2k+m} \quad \{21\}$$

где

$$s_{0,k} = \int dx f(x) \varphi(x - k). \quad \{22\}$$

Эти уравнения обеспечивают быстрые (так называемые пирамидальные) алгоритмы вычисления вейвлет-коэффициентов, поскольку требуют теперь только $O(N)$ операций для своего завершения. Начав с $s_{0,k}$, мы вычислим все другие вейвлет-коэффициенты, если параметры вейвлета h_m , g_m известны. Явный вид вейвлета при этом не используется.

На рис. 9 представлена мишенная диаграмма разлета частиц в событии 5c15e, на рис.10 – псевдобыстротное распределение вторичных заряженных частиц этого взаимодействия. Это распределение было обработано с помощью нескольких итераций быстрого вейвлет-преобразования с использованием вейвлетов Добечи D^6 [88]. После этого d-коэффициенты

занулялись, и выполнялось такое же количество итераций обратного вейвлет-преобразования. На рис. 11 показано как выглядит это событие соответственно после двух и четырех итераций обратного вейвлет-преобразования. Потемнения отвечают большим корреляциям в группах частиц при разных разрешениях. Видно, что коррелированные группы имеют тенденцию располагаться в виде кольца вокруг центра диаграммы. Это соответствует группировкам частиц при постоянном полярном угле, т.е. фиксированной псевдобыстроте.

Действительно, псевдобыстротное распределение частиц в этом событии (см. рис.10) имеет два пика, которые соответствуют [87] двум конусам (вперед и назад в с.ц.м.) разлета частиц. Такая картина полностью отвечает представлениям о механизме испускания черенковских глюонов [87]. Что касается распределения частиц внутри колец по азимутальному углу, то интуитивные соображения подсказывают, что оно должно быть анизотропным, поскольку число испущенных черенковских глюонов при этих энергиях еще вряд ли очень велико (что было бы необходимо для азимутальной изотропии). Действительно, такая анизотропия корреляций по азимутальному углу видна на рис.11 и притом наиболее четко при четырех итерациях вейвлет-преобразования (правая часть рисунка). Можно было бы интерпретировать черные пятна на рис. 11 как струи (справа) или подструи (слева), генерированные черенковскими глюонами. При такой интерпретации можно надеяться получить сведения об адронном показателе преломления ядерной материи (кварк-глюонной плазмы?) и ее уравнении состояния. Для получения количественных оценок необходимо дальнейшее увеличение статистики обработанных экспериментальных событий.

Подобные коллективные эффекты [39, 71-87] могут приводить к возникновению кольцевых структур. Механизм возникновения этих структур в сильных взаимодействиях может быть объяснен либо аналогом черенковского излучения (глюоны обсуждаются как аналог фотонов), либо возникновением ударных волн Маха [87]. Оба обсуждаемых механизма имеют сходную природу – возникновение излучения при движении тела в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость распространения возмущения в этой среде.

В случае черенковских фотонов, излучаемых заряженной частицей, движущейся в среде со скоростью v , фазовая скорость света в среде должны быть меньше, чем v . В случае волн Маха, фазовая скорость – это скорость звука. В обоих случаях излучение будет распространяться вдоль конуса, ось

которого совпадает с направлением движения частицы z , а угол раствора определяется формулой

$$\cos \theta = c_w / v \quad \{23\}.$$

Для черенковских фотонов $c_w = c / n$, где n – показатель преломления среды, для волн Маха $c_w = c_s$, где c_s – скорость звука в среде. Оба этих коллективных эффекта определяются свойствами среды, в которой движется частица. Излучение черенковских фотонов связано с поляризацией атомов, производимой пучком заряженных частиц. Ударные волны Маха характеризуются изменением давления. Оба эффекта – следствие действия электромагнитных сил в среде.

Для ядерных взаимодействий аналогичный эффект (испускание черенковских глюонов) может проявляться, если ядерный показатель преломления глюонов >1 . В применении к сильным взаимодействиям это позволяет объяснить наличие кольцевых структур в распределении вторичных частиц в ядро-ядерных взаимодействиях. Наиболее значимым признаком существования кольцевых структур является присутствие двух пиков в псевдобыстротном распределении. При этом на плоскости мишенной диаграммы видны кольцевые структуры. Таким образом, экспериментальные данные о распределениях частиц могут быть использованы для обнаружения черенковских глюонов.

Подтвержден несимметричный характер распределения по азимутальному углу вторичных заряженных частиц в сочетании с пиками по псевдобыстроте в индивидуальном событии. Это свидетельствует об особенностях разлета, вызываемых многочастичными корреляциями, появление которых, в частности, ожидалось при сравнительно небольшом числе испущенных черенковских глюонов в каждом кольце.

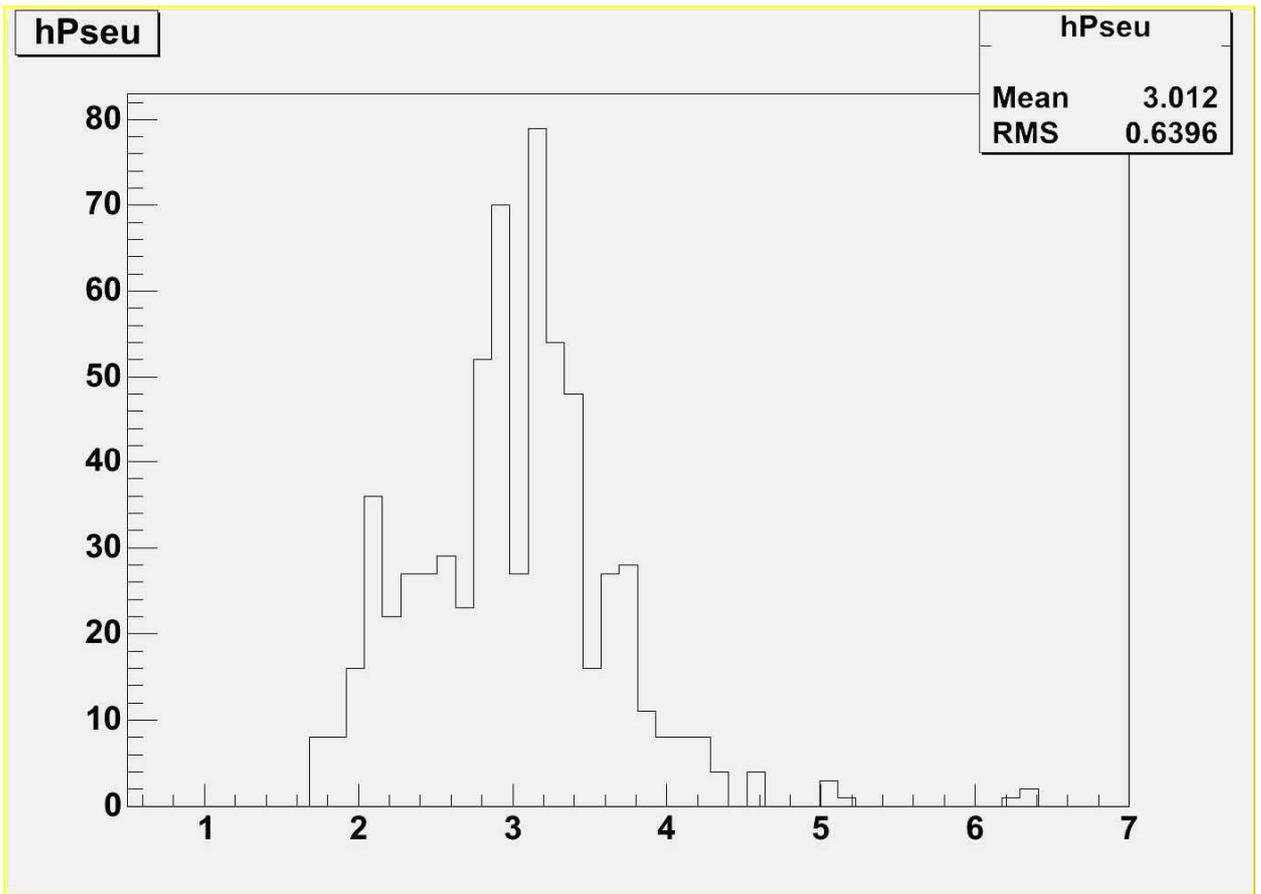


Рис. 10. Распределение псевдобыстрот вторичных заряженных частиц в событии 5с15е после автоматизированной обработки.

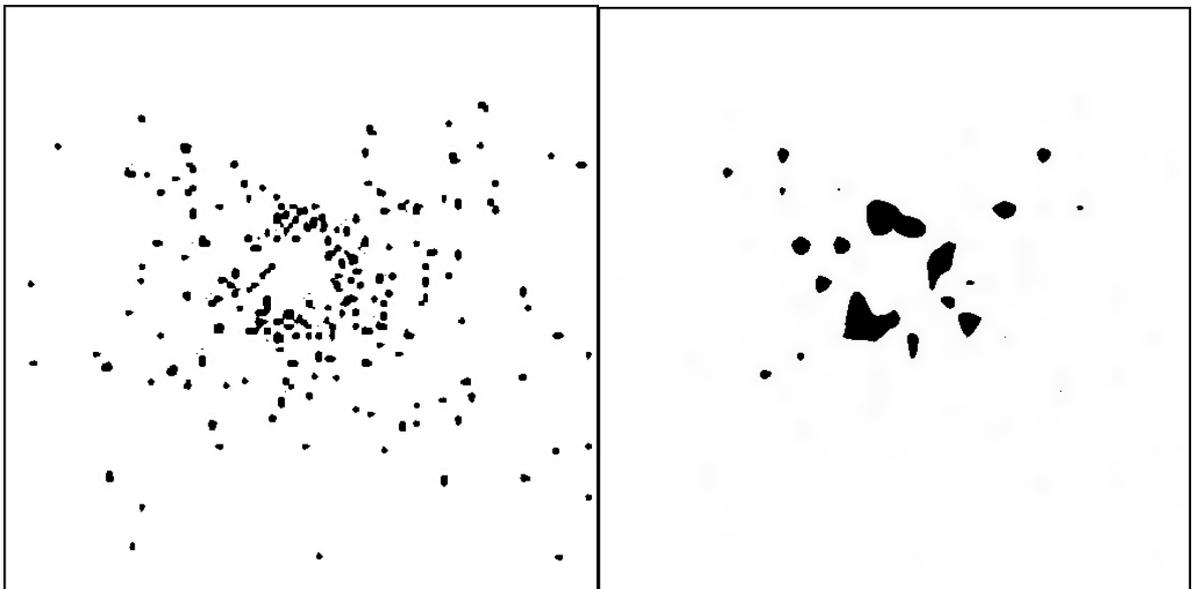


Рис. 11. Мишенная диаграмма события 5с15е соответственно после двух и четырех итераций обратного вейвлет-преобразования.

3.2. Изучение ядерного состава и энергетического спектра первичного космического излучения при высоких энергиях прямыми методами по данным эксперимента RUNJOB.

Одним из крупных пользователей комплекса ПАВИКОМ является коллаборация RUNJOB (НИИЯФ МГУ, ФИАН, 7 японских университетов). С целью изучения поэлементных энергетических спектров первичного космического излучения в рамках российско-японского эксперимента RUNJOB с 1995 г. по 1999 г. проведено 10 успешных полетов высотных автоматических аэростатов с эмульсионными камерами на борту общей продолжительностью 1440 ч в среднем на высоте 32 км [89-94]. Камеры имели сложную слоистую структуру с десятками слоев фоточувствительных детекторов (рентгеновской пленки и ядерной эмульсии), слоями углерода или стали в мишени, а также 2-х мм слоев свинца в тонком калориметре. Обработка фоточувствительных слоев проводилась четырьмя группами в России и Японии.

Новизна методики этого эксперимента состояла в развитии и использовании в обработке данных нового способа выделения тяжелых ядер, основанного на сканировании рентгеновских пленок «экранный типа» (SXF), который позволяет уменьшить порог регистрации тяжелых ядер и дает возможность получить в рамках одного эксперимента энергетический спектр и интенсивность потока ядер с зарядом меньше 24 в энергетическом диапазоне 0,1 - 100 ТэВ/частицу. Пленки экранного типа SXF представляют собой наборы из двухслойных рентгеновских пленок, помещенных между двумя тонкими сцинтиллирующими экранами. Когда тяжелое ядро проходит через пленку SXF, в обоих экранах происходят вспышки света, которые регистрируются в рентгеновских слоях как двойное пятно, различимое невооруженным глазом. Плотность числа пятен на рентгеновской пленке после недельной экспозиции в стратосфере составляет около 200 пятен на квадратный сантиметр. Автоматизация измерений позволила обрабатывать пленки SXF и соответственно привела к новому методу регистрации ядер - методу «вершинного триггера». В результате эффективность поиска тяжелых ядер космического излучения, прошедших через установку, достигает 100%, что, в свою очередь, определяет повышенные требования к идентификации и обработке треков зарегистрированных частиц. Задачей обработки было проведение необходимых измерений с такой точностью, чтобы не понизить достигнутую в эксперименте эффективность регистрации событий.

Поиск пятен почернения на пленках, создаваемых ядрами первичного космического излучения, и измерения их координат на ПАВИКОМ проводилось в полностью автоматическом режиме по специально разработанным программам [95-97]. Был обработан экспериментальный материал камеры 1996 г. О быстродействии установки можно судить, например, по времени обработки одного кадра (площадь кадра 3*4 мм, интенсивность пятен - около 200 на см²), которое составляло менее 2 секунд. Сканирование одной пленки занимало около 8 часов непрерывной работы ПАВИКОМ-1. Для каждого пятна измерялись его координаты, размер, величина потемнения в центре и среднее потемнение. Измерения проведены многократно при различных параметрах сканирования, определяющих работу алгоритма распознавания следов ядер. Был разработан и протестирован метод поиска треков и вершин взаимодействий тяжелых ядер, зарегистрированных в SXF пленках эксперимента RUNJOB – по экспериментальному материалу камеры 1996 г. восстановлены треки от тяжелых ядер, построены угловые распределения, найдены зарядовые диапазоны регистрируемых частиц, оценена эффективность регистрации частиц, получены целеуказания для поиска следов ядер в эмульсии. Точность целеуказания - 100 микрон на площади 50×40 см, при этом поиск следов ядер с эффективностью 100% происходил в автоматическом режиме. Менее чем за 15 секунд система вычисляет точку взаимодействия и автоматически перемещает оптический стол в нужное положение. (Заметим, что по ранее существовавшей методике в коллаборации RUNJOB поиск треков ядер производился в рентгеновской пленке, и вручную их координаты пересчитывали потом в эмульсию. Точность целеуказания при этом была 1 мм. В ядерной фотоэмульсии на площади, которая определялась этой ошибкой, оказывалось, как правило, несколько следов ядер и необходимо было выделять нужное ядро из нескольких возможных кандидатов). Поскольку энергия ядер в данном исследовании определялась по разлету вторичных частиц, генерированных в ядерных взаимодействиях, при обработке эмульсий целенаправленно проводился поиск точек взаимодействия ядер в мишенных слоях камер. Доля таких ядер составляет 3 % от общего числа ядер, прошедших через установку, что согласуется с модельными расчетами. Все такие ядра обнаруживаются по целеуказаниям, полученным при автоматической обработке материала на ПАВИКОМ. Найдено около 20000 треков тяжелых ядер, после определения энергии которых значительно расширится мировая статистика по группе тяжелых

ядер. В октябре 2004 г. по обработанному материалу в НИИЯФ МГУ успешно защищена кандидатская диссертация П.А.Публиченко на тему «Метод автоматизированного анализа эмульсионных данных для измерения спектра ПКИ».

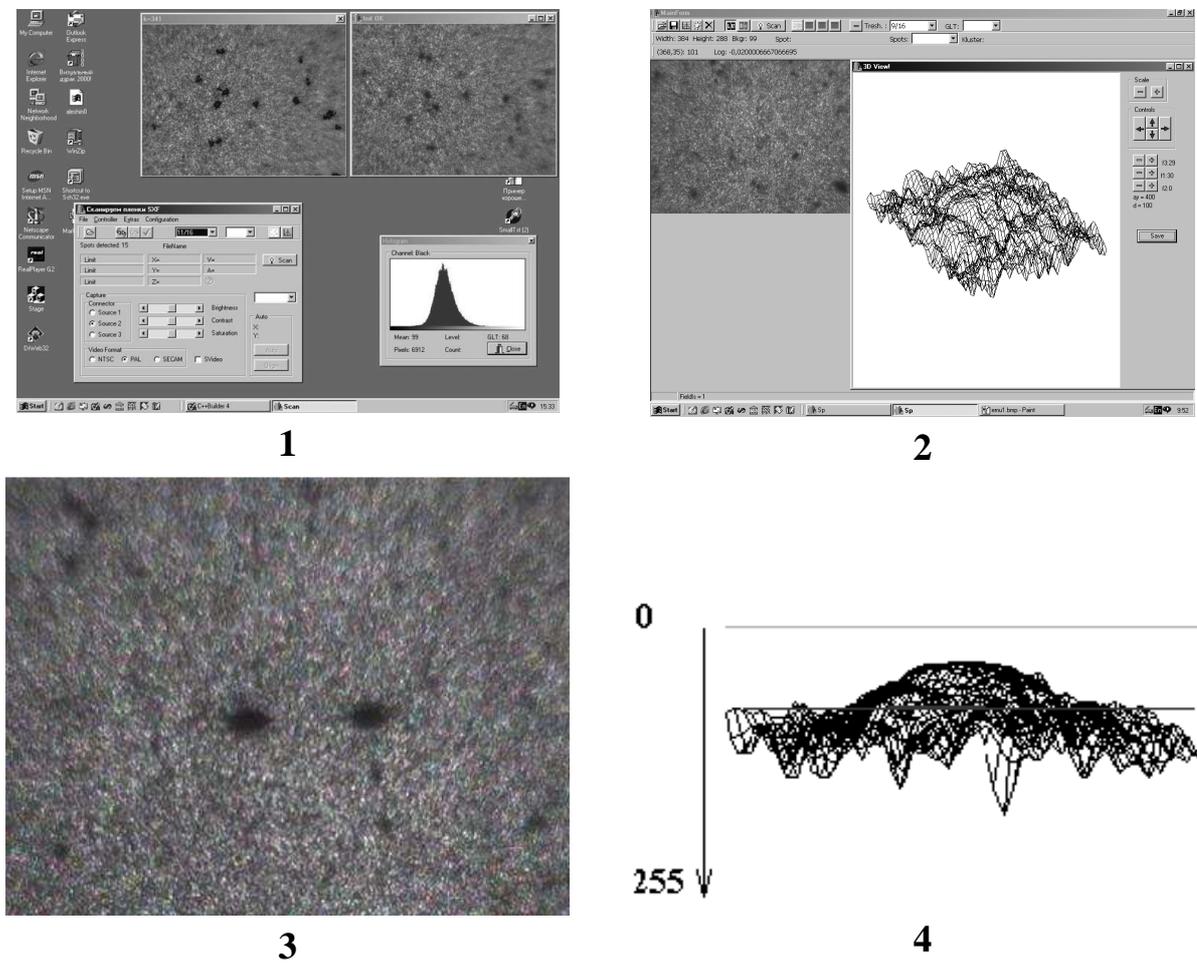


Рис. 12. Обработка SXF пленок эксперимента RUNJOB.

1. Вид экрана монитора ПК во время автоматической обработки; слева внизу – окно программы управления сканированием; справа внизу – гистограмма распределений почернений для выбранной контрастности изображений; справа сверху – изображение текущего кадра, полученное CCD-камерой; слева сверху – файл обработанного предыдущего кадра, уже содержащий информацию о каждом найденном пятне - его координаты, размер, величина потемнения в центре и среднее потемнение.
2. Часть кадра SXF пленки в трехмерной проекции, демонстрирующая большой фон на пленке и сложность выделения пятна потемнения от ядер при таком интенсивном облучении (длительность полета аэростата на высоте около 35 км с каждой камерой составляла примерно 7 дней).
3. Пятно от ядра, прошедшего через двухстороннюю SXF пленку и автоматически найденное при сканировании на ПАВИКОМ.
4. Трехмерное изображение пятна на SXF пленке.

Таким образом, использование ПАВИКОМ дало возможность российским физикам на равных со своими японскими коллегами участвовать в обработке экспериментального материала. Созданное программное обеспечение для автоматического сканирования и анализа микроизображений позволяет обрабатывать большие площади ($0,5 \text{ м}^2$) фоточувствительных материалов с высоким пространственным разрешением (7 мкм/пиксель и выше) с большой скоростью ($16 \text{ см}^2/\text{мин}$)

Коллаборацией RUNJOB (с участием ФИАН) были получены результаты по спектрам протонов, ядер гелия, ядер группы CNO, железа по спектру всех частиц, выполнено сравнение с данными других экспериментов, в том числе с новыми данными эксперимента ATIC, с которыми не обнаружено заметных разногласий в пересекающейся области энергий. Показано, что спектры ядер протонов и гелия имеют близкие показатели и не указывают на заметное укручение в области энергий до 1 ПэВ/частицу .

В рамках обработки данных эксперимента RUNJOB на ПАВИКОМ было разработано программное обеспечение для определения целеуказания поиска следов ядер в эмульсии и анализа характеристик пятен почернения в рентгеновской пленке для возможно более точного определения энергии зарегистрированных частиц. Созданный для эксперимента RUNJOB пакет программ успешно используется для ряда других задач (сканирования эмульсий эксперимента «СПЕКТР» [98-100], обработки стратосферного эксперимента «СТРАНА» [101-105] и др.)

3.3. 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, выполняемых в рамках эксперимента «БЕККЕРЕЛЬ». В коллаборации участвуют 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 вносят различный вклад в реализацию проекта. В частности, группа ПАВИКОМ использует 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.

Результаты и новые возможности эмульсионной методики в изучении когерентной (дифракционной) диссоциации ядер (когда мишенное ядро эмульсии остается невозбужденным) представляют особый интерес для понимания структуры ядра. Первые результаты исследования когерентной мультифрагментации релятивистских ядер ^{12}C с импульсом 4.5 А ГэВ/с в три альфа-частицы были опубликованы в [106, 107].

Когерентная диссоциация – это специфический процесс неупругого взаимодействия ядер, сечение которого не очень мало только при небольших передачах 4-импульса. Эти процессы нередко называют также квазиупругими, так как они протекают без обмена квантовыми числами между сталкивающимися ядрами и оставшееся невозбужденным ядро оказывает минимальное влияние на фрагментировавшее, лишь незначительно его возбуждая. При этом структурные особенности последнего проявляются наиболее отчетливо: если оно неоднородно по плотности и в нем близкие

корреляции между нуклонами значительно сильнее дальних, то они ведут себя по-разному - первые остаются невозмущенными, между тем как вторые легко разрушаются. Другими словами, в ходе такого взаимодействия ядро «охотно» фрагментирует на кластеры, которые в нем уже существовали, но были, хотя и относительно слабо, связаны между собой.

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. Примером служит когерентная диссоциация Li^6 : отношение вероятности распадов He^4 -d, He^3 -t, He^4 -pn, и ddd описывается соотношением 23:4:4:0, что определенно указывает на то, что главный член в волновой функции разложения для Li^6 представляет собой прямое произведение двух кластерных волновых функций He^4 и d. Измерительный комплекс ПАВИКОМ создает исключительную возможность выявить образовавшиеся в процессе дифракционной диссоциации кластеры вторичных частиц и исследовать характеристики частиц внутри даже узко коллимированных кластеров. На изображении (Рис.13), полученном с помощью ПАВИКОМ, хорошо видна кластерная структура в дифракционной диссоциации ядра Li^6 . Энергия связи между кластерами He^4 и d так мала, что эта кластерная структура явно обозначена в продуктах распада.

Во всех случаях мультифрагментации ядер Mg^{24} , зарегистрированных в эксперименте «Беккерель», практически все вторичные следы находились в конусе до 4° от направления первичного следа (рис. 14). (т.е. при исследовании мультифрагментации в релятивистской области энергий возможности наблюдения и спектроскопии конечных состояний, состоящих из заряженных фрагментов, определяются точностью угловых измерений. В этом смысле угловое разрешение следов релятивистских фрагментов в эмульсии – около 10^{-5} рад – обеспечивает полную наблюдаемость всех возможных распадов возбужденных ядер на фрагменты). Ни в одном из событий мультифрагментации ядер Mg^{24} не содержится более одного следа от релятивистского фрагмента с $Z > 2$. Очевидная особенность состоит в отсутствии событий бинарного и тройного расщепления легких ядер на

фрагменты, тяжелее α - частицы, что указывает на решающий вклад процесса мультифрагментации.

За период 2003-2005 года на ПАВИКОМ выполнены съемки более 120 наиболее интересных событий (объем видеозаписей более 6 ГБ), зарегистрированных в рамках эксперимента «БЕККЕРЕЛЬ» [61, 108-114].

Показано, что особенностью фрагментации ядер Ne, Mg, Si и S является практически полное подавление парных расщеплений ядер на фрагменты с зарядом больше 2. Возрастание степени фрагментации ядер проявляется в росте множественности фрагментов с зарядами 1 и 2 при уменьшении заряда основной невозбужденной части фрагментирующего ядра.

В процессах мультифрагментации стабильных изотопов Li, Be, B, C, N, O определены особенности образования систем из легчайших ядер α , d и t . Так, в дополнение к α -кластеризации проявляется кластеризация нуклонов в виде дейтронов в распадах Li^6 и B^{10} , а также тритонов в распадах Li^7 .

Эмульсии обладают особыми преимуществами при исследованиях нейтронодефицитных ядер. В проводимых исследованиях взаимодействий легких ядер с ядрами фотоэмульсии с помощью единого метода систематически изучается структура нескольких нейтронодефицитных ядер. В частности, возникает возможность поиска доказательств наличия протонного гало для радиоактивных ядер, играющих важную роль в астрофизических процессах ядерного синтеза. Именно это направление работы представляется наиболее актуальным на ближайшие годы.

В эксперименте, который еще продолжается и запланированы новые сеансы облучения эмульсий, будет определено полное сечение неупругих взаимодействий ядер в фотоэмульсии, что позволит оценить радиусы ядер. Будут измерены полные заряды фрагментов и зарегистрированы события с перезарядкой первичного ядра. Полученные результаты будут важны для понимания особенностей структуры легких ядер.

Группа ПАВИКОМ, имеющая вполне заслуженный авторитет в мировом эмульсионном сообществе, всегда старалась расширить круг российских ученых, имеющих возможность выполнять автоматизированную обработку трековых детекторов. С этой целью, в частности, описание оборудования фиановского комплекса было передано в ЛВЭ ОИЯИ, где предполагается создать аналогичный автоматизированный комплекс, группа ПАВИКОМ всегда оказывала и будет оказывать любую техническую и консультационную помощь нашим коллегам.

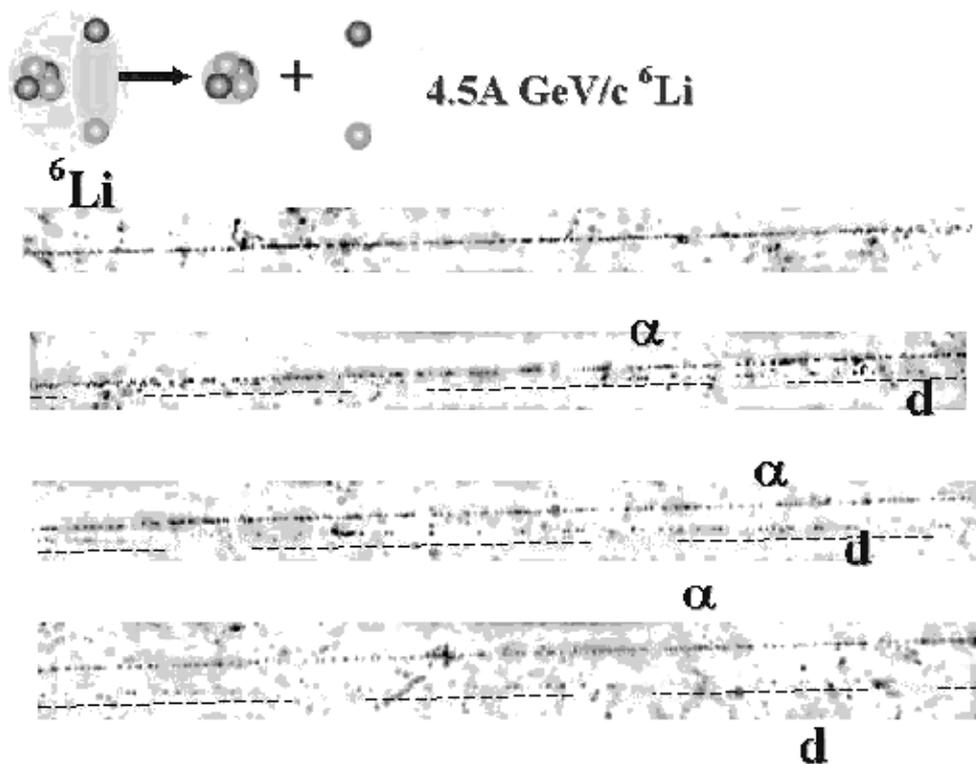


Рис. 13. Пример когерентной диссоциации Li^6 в He^4 и d . Энергия связи между этими кластерами так мала, что кластерная структура явно проявляется в продуктах распада. Видеоизображение этого распада получено на ПАВИКОМ.



Рис. 14. Диссоциация Mg^{24} на 6 α -частиц и фрагмент Be^8 .

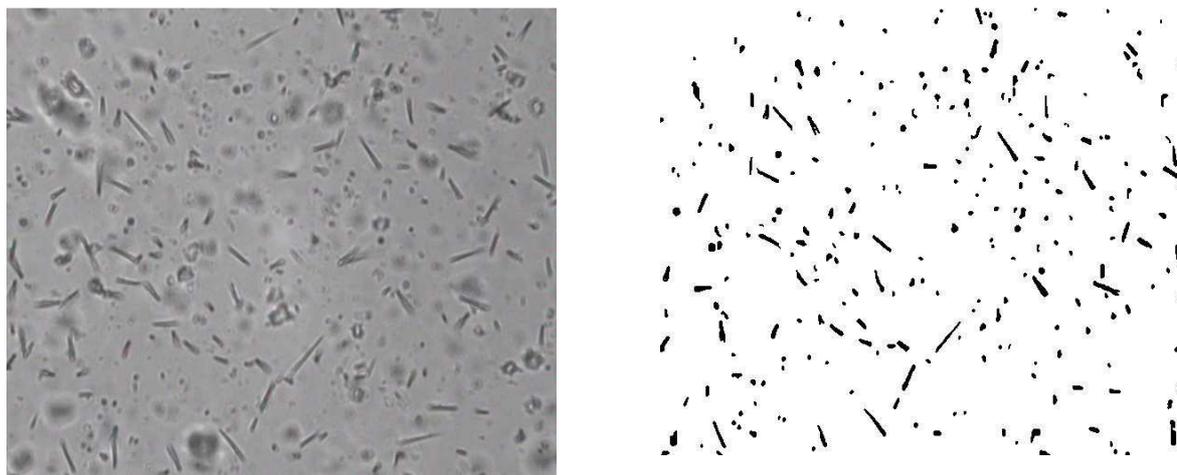
3.4. Автоматизированная обработка твердотельных трековых детекторов в проекте «Энергия плюс Трансмутация» - исследование электроядерного способа производства энергии и изучение трансмутации радиоактивных отходов.

Ускорители заряженных частиц с энергиями порядка 1 ГэВ и более, созданные в свое время для фундаментальных исследований в области ядерной физики, в последнее время все чаще используются для создания на их базе интенсивных импульсных источников нейтронов и экспериментальных установок для исследования электроядерного способа производства энергии и изучения трансмутации радиоактивных отходов атомной энергетики. В 1999 г. в ОИЯИ в рамках проекта «Энергия плюс Трансмутация» [115, 116] создана и в настоящее время испытывается модель уран-свинцовой сборки на протонном пучке синхрофазотрона. Эксперименты на U/Pb сборке и ее модели проводятся с целью прямого измерения мощности энерговыделения как по числу делений урана естественного изотопного состава, так и по количеству тепла, выделяемого в объеме blankets [116]. Исследование нейтронного спектра в объеме blankets имеет исключительно важное значение. Широкое применение в этом эксперименте для изучения нейтронных спектров твердотельных трековых детекторов (ТТД) на основе лавсана (полиэтилентерфталата) обусловлено их особенностями: высокой эффективностью регистрации осколков деления, низким собственным фоном и простотой технологии обработки. Твердотельные трековые детекторы используются в калориметре установки для мониторингования и определения профиля пучка; для изучения распределения событий деления в blankets; исследования деления урана тепловыми, резонансными и быстрыми нейтронами; определения усредненного сечения деления в blankets.

Трековые детекторы, изготовленные в виде сплошных полосок с различными радиаторами, в сеансах облучения располагаются на линии, перпендикулярной оси симметрии установки под несколькими углами. На основании результатов подсчета треков определяются парциальные интегралы деления ядер естественного урана тепловыми, резонансными и быстрыми нейтронами в зависимости от радиуса модели уранового blankets. Для измерения скоростей пороговых ядерных реакций использовался комплект мишеней из 23 химических элементов, в том числе Th²³², Au¹⁹⁷. Полученные значения скоростей реакций использовались для анализа

количества делений в радиаторах с различным порогом деления, находящихся на поверхности установки «Энергия плюс Трансмутация» и между секциями сборки, они позволяют восстановить спектр быстрых нейтронов для модели U/Pb сборки, а также рассчитать наведенную активность химических элементов, которые могут быть использованы как конструкционные материалы для создания электроядерных и других ядерно-физических установок. Методика определения абсолютного числа событий деления ядер урана с помощью ТТД позволяет проводить измерение распределения количества реакций в зависимости от радиуса и, тем самым, мощности энерговыделения в бланкете.

Однако визуальный подсчет треков на большом количестве детекторов (десятки, сотни штук) представляет весьма трудоемкую и долговременную процедуру. Возможность в автоматическом режиме проводить измерения в ТТД позволяет значительно облегчить этот процесс и увеличить как число обрабатываемых детекторов, так и их площадь.



*Рис. 15. Слева - видеоизображение одного поля зрения размером около 100*100 микрон в твердотельном детекторе эксперимента «ЭНЕРГИЯ ПЛЮС ТРАНСМУТАЦИЯ», полученное на ПАВИКОМ; видны треки осколков деления ядер урана. Справа – результат обработки этого кадра программой, распознающей следы осколков.*

Для обработки таких пленочных детекторов на ПАВИКОМ нами было разработано математическое обеспечение [117], которое позволило в полностью автоматизированном режиме оцифровывать оптические изображения следов на пленках, распознавать следы осколков и подсчитывать их концентрацию (Рис.15). Используя это программное

обеспечение, на ПАВИКОМ ежегодно с 2000 года проводится обработка экспериментального материала ТТД всех сеансов работы электроядерной установки на протонном пучке синхротрофазотрона ОИЯИ.

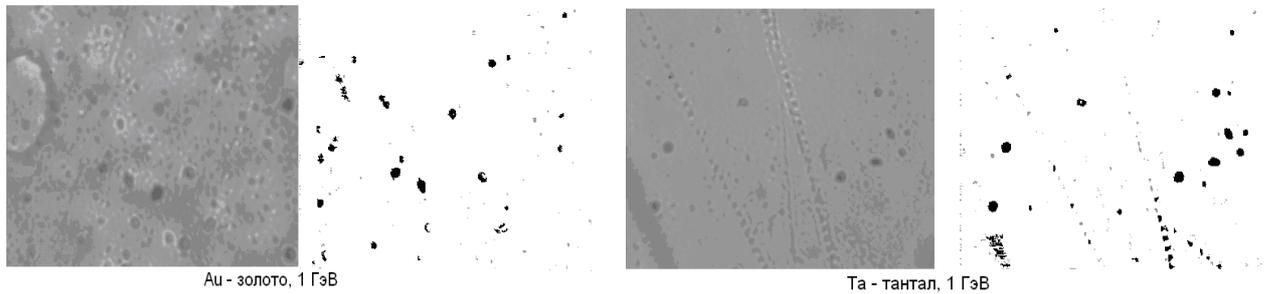


Рис. 16. Исходные видеоизображения и изображения распознанных треков для двух типов радиаторов - золото и тантал.

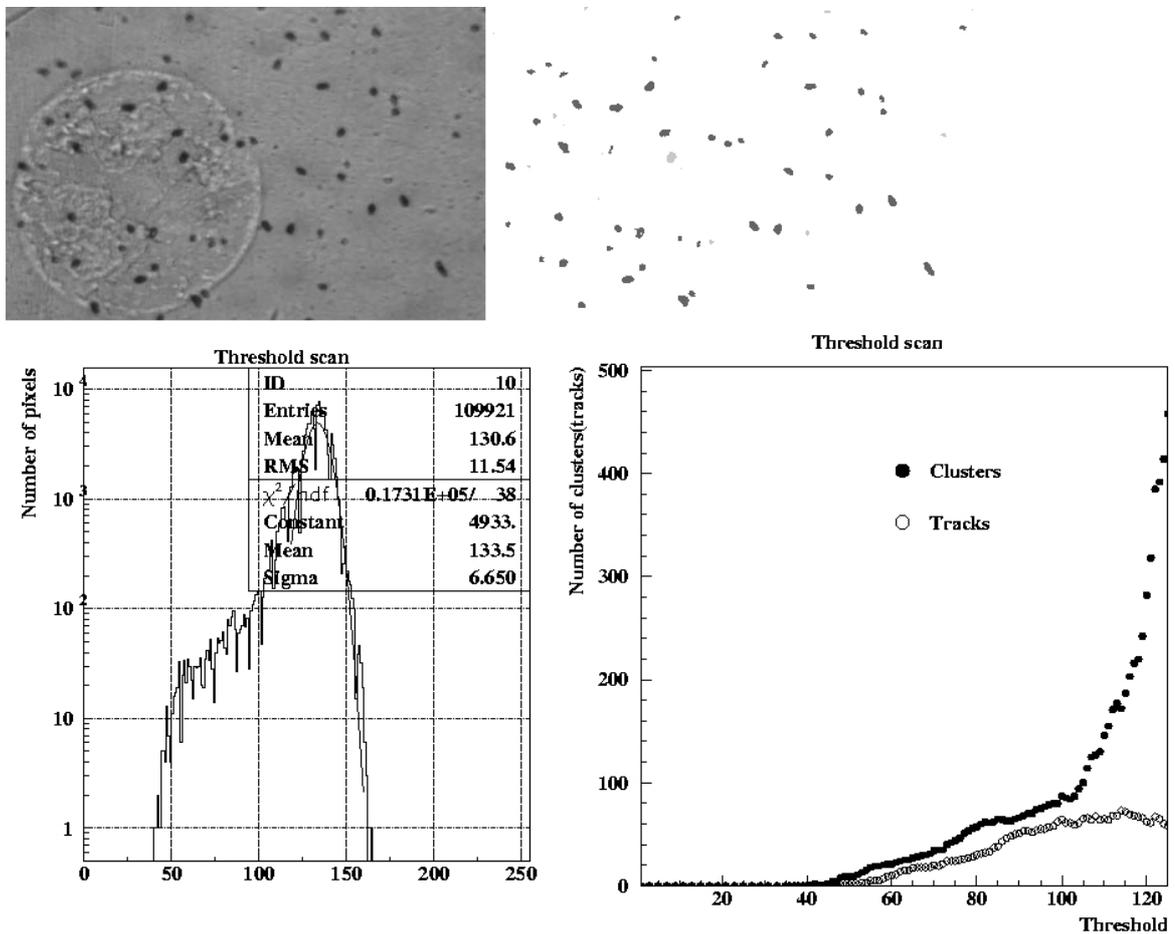


Рис. 17. Исходное и обработанное видеоизображение (радиатор – Th), распределение степени почернения, зависимость количества кластеров и треков от порога обрезания.

По результатам обработки трековых детекторов, облученных в ноябрьском сеансе 1999 года, было определено число делений нейтронами (отдельно - тепловыми, резонансными и быстрыми) в зависимости от расстояния от оси симметрии уран-свинцовой сборки. Наблюдается тенденция роста вклада медленных нейтронов с увеличением радиуса. Основной вклад в процесс деления U^{238} вносят быстрые нейтроны [116].

В частности, также обработан весь материал ТТД, полученный в сеансе работы 19-20 декабря 2002 г. на нуклотроне-9 ЛВЭ ОИЯИ, в котором были облучены пленочные майларовые детекторы толщиной 100 мкм и размером 10x10 мм. Облучение проводилось при трех разных энергиях пучка протонов: 0.65, 1 и 3.7 ГэВ. В этом сеансе использовались 5 типов радиаторов: Bi, Ta, Pb, Th, Au (Рис.16). Автоматизированная обработка была выполнена с использованием программы, имеющей два окна в интерактивном режиме. В первом окне были предусмотрены поля для ввода некоторых параметров: путь к директории с обрабатываемыми графическими файлами, их количество, максимальное и минимальное допустимое количество пикселей, максимальная длина кластера, максимальная и минимальная его ширина, задаваемый порог. Конкретно для этого сеанса характерная ширина треков около 7-8, а длина – 50 пикселей, размер кадра 384x288 пикселей, в микронах размер поля зрения составлял 96x72 мкм². В отдельном окне для каждого файла выводилось количество кластеров, треков и значение порога. Эта же информация сохранялась в текстовом файле. Во втором окне программы выводилась графическая информация - исходное изображение, изображение найденных кластеров и распознанных треков. Изображения распознанных треков сохраняются в формате BMP. На рис.17 показано исходное изображение (радиатор - Th); тот же обработанный программой кадр, распределение пикселей по интенсивности изображения, зависимость количества кластеров и треков от выбранной величины порога. Эффективность распознавания треков с помощью данного алгоритма для детекторов, облученных в декабре 2002 г., составила 90%.

3.5. Тестовые измерения для автоматизированной обработки данных эксперимента «ПЛАТАН» с целью исследования первичных космических лучей солнечного и галактического происхождения методом многослойных твердотельных трековых детекторов.

Методика трековых твердотельных детекторов используется Санкт-Петербургским Физико-техническим институтом им.А.Ф.Иоффе РАН для изучения потоков ядер первичного космического излучения солнечного и галактического происхождения [60, 118, 119].

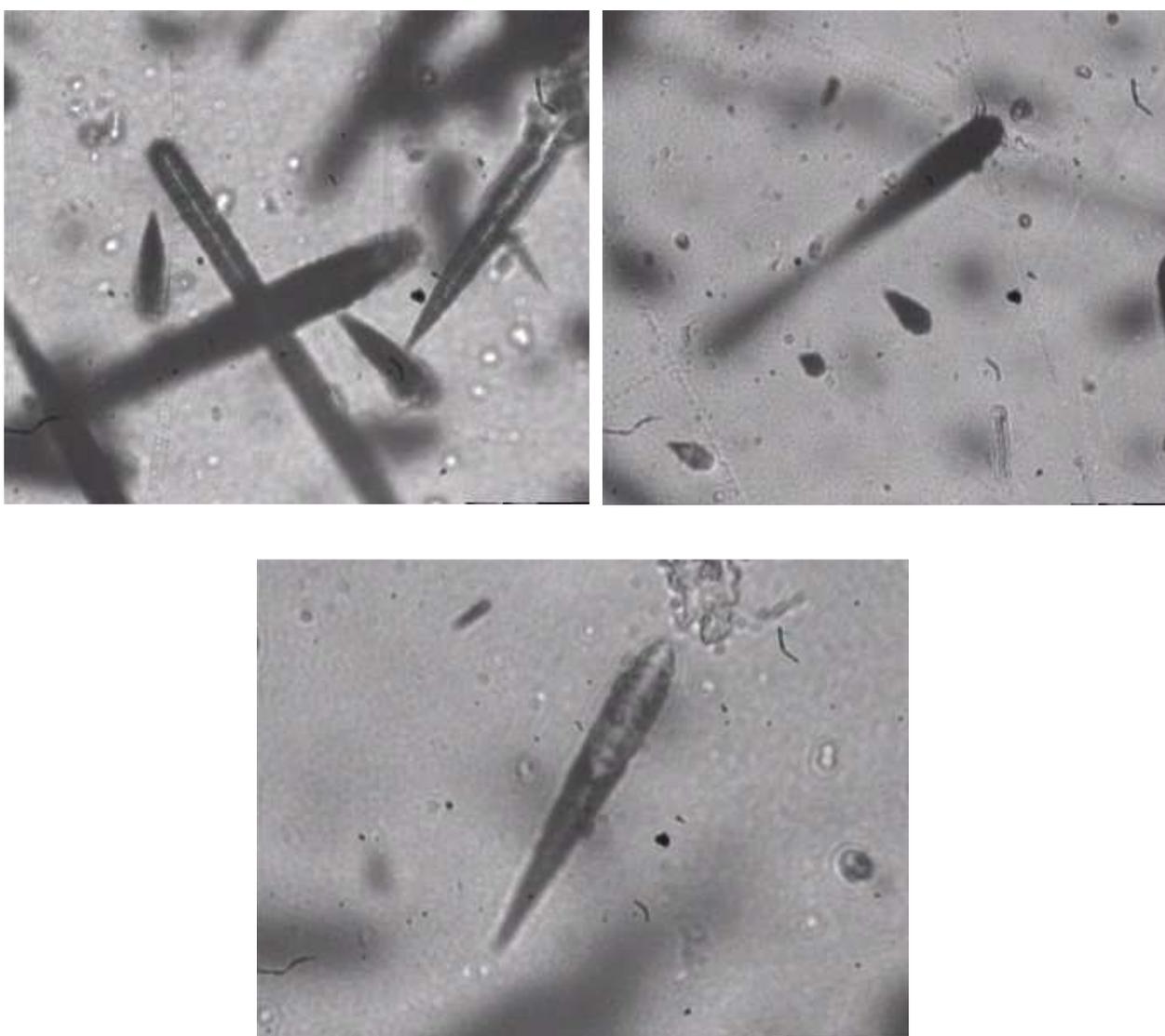


Рис. 18. Примеры оцифрованных оптических изображений следов ядер в образцах детекторов CR-39, используемых в эксперименте «Платан» (ПЛАстиковый Трековый Анализатор).

При прохождении заряженной частицы через полимерную пленку CR-39 вследствие ионизации, производимой частицей, происходит нарушение молекулярных связей в полимере вдоль траектории частицы. В результате, при последующем травлении пленки в химическом растворе может иметь место явление избирательности, когда скорость растворения материала вдоль траектории частицы - V_T превысит скорость растворения поверхностного слоя пленки - V_0 . Отношение $V_T \cos(90^\circ - \alpha) / V_0 > 1$ является условием образования трека в виде конуса, где α - угол траектории частицы относительно плоскости полимерной пленки. Длина конуса L (расстояние от вершины до центра основания конуса) пропорциональна, в первом приближении, ионизации, производимой частицей, которая увеличивается по мере замедления частицы и приближения к точке остановки в слое.

Измерение длин конусов L_i и расстояний R_i от середины L_i до точки остановки частиц в слое позволяет построить диаграмму $L_i = f(R_i)$. По сгущению точек на такой диаграмме выделяются ядра с фиксированным зарядом. При измерении заряда тяжелых ядер солнечных космических лучей (СКЛ) четко выделяются сгущения точек для ядер железа и кальция при крайне низкой распространенности ядер с промежуточным зарядом. В случае регистрации ядер группы железа галактических космических лучей (ГКЛ) для градуировки используются наиболее распространенные ядра железа ($Z=26$).

В настоящее время блок таких детекторов экспонируется на Международной Космической Станции в открытом космическом пространстве. Предполагается, что после возвращения на Землю и специальной процедуры травления пластины твердотельных детекторов будут обрабатываться на ПАВИКОМ с целью поиска следов ядер и измерения их заряда и энергии. Для создания математического обеспечения такой обработки на ПАВИКОМ была проведена серия измерений следов ядер в опытных пластинах. Полученные оцифрованные оптические изображения следов ядер переданы в С.-Петербург, общий объем переданной информации – 20 Гб (на Рис.18 дан пример видеоизображения треков в CR-39 для останавливающихся в слое частиц и проходящей через слой частицы - два конуса, идущих навстречу друг другу с верхней и нижней поверхностей слоя).

3.6. Экспериментальное исследование спектров электронов внутренней конверсии методом ядерной спектроскопии.

В работе физиков ИТЭФ и ОИЯИ (получившей при обработке на ПАВИКОМ условное название «СПЕКТР») проводится экспериментальное исследование спектров электронов внутренней конверсии методом ядерной спектроскопии, который позволяет получать информацию о свойствах ядерных состояний – энергиях, спинах, четностях, изотопических спинах и других характеристиках.

Исследуя спектры электронов внутренней конверсии (ЭВК), можно изучать переходы между ядерными уровнями. Сравнение экспериментальных величин коэффициентов внутренней конверсии или относительных интенсивностей линий конверсионных электронов с их соответствующими теоретическими значениями позволяет определить мультипольность ядерных переходов, а, следовательно, и данные о спине и четности ядерных состояний. Зная коэффициент внутренней конверсии, в ряде случаев (при смешанной мультипольности гамма-излучения) можно находить соотношения между матричными элементами и делать выводы о характере возбуждения ядра и о ядерных волновых функциях. Изучение конверсии – основной путь исследования 0-0-переходов в ядрах и получения экспериментальных значений ядерных матричных элементов. Прецизионные измерения интенсивности электронов внутренней конверсии, обеспечиваемые современной эмульсионной техникой, дают возможность изучать аномалии в значениях коэффициента внутренней конверсии и другие явления.

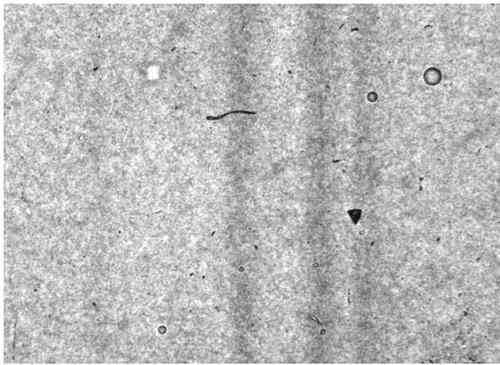
Переход от техники микрофотометрии к технике микроскопных эмульсионных измерений при исследовании спектров электронов внутренней конверсии изотопов редкоземельных элементов открывает возможность выявить мультипольность переходов, интенсивности которых на 3 - 4 порядка меньше интенсивностей известных переходов.

Эмульсионные слои размером 25x450 мм² и толщиной 600 мкм облучались на бета-спектрометре ОИЯИ электронами внутренней конверсии, испускаемыми изотопами редкоземельных элементов. Величиной, подлежащей определению на данном этапе обработки экспериментального материала фотоэмульсионных линеек со спектрами ЭВК, является интенсивность почернения фотослоя, нанесенного на стеклянную подложку, как функции расстояния от источника электронов до точки наблюдения.

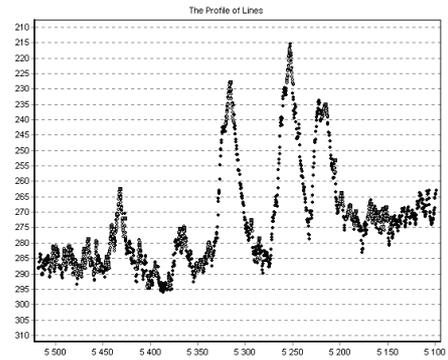
На ПАВИКОМ сняты спектрограммы с разрешением около 7 эВ для двух типов изотопов - ^{68}Er (рис.19) и ^{65}Tb . При этом для сканирования эмульсий была использована программа управления движением стола, разработанная для сканирования данных эксперимента RUNJOB, а для выделения линий спектра было создано оригинальное программное обеспечение, использующее идею суммирования степени почернения в заданном направлении для усиления выделяемого эффекта и обнаружения слабых линий на большом фоне. Исходные изображения содержат помехи в виде посторонних включений (пятен, царапин и т.п.), поэтому требуется их предварительная математическая обработка. В зависимости от характера загрязнений использовались различные виды фильтрации. Измерения, выполненные на ПАВИКОМ, позволяют определить интенсивности уровней, а также получить интенсивности 0-0 переходов, недоступные в обычной технике гамма-спектроскопии [98-100]. Предварительные результаты, полученные в данном эксперименте, уже показали, что у некоторых изотопов редкоземельных элементов существуют десятки ранее неизвестных ядерных переходов. Главная цель продолжающихся исследований - выяснить интенсивности таких переходов, энергии и мультипольности.

На рис.19 показаны результаты обработки спектров $^{161}\text{Er}_{68}$ и их аппроксимация различными функциями. Определение параметров линий осуществляется методом наименьших квадратов для области, примыкающей к линии или группе линий. При таком методе обработки в спектре ЭВК, полученном на ПАВИКОМ, видны линии M и N переходов.

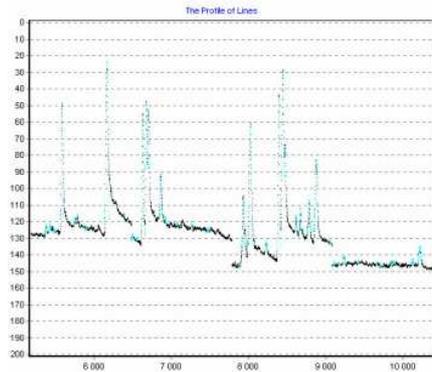
При исследовании спектра электронов внутренней конверсии техникой микрофотометрии не удалось измерить интенсивность линий L_2 и L_3 от γ -перехода с энергией 148.16 КэВ [120]. Это связано с наличием в этом энергетическом интервале K-линии ЭВК ($E_e = 139.9$ КэВ) от интенсивного γ -перехода с энергией 195.5 КэВ в изотопе $^{158}\text{Er}_{68}$. Искомые линии L_2 и L_3 от $^{161}\text{Er}_{68}$ попадают на правый и левый склоны указанной K-линии $^{158}\text{Er}_{68}$ и тонут во флуктуациях фона. Тем не менее, используя корректную аппроксимацию спектральной линии, удалось выделить линии L_2 и L_3 на огромном фоне (эффект/фон $\sim 1/100$) и дополнить мировую базу данных по линиям ЭВК.



1



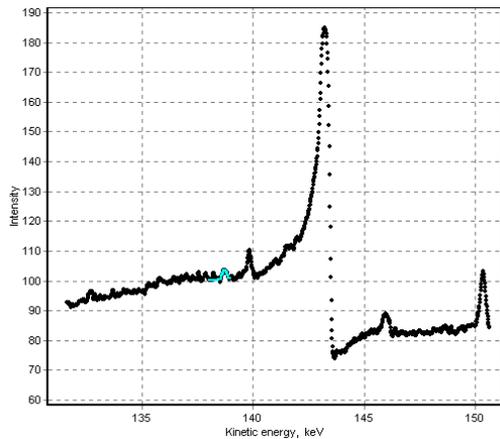
2



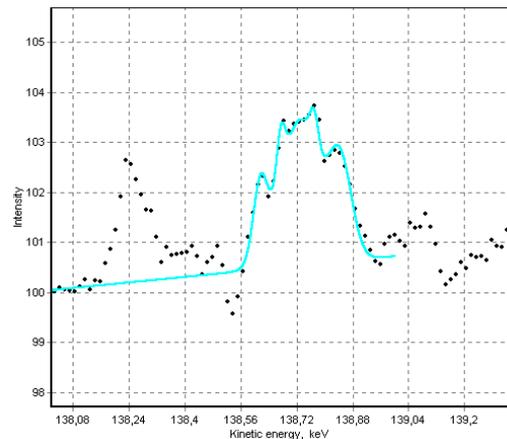
3



4



5



6

Рис. 19. Результаты обработки спектров электронов внутренней конверсии изотопа Er^{68} :

1 – изображение одного поля зрения размером 3×4 мм в эмульсии, облученной электронами внутренней конверсии; 2 – то же поле зрения после компьютерной обработки; 3, 4 – результат компьютерной обработки двух участков (длиной около 6 см каждый) эмульсионной пластины; 5 – участок спектра в пересчете на энергии электронов; 6 – в более крупном масштабе видна тонкая структура спектра - линии L_2 и L_3 .

3.7. Исследование структуры легких нейтроноизбыточных ядер.

Исследование экзотических ядер с двумя и более нейтронами в приповерхностной области (так называемом гало) представляет особый интерес. Понимание механизма взаимодействия легчайших нейтроноизбыточных ядер (например ${}^6,8\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{14}\text{Be}$) с ядрами мишени может дать информацию о возможности существования нейтронных кластеров в слабосвязанных системах кор-гало.

Эксперимент, описываемый в данном разделе, предложен и осуществляется сотрудниками ИЯИ РАН, при участии группы ПАВИКОМ в обработке ядерных эмульсий. Несколько стопок из 4-6 бесподложечных ядерных фотоэмульсий с толщиной каждого слоя 400 мкм облучается пучком перпендикулярно падающих легких ядер ${}^6,8\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$ и др. с энергиями $3 < E < 15$ МэВ/нуклон на ускорителе Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ. В качестве мишеней служили ядра элементов, входящих в состав эмульсии (${}^{12}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{79,81}\text{Br}$, ${}^{107,109}\text{Ag}$). Поскольку энергия продуктов реакции в заданном интервале энергий полностью поглощается в эмульсионной стопке толщиной 1600 - 2000 мкм, фотоэмульсия в этом эксперименте регистрирует все частицы в диапазоне углов 4π . Это обстоятельство существенно повышает эффективность метода по сравнению с электронными приборами. Координаты X и Y частицы первичного пучка, падающей на эмульсию перпендикулярно и не испытавшей взаимодействия, слабо изменяются в зависимости от Z, а угол наклона относительно оси Z близок к нулю. В первой серии экспериментов использовался пучок ${}^6\text{He}$. В случае реакции ${}^6\text{He} + A \rightarrow {}^4\text{He} + B$ в некоторой точке фотоэмульсии след ${}^6\text{He}$ пропадает, и из этой же точки начинается след ${}^4\text{He}$, а при определенных условиях - след ядра отдачи B. При этом ${}^4\text{He}$ может вылетать под достаточно большими углами, что соответствует большим изменениям координат X и Y с изменением Z. Тогда изображение вторичной частицы (пятно) будет вытянуто в направлении ее вылета. Таким образом в эксперименте будет измеряться угловое и энергетическое распределения фрагментов при условии одновременной регистрации ядер отдачи.

В ходе проведения первого этапа эксперимента уже предложена и опробована методика нанесения лазерных меток на стопки фотоэмульсий, позволяющая соотносить треки частиц в различных слоях стопки. Отработана методика и проведено плановое облучение стопок фотоядерных эмульсий на пучке ядер ${}^6\text{He}$ ускорителя У-400 ОИЯИ. Изготовлен

специальный столик для прецизионной установки эмульсий этого эксперимента на сканирующий стол микроскопа.

На ПАВИКОМ получены и оцифрованы изображения слоев фотоэмульсии; отлажена программа выделения кластеров - областей потемнения с характеристиками, присущими следам от заряженных частиц (степень почернения, форма, размер и т.д.); выделены треки частиц; определены вершины взаимодействия и кинематические параметры реакции; начата обработка экспериментальных данных [121 - 125].

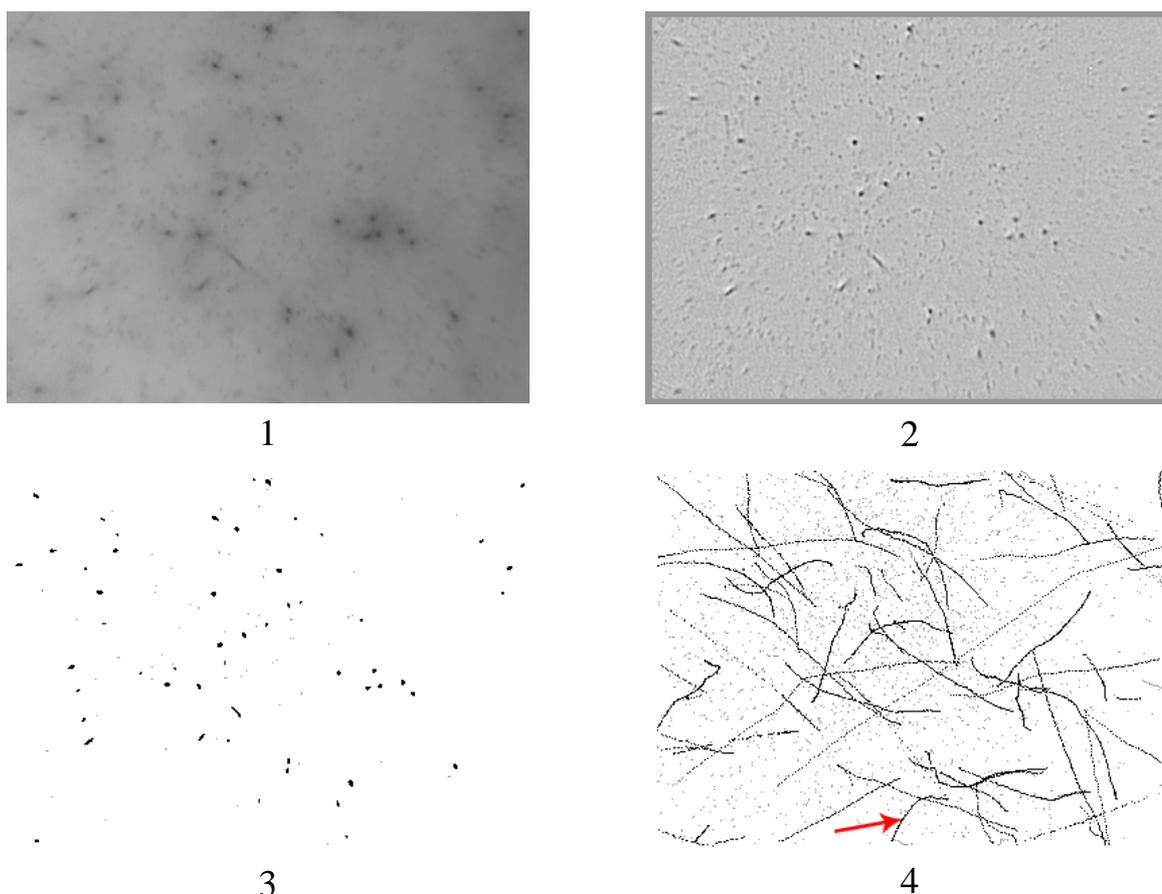


Рис. 20. 1 – видеоизображение на одной глубине в эмульсии размером 80×60 мкм; 2 – результат обработки этого же кадра математическим фильтром, определяющим границы блоков; 3 – бинаризованное изображение этого же кадра; 4 – все треки частиц, прошедших через эмульсию на этом поле зрения; стрелкой отмечен трек, показанный отдельно в более крупном масштабе на рис.21.

Сканирование эмульсий проводится на микроскопе ПАВИКОМ-2 при увеличении 60^x . Размер кадра составляет 80×60 мкм², шаг сканирования по глубине – 1 мкм, сканируется 150 глубин, поскольку после проявки толщина эмульсии составляет ~ 150 мкм. Размер оцифрованного кадра – 384×288

пикселей². Оцифрованные изображения сохраняются на диске в виде графических файлов, что позволяет использовать разные варианты алгоритма обработки для подбора наиболее эффективного из них. Для того, чтобы восстановить трехмерную структуру трека частицы в эмульсии, необходимо, используя изображения на разных глубинах, сначала выполнить процедуру кластеризации, затем, задавая параметры распознаваемых треков, восстановить их структуру. В данной работе учитывались следующие особенности изображения:

- треки ${}^6\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ в эмульсии при рассматриваемой энергии и соответствующем режиме обработки представляют собой сплошные линии, поэтому следы от них должны появляться на всех кадрах по глубине;
- направление пучка исходных частиц почти перпендикулярно плоскости эмульсии. Поэтому при шаге по глубине в 1 мкм смещение следа начальной частицы вдоль плоскости эмульсии (его координаты X и Y) на соседних кадрах невелико. Это позволяет более надежно отделить треки друг от друга. С другой стороны, малый шаг приводит к увеличению количества "опорных точек" трека и позволяет повысить точность определения его направления.

Полный алгоритм идентификации трека, также как и при обработке данных EMU-15, реализуется в несколько этапов с учетом особенностей данного облучения: 1. Кластеризация; 2. Трекинг; 3. Поиск вершины.

Последняя процедура имеет свои специфические особенности, а именно, в результате кластеризации и трекинга каждому центру масс (ЦМ) кластера на верхнем слое соответствует набор ЦМ с последующих слоев. Длина этого набора N должна быть достаточно велика, учитывая непрерывность следа и количество слоев. Она не всегда совпадает с числом слоев из-за жесткости условий кластеризации, которые приводят к отбраковке части пятен на изображении, принадлежащих треку. Оценка эффективности кластеризации дает ограничение $N > 120$. Для поиска треков с изломом проводится пошаговая аппроксимация прямыми линиями двух концов набора ЦМ, принадлежащих треку. Сначала с каждого конца аппроксимируется несколько точек (~ 15), к которым в цикле добавляется по одной точке до тех пор, пока очередная точка не увеличит резко χ^2 на одной из прямых. После этого цикл аппроксимации продолжается для второй прямой также до точки, где происходит резкое изменение направления. Если эти две точки с определенной точностью совпадают, она считается вершиной взаимодействия.

На рис.20-21 показан пример обработки эмульсий обсуждаемого эксперимента на ПАВИКОМ.

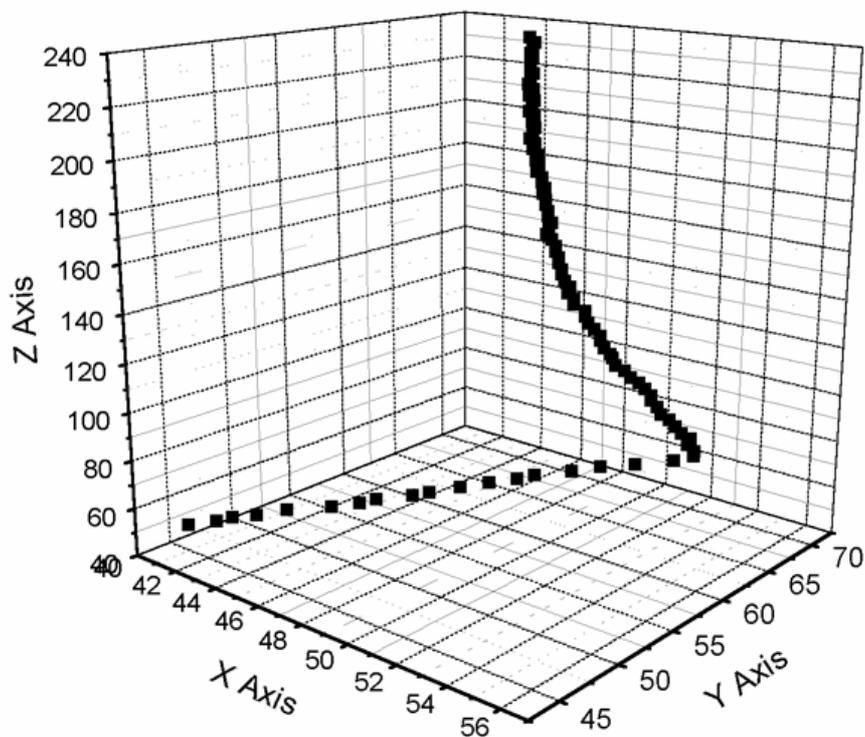


Рис. 21. Трек в эмульсии от частицы, испытавшей взаимодействие (отмечен стрелкой на рис.20).

3.8. Методика измерения на ПАВИКОМ зарядов релятивистских ядер в фотоэмульсии для изучения азимутальной анизотропии вылета многозарядных продуктов реакции в направлении, перпендикулярном плоскости ядерной реакции. Первый этап полной автоматизации измерений в толстослойных эмульсиях при продольном облучении.

Для изучения азимутальной анизотропии вылета многозарядных продуктов реакции в направлении, перпендикулярном плоскости ядерной реакции, которое проводит группа физиков Института теоретической и экспериментальной физики, в качестве первого этапа работы была разработана и реализована методика измерения зарядов релятивистских ядер в фотоэмульсии на ПАВИКОМ. Конечной целью этих исследований является изучение возможных проявлений фазового перехода второго рода в ядерном веществе в условиях сильно сжатой материи при высоких температурах. Предполагается исследовать выброс ядерной материи – испускание тяжелых фрагментов с зарядами до $Z=4-5$ (что как раз обеспечивается техническими возможностями ПАВИКОМ) в направлении, перпендикулярном плоскости ядерной реакции, при облучении фотоэмульсии тяжелыми ионами с энергией $(1,8-4,5)A$ ГэВ. Измерение азимутальной анизотропии вылета фрагментов позволит определить величину поперечного выброса энергии, который зависит от «сжимаемости» ядерного вещества, и извлечь из этого определенную информацию об уравнении состояния в экстремальных условиях. Важно подчеркнуть, что высокое пространственное разрешение ядерной фотоэмульсии является решающим фактором угловых измерений и идентификации фрагментов по их зарядам. Определение заряда фрагментов ядра-снаряда, образовавшихся в процессе взаимодействия, является одной из важнейших процедур при анализе характеристик ядро-ядерных взаимодействий, зарегистрированных в ядерной фотоэмульсии. Кроме того, эта работа стала одновременно первым этапом начавшейся на установке ПАВИКОМ совместной с Лабораторией космических лучей ФИАН работы по полной автоматизации измерений в толстослойных эмульсиях при продольном облучении.

Для выбора оптимальной процедуры определения заряда фрагмента были рассмотрены и опробованы все известные методы определения заряда частиц по характеристикам их треков. Так, при определении зарядов в интервале $Z=3\div 7$ используется метод счета числа разрывов (промежутков) между сгустками проявленных зерен на треке. Для частиц с зарядами $Z > 7$, треки

которых практически не имеют разрывов, применяется метод измерения количества и/или длины следов дельта-электронов, образовавшихся в процессе ионизации среды вдоль трека заряженной частицы. Обоснованием метода служит тот факт, что распределение дельта-электронов по энергии и пробегу зависит от заряда Z ионизирующей частицы [126]:

$$\frac{d^2N}{dTdx} = \frac{1}{2} 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 Z^2 \frac{z}{A} \frac{1}{\beta^2} \frac{F}{T^2},$$

где T – кинетическая энергия дельта-электронов;

x – количество вещества, пройденного ионизирующей частицей;

A – атомный вес атомов среды;

z – заряд атомов среды;

$\beta = v/c$, где v – скорость ионизирующей частицы, и c – скорость света.

Параметр F зависящий от спина ионизирующей частицы, при релятивистских энергиях считается постоянной величиной; m_e и r_e – масса и классический радиус электрона, так что множитель $4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$ равен $0,3071 \text{ Мэв} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$.

Ранее предпринимались попытки определять заряд частицы по ширине оставляемого им следа и по степени его почернения, то есть по плотности произведенной ионизации [127 -129]. Эти попытки, осуществляемые на фотометрах, не получили широкого распространения.

В работе, выполненной на ПАВИКОМ, использован комплексный метод определения заряда ядер, сочетающий в себе достоинства всех известных методик. В результате создан алгоритм, позволивший проводить с достаточной точностью измерение заряда ядер с $Z > 3$ [130].

Для построения калибровочных кривых по определению заряда ядра в эмульсии было выполнено сканирование тремя различными по характеристиками видеокамерами участков треков ядер He, Ne, C, Si, O, Be, Mg, Au, а также тестовая обработка модельных объектов (типа микрометрической шкалки). Для исключения зависимости калибровочных кривых от качества эмульсий, условий их проявки и характеристик пучка, в одной эмульсионной пластине дополнительно были отсканированы треки различных ядер с зарядами от 3 до 16. Исследуемые фрагменты рождались во взаимодействиях в фотоэмульсии ядер ^{28}Si с импульсом 4,5 ГэВ/нуклон, ускоренных на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ. Заряды фрагментов налетающего ядра ^{28}Si (с $Z_{\text{фр}}=3, 5, 6, 7, 9, 11, 12, 14, 16$) были предварительно определены без применения вычислительной техники вручную методами счета разрывов и/или числа дельта-электронов на их треке. Ниже приведены

калибровочные кривые, построенные по результатам сканирования треков фрагментов от ядра ^{28}Si .

Был разработан и реализован алгоритм выделения трека ядра в эмульсии по почернению и алгоритм построения кривых распределения почернений (рис. 22).

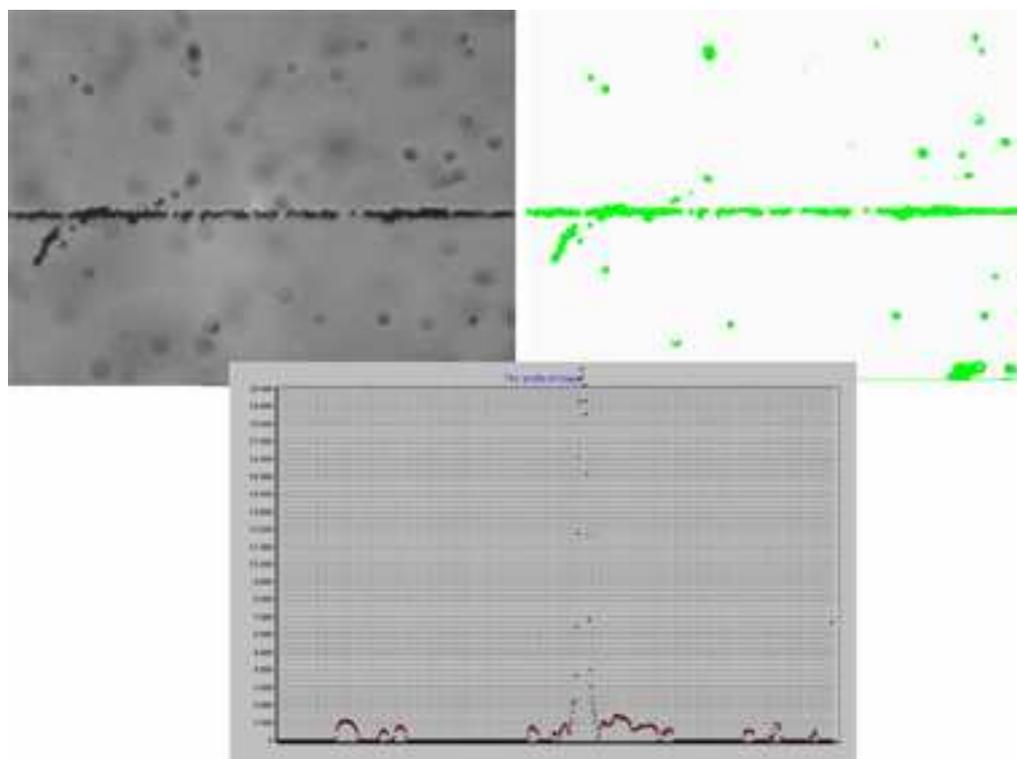


Рис. 22. Видеоизображение в эмульсии, его компьютерная обработка с целью распознавания трека частицы, и зависимость распределения почернений в данном кадре.

Программное обеспечение, созданное для определения заряда ядра, наряду с тремя обычно используемыми процедурами (фильтрацией, кластеризацией и бинаризацией, специально доработанными под эту задачу), имеет принципиально новые блоки, связанные с выделением трека заряженной частицы, поиском его оси и вычислением характеристик трека.

В частности, для вычисления характеристик определяется ширина основной части трека. Для этого на диаграмме расстояний выделяются точки, лежащие вблизи максимума (D_{\max} , N_{\max}) и имеющие высоту не менее $0,1N_{\max}$. Эти точки аппроксимируются функцией Гаусса. Результат аппроксимации изображен на рис. 22 кривой. Точки, лежащие на некотором определенном расстоянии от оси, считаются принадлежащими основному треку, остальные – трекам от дельта-электронов.

Далее вычисляются следующие характеристики:

- сумма (Total Sum) числа всех пикселей на площади основного трека заряженной частицы и всех треков от дельта-электронов;
- число (N_e) дельта-электронов. Для вычисления этой характеристики сверху и снизу от оси проводятся две параллельные ей прямые на определенном расстоянии (для обрабатываемой пластинки - 1,4 мкм). Числом электронов считается величина, равная половине от числа пересечений прямыми границ кластеров трека;
- сумма (P_e) периметров кривых, огибающих треки дельта-электронов – параметр, позволяющий учитывать длину пробега дельта-электронов;
- количество (N_g) промежутков между сгустками проявленных зерен в треке;
- суммарная длина (L_g) промежутков между сгустками проявленных зерен в треке;
- зависимость ионизации от глубины прохождения ядра в эмульсии (число дельта-электронов на треках ядер ^{28}Si , проходящих на разной глубине в эмульсии).

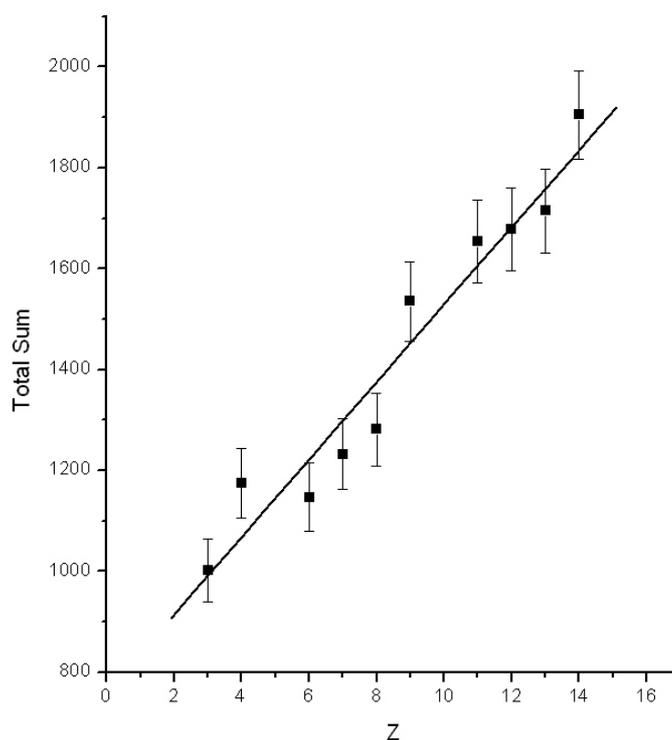


Рис. 23. Зависимость от заряда частицы суммы всех пикселей на площади основного трека заряженной частицы и площади всех треков от дельта-электронов.

На рис.23 представлена зависимость параметра «Total Sum» от заряда фрагментов, измеренная на ПАВИКОМ по описанной процедуре с использованием автоматизированной обработки эмульсии и компьютерного анализа данных. На рисунке видно, что измеренная интенсивность растет с увеличением заряда фрагмента и может быть аппроксимирована в пределах ошибок линейной функцией. Здесь указаны статистические ошибки измерений по 20 кадрам пленки, последовательно расположенным вдоль трека фрагмента. Таким образом, данная зависимость может быть использована в качестве калибровочной кривой для обработки эмульсионных экспериментальных данных, т.е. отсканировав на ПАВИКОМ трек частицы в эмульсии на достаточно большой длине и обработав его созданным пакетом программ, можно оценить заряд этой частицы с помощью приведенной на рисунке кривой.

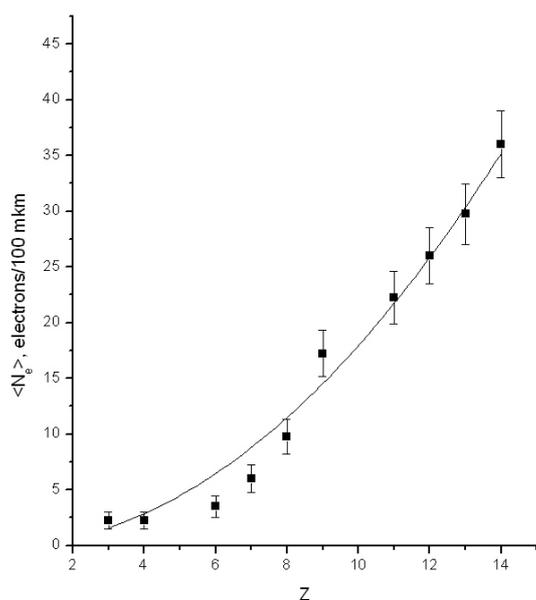


Рис. 24. Зависимость количества дельта-электронов от заряда фрагмента.

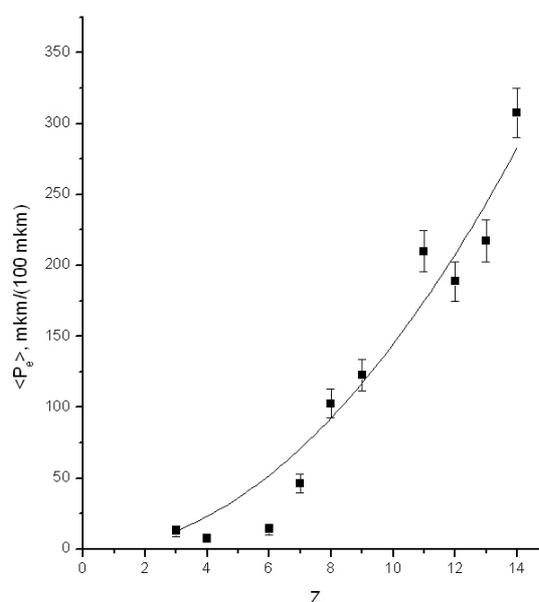


Рис. 25. Зависимость длины кривой, огибающей треки дельта-электронов от заряда фрагмента.

Еще одним параметром, позволяющим независимо определить или уточнить измеренное другим способом значение заряда ядра, является количество дельта-электронов. Логика процедуры счета числа дельта-электронов при автоматизированной обработке на ПАВИКОМ та же, что и при ручной обработке данных. Результаты определения этого параметра для

набора фрагментов с зарядами от 3 до 16 приведены на рис. 24. Количество дельта-электронов – N_e - случайная величина, имеющая пуассоновское распределение, N_e пропорционально длине пути, пройденного частицей в эмульсии. На рис. 24 приведена зависимость количества дельта-электронов от заряда фрагментов и нанесены статистические ошибки измерений.

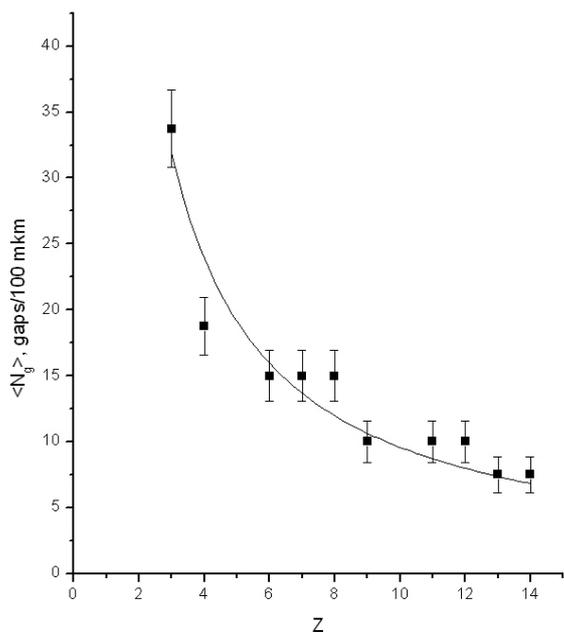


Рис. 26. Зависимость количества промежутков заданной длины между сгустками проявленных зерен на треке от заряда фрагмента.

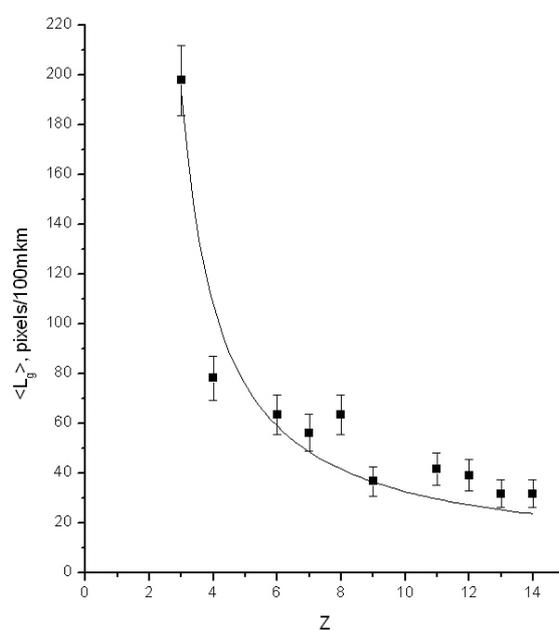


Рис. 27. Зависимость суммарной длины промежутков заданной длины между сгустками проявленных зерен на треке от заряда фрагмента.

Кроме того, в рамках проведенного методического исследования, была построена калибровочная кривая зависимости от заряда фрагмента длины кривой, огибающей треки дельта-электронов (параметр P_e). Данные, полученные этим методом, представлены на рис. 25. Некоторое искажение параметров, связанных с дельта-электронами, вносят следы фоновых частиц в случае, если они пересекают след исследуемой частицы и рассматриваются программой обработки как треки дельта-электронов. Наибольшее влияние этот эффект оказывает на параметр P_e . Степень таких фоновых искажений можно оценить по величинам N_e и P_e для частиц с наименьшим зарядом. После вычитания этого фона оставшаяся зависимость аппроксимируется параболой $N_e, P_e \sim Z^2$ (рис. 24,25): $N_e = 0,18 \times Z^2$, $P_e = 1,44 \times Z^2$. Следует

отметить, что измерение заряда ядра тремя независимыми методами значительно повышает достоверность результата.

Так же были исследованы зависимости количества промежутков заданной длины между сгустками проявленных зерен на треке $\langle N_g \rangle$ и суммарной длины этих промежутков $\langle L_g \rangle$ от заряда частицы. Полученные зависимости, аппроксимированные функцией $\sim 1/Z$, представлены на рис. 26 и 27. Данный метод позволяет определять заряды фрагментов $Z_{\text{фр}} \leq 6$ с высокой надежностью, поскольку в этой области значения $\langle N_g \rangle$ и $\langle L_g \rangle$ особенно чувствительны к заряду частицы. Метод определения заряда, использующий длину промежутков между зернами на треке частицы, хорошо дополняет описанные выше методы, основанные на подсчете числа δ -электронов, которые максимально эффективны для зарядов $Z_{\text{фр}} \geq 7$.

Были проведены измерения, позволившие определить и учесть изменение измеряемой ионизации трека в зависимости от его глубины, как следствие упоминавшейся выше неоднородности проявления эмульсионного слоя. Зависимость параметра N_e от глубины прохождения трека в эмульсии представлена на рис. 28. Как видно из рисунка, амплитуда изменения параметра ионизации N_e в зависимости от глубины трека в эмульсии достигает $\sim 25\%$, однако этот эффект существенен, главным образом, в интервале глубин менее 50 микрон от границы эмульсия-стекло.

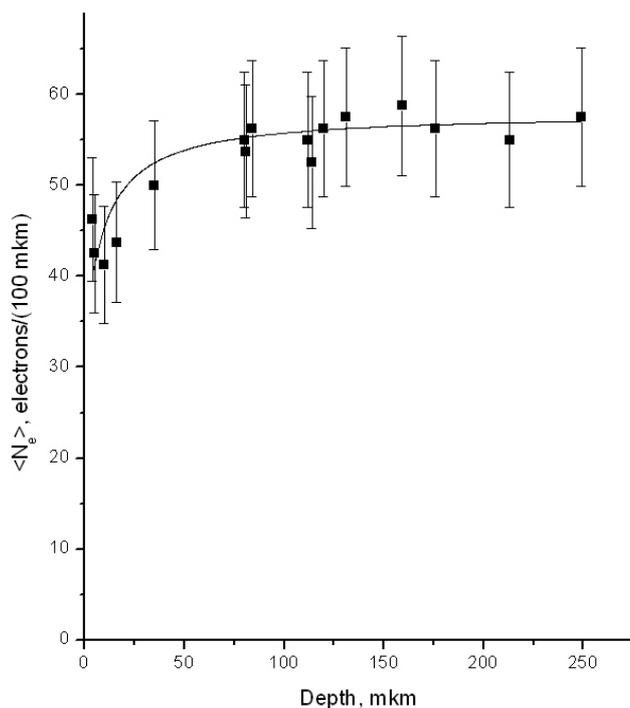


Рис. 28. Изменение измеряемой ионизации трека в зависимости от глубины прохождения трека в эмульсии.

Таким образом, в рамках решения задачи изучения азимутальной анизотропии вылета многозарядных продуктов реакции в направлении, перпендикулярном плоскости ядерной реакции, и автоматизации процесса обработки толстослойных эмульсий, облучаемых продольно, на ПАВИКОМ, разработана и протестирована методика определения зарядов релятивистских ядер. Заряд определяется независимо по нескольким параметрам:

- по ширине трека с учетом дельта-электронов;
- по количеству образовавшихся вдоль трека ядра дельта-электронов;
- по длине кривой, огибающей треки дельта-электронов;
- по количеству промежутков между сгустками проявленных зерен в треке и суммарной длине этих промежутков (для малых Z).

Построены калибровочные кривые, позволяющие определять заряд ядра по измеренным параметрам с точностью, зависящей только от длины отсканированного на ПАВИКОМ участка трека ядра. При сканировании участка трека длиной 1,6 мм, как это было сделано в данной работе, ошибка определения заряда по параметру “Total Sum” составляет $\sim 3\%$. При условии использования также и других упомянутых выше параметров ошибка в определении заряда уменьшается в 1,5 – 2 раза. Увеличение длины сканируемого трека до 3 мм, по нашим оценкам, уменьшит эту ошибку еще в 1,5 раза. Таким образом, ожидаемая ошибка определения заряда по отсканированному на ПАВИКОМ участку трека ядра длиной 3 мм при учете всей совокупности параметров, определяемых созданным программным обеспечением, составит менее 1%.

Разработанный метод существенно ускоряет и повышает надежность определения зарядов ядер в фотоэмульсионных экспериментах. Он является необходимым этапом автоматизации современных экспериментов в ядерной физике и востребован рабочими группами эмульсионных экспериментов как внутри России (ФИАН, ИТЭФ, ОИЯИ, ФТИ (СПб), ФТИ (Алма-Ата) и др.) так и за рубежом (Словакия, Румыния, Индия, Китай и др.).

IV. Планируемые работы и перспективы развития комплекса.

Имеющийся опыт, программное обеспечение и оборудование создают перспективы участия группы ПАВИКОМ в ряде интересных новых работ. Кратко остановимся на трех из них.

4.1. Исследование осцилляций нейтрино: модернизация аппаратуры и 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.

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 1946 г. 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), 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 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 провести ряд подготовительных работ, связанных с модернизацией аппаратуры, отладкой специализированного пакета программ.

В частности, предполагается смонтировать и запустить в эксплуатацию на установке ПАВИКОМ-2 приобретенную в 2005 году высокоскоростную систему регистрации изображений MC1310 (производимую фирмой Mikrotron по специальному заказу для эксперимента OPERA - уникальную не имеющую аналогов в мире сканирующую систему, которая дает возможность увеличить скорость сканирования до 500 кадров в секунду) а также разработать систему вакуумного прижима эмульсий во время сканирования. Предполагается адаптировать для ПАВИКОМ-2 стандартизованный в эксперименте OPERA пакет программ SySal для восстановления треков частиц в каждом слое эмульсии, а также пакет программ для перехода из слоя в слой и определения точки излома трека; отладить режим сканирования в соответствии с требованиями обработки материала эксперимента OPERA; выполнить сканирование тестовых облучений эмульсий на установке в Гран Сассо. Первые тестовые измерения и отладка программного обеспечения проводятся на 4 эмульсионных пластинах пробного облучения эмульсионных блоков ОПЕРА на пучке пионов в CERN (получены в 2004 г. в INFN, Неаполь).

Кроме того, имея большой опыт работы с ядерными эмульсиями, как российского, так и иностранного производства, группа ПАВИКОМ совместно с ИТЭФ, предлагает для эксперимента OPERA проведение ряда методических работ по контролю за качеством эмульсии (чувствительность, дисторсия и др.). Предлагаемый метод оценки дисторсионных искажений, идея которого принадлежит сотрудникам ИТЭФ, позволит быстро и надёжно выполнять выборочный контроль качества слоев, прошедших специальную обработку, и проводить калибровочные измерения дисторсий в слоях блоков, содержащих интересные события.

Планируемая адаптация комплекса ПАВИКОМ к задачам эксперимента OPERA даст 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.

Высоко оценивая опыт и возможности группы ПАВИКОМ, и зная о планах российских ученых заниматься обработкой эмульсий OPERA, в 2005 году CERN предложил передать нам в порядке оказания научно-технической помощи три автоматизированных микроскопа на базе столов МИКОС, ранее использовавшихся в обработке данных эксперимента CHORUS. В настоящее время принято решение о том, что столы будут смонтированы в НИИЯФ МГУ, ЛЯП ОИЯИ и ФИАН. Ведется обсуждение технических деталей и подготовка пакета документов. Поставка в Россию такого высококачественного оборудования существенно укрепит материальную базу и позволит российским физикам на равных участвовать в решении самых актуальных задач современной науки.

4.2 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 ОЛИМПИЯ («Оливины из метеоритов – поиск тяжелых и сверхтяжелых ядер») [131, 132], 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, Лабораторией высоких энергий ОИЯИ, 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.29). 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 ($Z > 30$) 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 $Z \geq 110$ [131, 132] 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 [133]. 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.29) и Игл Стейшн составляет 6 куб.см) будет задействован комплекс ПАВИКОМ. Использование этого комплекса, 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 (см. Рис. 30-33; Рис.34 – предварительная оценка распределения по зарядам 42 ядер в тестовых измерениях в объеме оливина $0,1 \text{ мм}^3$).

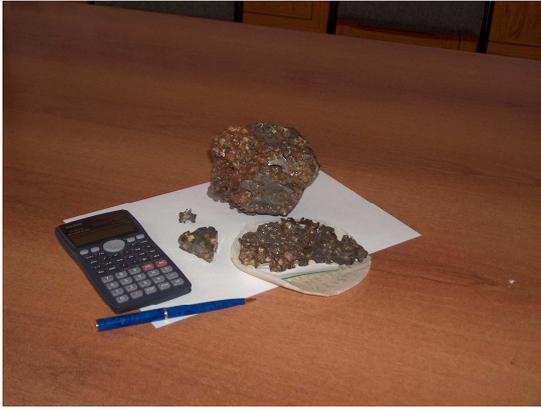


Рис. 29. Метеорит Марьялахти и его части.

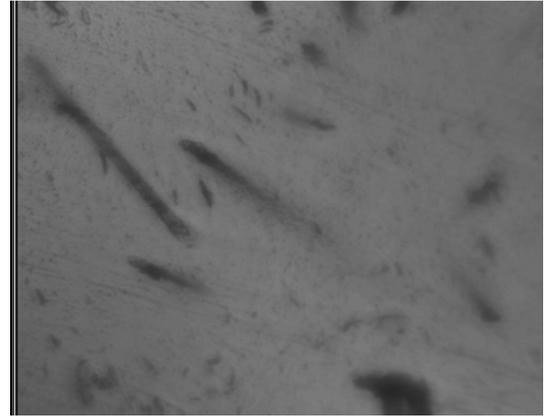


Рис. 30. Видеоизображение в отождешеном кристалле оливина; размер поля зрения 80×60 мкм, в центральной части видно начало трека реликтового ядра.

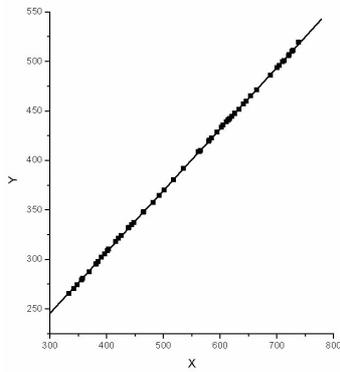


Рис. 31. Координаты X, Y трека (рис.30)

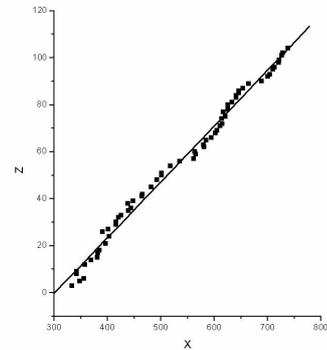


Рис. 32. Координаты Z, X трека (рис.30)

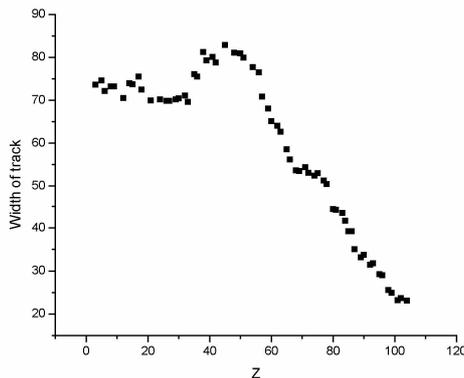


Рис. 33. Распределение по Z ширины трека (рис.30)

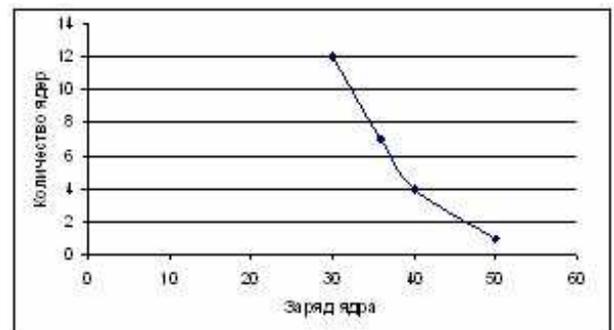


Рис. 34. Предварительная оценка распределения по зарядам 42 ядер, остановившихся в тестовом объеме оливина $0,1 \text{ мм}^3$.

4.3. Обучение студентов физических факультетов автоматизированным методам обработки данных трековых детекторов на базе комплекса ПАВИКОМ.

Новые автоматизированные методы существенно упростили и ускорили обработку данных с эмульсионных детекторов. Кроме ускорения, автоматизация измерений позволяет обрабатывать большие массивы экспериментальных данных и существенно улучшает их статистическую обеспеченность, а также предопределяет разработку проектов новых экспериментов, предполагающих использование крупнообъемных мишеней и эмульсионных и твердотельных трековых детекторов больших площадей. В этой связи крайне насущной становится проблема увеличения количества ученых, имеющих соответствующий уровень подготовки и способных работать на автоматизированной технике такого класса. В последние годы около десяти московских студентов ежегодно осваивают новые методы, работая в ФИАНе на комплексе ПАВИКОМ. К сожалению, большая часть студентов, занимающихся сейчас физикой высоких энергий в отечественных вузах, при обучении получает представление лишь об устаревших ручных методиках обработки данных с трековых детекторов. В 2005 году на базе комплекса ПАВИКОМ и физпрактикума физфака МГУ была подготовлена новая учебная работа [134] по определению энергии нейтронов, проходящих через ядерную эмульсию, которая дает возможность приобрести начальные навыки автоматизированной обработки трековых детекторов и может быть включена в учебный процесс студентов любых физических факультетов (рис.35). Учебная работа, выполненная с использованием новых автоматизированных методов обработки трековых детекторов, будет развивать навыки объектно-ориентированного программирования, логику систем распознавания образов, способствовать повышению уровня подготовки специалистов физики элементарных частиц.

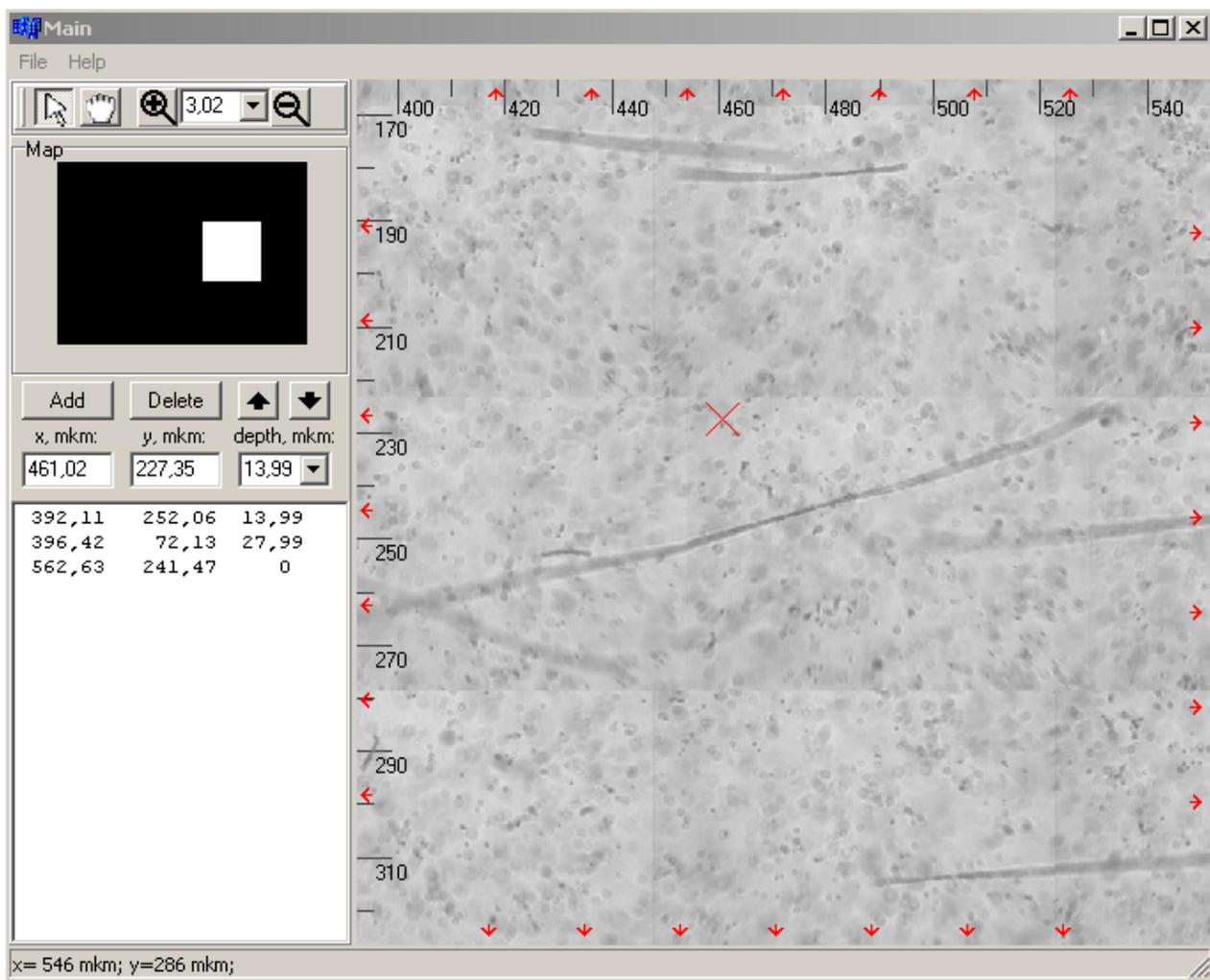


Рис.35. Изображение на мониторе компьютера во время работы программы обработки. На демонстрируемом участке изображения эмульсии видны части треков протонов отдачи.

V. Заключение.

В результате выполненного цикла работ фактически реализован новый подход к анализу экспериментального материала в разнообразных трековых детекторах. Представленная работа, по существу, открывает новое многообещающее направление в российской экспериментальной ядерной физике, связанное с исследованиями на базе автоматизированных комплексов для обработки данных трековых детекторов. При непосредственном участии автора создан и освоен высокотехнологичный Полностью АВтоматизированный Измерительный КОМПлекс (ПАВИКОМ). Главным отличием этого комплекса от других существующих подобных систем и уникальным достоинством является его универсальность – на автоматизированных установках комплекса обрабатываются и ядерные эмульсии, и пластиковые детекторы, и кристаллы оливинов из метеоритов. По существу, охвачен широкий спектр актуальных проблем современной ядерной физики.

Автором выполнено автоматизированное сканирование различных типов трековых детекторов (ядерных эмульсий, рентгеновских пленок, твердотельных трековых детекторов). Предложенный автором метод обработки видеоизображений, основанный на суммировании цифровой информации в определенном пространственном направлении и тем самым повышении вероятности обнаружения искомого эффекта (например, линии спектров электронов внутренней конверсии), используется как основная идея ряда программ ПАВИКОМ. Результаты выполненных на ПАВИКОМ работ неоднократно представлялись автором на международных и российских научных конференциях. В настоящее время диссертант – руководитель и ответственный исполнитель всех экспериментальных работ, выполняемых на комплексе ПАВИКОМ.

Основные результаты проведенных исследований:

1. Создан режим многоцелевого использования комплекса ПАВИКОМ. Несмотря на то, что базисные установки, составляющие основу всего комплекса, создавались первоначально только для экспериментов по физике частиц высоких энергий, усилиями автора удалось существенно расширить спектр возможностей ПАВИКОМ. Ни одна аналогичная установка в мире не используется для решения столь широкого класса задач. Непрерывно ведется модернизация комплекса, расширяющая его технические возможности.

2. Создан программный пакет для автоматизированной обработки ядро-ядерных взаимодействий с энергией 158 ГэВ/нуклон при поперечном облучении тонкослойных эмульсий и специальный интерфейс для применения математического метода вейвлет-анализа. В данной работе для двухмерного вейвлет-анализа вторичных частиц впервые использован вейвлет Добечи. Подтвержден несимметричный характер распределения по азимутальному углу вторичных заряженных частиц в сочетании с пиками распределения по псевдобыстроте в индивидуальном событии. Эти результаты указывают на особенности разлета, вызываемые многочастичными корреляциями, появление которых, в частности, ожидалось при сравнительно небольшом числе испущенных черенковских глюонов в каждом кольце.

3. Полностью и высокоэффективно обработан экспериментальный материал рентген-эмульсионной камеры, облученной в 1996 году в рамках эксперимента RUNJOB. Найдено около 20000 треков тяжелых ядер, измерено зарядовое распределение для всего диапазона регистрируемых частиц. Использование ПАВИКОМ дало возможность российским физикам на равных со своими японскими коллегами участвовать в обработке полученного экспериментального материала. Созданное программное обеспечение для автоматического сканирования и анализа микроизображений позволяет обрабатывать большие площади фоточувствительных материалов с высоким пространственным разрешением и большой скоростью (16 см²/мин). По результатам автоматизированной обработки на ПАВИКОМ успешно защищена кандидатская диссертация.

4. За период 2003-2005 года на ПАВИКОМ выполнены съемки более 120 наиболее интересных событий (объем видеоизображений более 6 ГБ), зарегистрированных в рамках эксперимента «БЕККЕРЕЛЬ» для изучения процессов фрагментации легких радиоактивных ядер и создан атлас наиболее интересных событий. Показано, что особенностью фрагментации ядер Ne, Mg, Si и S является практически полное подавление парных расщеплений ядер на фрагменты с зарядом больше 2. Возрастание степени фрагментации ядер проявляется в росте множественности фрагментов с зарядами 1 и 2 при уменьшении заряда основной невозбужденной части фрагментирующего ядра. В процессах мультифрагментации стабильных изотопов Li, Be, B, C, N, O определены особенности образования систем из легчайших ядер α , d и t .

5. Разработана методика и создано программное обеспечение для автоматизированной обработки майларовых твердотельных трековых

детекторов с радиаторами различного типа эксперимента «Энергия плюс Трансмутация». Ежегодно с 2000 года проводится обработка экспериментального материала ТТД всех сеансов работы электроядерной установки на протонном пучке синхротрофазотрона ОИЯИ. Определено число делений урана тепловыми, резонансными и быстрыми нейтронами, показано, что с удалением по радиусу от оси симметрии установки наблюдается тенденция роста вклада медленных нейтронов.

6. Выполнены тестовые измерения для автоматизированной обработки данных эксперимента «ПЛАТАН» с целью исследования первичных космических лучей солнечного и галактического происхождения методом многослойных твердотельных трековых детекторов. Объем видеоизображений отсканированных детекторов составил 20 Гб. Показана принципиальная возможность использования ПАВИКОМ для обработки детекторов CR-39.

7. На ПАВИКОМ сняты спектрограммы электронов внутренней конверсии с разрешением около 7 эВ для двух типов изотопов - ^{68}Er и ^{65}Tb . Уже первые результаты показали, что у этих изотопов редкоземельных элементов существуют десятки ранее неизвестных ядерных переходов. В частности, выделены линии L_2 и L_3 от γ -перехода с энергией 148.16 КэВ от $^{161}\text{Er}_{68}$ на огромном фоне (эффект/фон $\sim 1/100$).

8. Разработана методика исследования с помощью эмульсий нейтроноизбыточных ядер с двумя и более нейтронами в приповерхностной области: на ПАВИКОМ получены и оцифрованы изображения слоев толстослойной фотоэмульсии; отлажена программа выделения кластерообластей потемнения с характеристиками, присущими следам от заряженных частиц (степень почернения, форма, размер и т.д.), выделены треки частиц, определены вершины взаимодействия и кинематические параметры реакции; начата обработка экспериментальных данных.

9. Создана методика измерения на ПАВИКОМ зарядов релятивистских ядер в фотоэмульсии для изучения азимутальной анизотропии вылета многозарядных продуктов реакции в направлении, перпендикулярном плоскости ядерной реакции. Ошибка определения заряда по этой методике - менее 1%.

10. Проведена методическая работа и отладка программ с целью подготовки комплекса ПАВИКОМ для выполнения проекта ОЛИМПИА и участия в обработке данных эксперимента ОПЕРА.

Работы, обобщенные в диссертации, были выполнены в Отделе космических излучений Физического института имени П.Н.Лебедева РАН. Начиная с 1990 г. работы проводились под руководством академика Е.Л.Фейнберга, вклад которого в постановку научных задач и создание комплекса был определяющим. Евгений Львович, к сожалению, скончался в 2005 году.

Автор искренне благодарит академика В.Л.Гинзбурга за предложенный проект ОЛИМПИА и поддержку в его реализации, за постоянное внимание к работе группы.

Автор выражает свою признательность заведующему Отделом космических излучений профессору В.А.Цареву за постоянную научную поддержку и помощь в решении многих научных и организационных проблем. Данная работа есть обобщение коллективного труда сотрудников Отделения теоретической физики и Отдела космических излучений. Глубокий теоретический анализ материала был бы невозможен без участия профессоров И.М.Дремина, И.И.Ройзена и старшего научного сотрудника В.А.Нечитайло. Автор глубоко благодарен своим соавторам – Н.И.Старкову, А.Б.Александрову, Л.А.Гончаровой, Г.И.Мерзону, Н.С.Коноваловой, А.С.Русецкому, Г.М.Гранич, И.Ю.Апачевой и А.Г.Мартынову (к сожалению, его уже нет в живых), всем сотрудникам группы ПАВИКОМ (<http://www.lebedev.ru/wwwsites/pavicom.htm>).

Автор выражает благодарность за плодотворное и полезное сотрудничество всем коллегам и соавторам из российских научных организаций, работавшим на комплексе. Это физики из Научно-исследовательского института ядерной физики им.Д.В.Скобельцына МГУ, Института теоретической и экспериментальной физики, Объединенного института ядерных исследований, Института ядерных исследований РАН, С.-Петербургского физико-технического института им.Иоффе РАН, Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН. Автор чрезвычайно признателен коллегам из ЦЕРН, Национального института ядерной физики Италии (Неаполь), Университета Нагойя, Словении и Монголии за полезные консультации, помощь в решении многих технических проблем, связанных с созданием автоматизированного комплекса мирового уровня для обработки экспериментальных данных трековых детекторов.

VI. Литература.

1. Becquerel H.; C. R. Acad. Sc. 122 (1896) 501 and 122 (1896) 1086.
2. Photographie Corpusculaire, Strasbourg 1-6 Julliet 1957, CNRS, 1958.
3. Csikai J and Szalay A. (1959) The effect of neutrino recoil in the beta decay of He⁶. Soviet Phys. JETP 35, 749-51.
4. England J.B.A. (1974) Techniques in Nuclear Structure Physics (Part 1). Macmilan, London.
5. Childs C.B., Slifkin L.M. (1963), Delineating of tracks of Heavy Cosmic Rays and Nuclear Process within Large Crystals of Silver Chloride. Rev.Sci.Instr. 34, 101-4.
6. Haase G., Schopper E, and Granzer F. (1978). Solid State Nuclear Track Detector: Track forming, stabilizing and development process. In: Proc. 9th Int. Conf. Solid State Nucl. Track Detectors, Munich, and Suppl. I, Nucl. Tracks (eds. F.Granzer et.al.). Pergamon, Oxford, pp.199-213.
7. Fleischer R.L., Price P.B. and Walker R.M. (1975). Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications. University of Calofornia Press, Berkeley.
8. С.Дюррани, Р.Балл «Твердотельные ядерные детекторы» Москва, Энергоатомиздат, 1990.
9. «Автоматическая обработка данных с пузырьковых и искровых камер», под ред. Б.С.Розова, Москва, Атомиздат, 1971.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Chan J.H., Price P.B. (1975) Composition and energy spectra of heavy nuclei of unknown origin detected on Skylab. Phys.rev.Lett. 35, 539-42.
14. O'Sullivan D., Thompson A., Daly J., O'Ceallaigh C., et al. (1980) A solid state track detector array for the study of ultraheavy cosmic ray nuclei in earth orbit. In: Proc.10th Int.Conf. Solid State Nucl. Track Detectors, Lyon, and Suppl. 2, Nucl.Tracks. Pergamon, Oxford, pp.1011-19.
15. 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.

16. Fremlin J.H., Abu-Jarad F. (1980) Alpha-emitters in the environment. I:Natural sources. Nucl. Instr. Meth. 173, 197-200.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Fowler F.H., Perkins D. H. (1961) The possibility of therapeutic applications of beams of negative π mesons. Nature 189, 524-8.
21. 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.
22. "Bubble and Spark Chambers" edited by R.P.Shutt, vol.II, Academic Press New York and London, 1967.
23. Adair R.K., Fowler E.C. Strange Particles. (Interscience Tracts on Phys. and Astron., No 15, 1 N.Y., Wiley Interscience), 1963.
24. Dalitz R.H. Ann. Rev. Nucl. Sci., 13, 339 (1963).
25. Byers N., Fenster S. (Phys. Rev. Lett. 11, 52 (1963).
26. Intern. Conf. Fundamental Aspects of Weak Interactions. Proc. BNL 837 (C-39). Brookhaven Nat. Lab., Upton, Long. Island, 1963.
27. Feinberg G., Lederman L.M. Ann. Rev.Nucl. Sci., 13, 431 (1963).
28. W.H.Barkas, Nuclear Research Emulsions, vol. I and II, Academic Press, New York, 1963, 1973.
29. Humphrey W.E., Rosenfeld A.H. In: Annual reviews of Nuclear Science. Vol.13. Ed. E.Serge.California Annual Reviews. Palo Alto, p.103.
30. Alvarez L.W. Round Table Discussion on Bubble Chambers. Proceedings 1966 International Conference on Instrumentation for High Energy Physics (1966).
31. Lynch G.R. Remarks on use of the spiral reader. UCRL-17328 (1967).
32. E.H.Linfoot and E.Wolf. "Diffraction images in systems with an annular aperture" Proceeding of the Physical Society 66, 145-149, 1953.
33. Marr R., Rabinowitz G. In: Methods in Comutational Physics". Ed. By B.Alder et.al. Vol.V.N.Y., Academic Press, 1966, p.213. Proceedings of Informal Meeting on Track Data Proceeding CERN, Geneva (1962).

34. Cross W.G., Tommasino L. (1968) Electrical detection of fission fragment tracks for fast neutron dosimetry. *Health Phys.* 15, 196.
35. Tommasino L., Klein N., Solomon P. (1977) Fission fragment detection by thin film capacitors – I: Breakdown counter. *Nucl. Track Detection* 1, 63-70.
36. Harvey J.R., Weeks A.R. (1982). A simple system for rapid assessment of etch pits. *Nucl. Tracks* 6, 201-6.
37. Tommasino L. (1970). Electrochemical etching of damaged track detectors by H.V. pulse and sinusoidal waveform. *International Rept. Lab. Dosimetria e Standardizzazione, CNEN Casaccia, Rome.*
38. H.Wang, The central Pb-Pb Interactions at 158 A GeV from the EMU12 experiment, poster no.15, 12 th Int.Conf. on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Heidelberg, May 1996.
39. N.M.Astafyeva, N.A.Dobrotin, I.M.Dremin et al, Peculiarities of Secondary Particle Generation Process in Pb-Pb Interactions at 158 A GeV, 6th Conference on the Intersections of Particle and Nuclear Physics, 1997, p.269-273.
40. Di Liberto S., Ginobbi P. (1977) Automatic device for measurements of heavy ion tracks in plastics. *Nucl. Instrum. Meth.* 147, 75-8.
41. Abmayr W., Gais P., Paretzke H.G. et al. (1977). Read-time automatic evaluation of solid state nuclear track detectors with an on-line TV-device. *Nucl. Instrum. Meth.* 147, 79-81.
42. Schott J.U., Schopper E., Staudte R. (1977) A high-precision video-electronic measuring system for use with solid state track detectors. *Nucl. Instrum. Meth.* 147,63-7.
43. Eordogh I., Vero B., Lanyi M., Reti T. (1981). The image analyzer Vidimet-H. *Hungarian Machinery* 31 (2), 39-42.
44. Molnar J., Somogyi G., Szilagyi S., Sepsi K. (1984). Development of a CCD based system called DIGITRACK for automatic track counting and evaluation. *Nucl. Tracks* 8, 243-6.
45. A.Noll et.al., *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 15(1988) 265.
46. G.Baroni et al., *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 22 (1991) 569.
47. M.S.Sartori, *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 22 (1993) 615.
48. S.Aoki et.al., *Nucl. Instr. and Meth. B* 51 (1990) 466.
49. G.Rosa et al., *Nucl. Instr. and Meth. A* 394 (1997) 357-367.
50. K.Kodama et.al. *Nucl. Instr. and Meth. B* 93 (1994) 340-354.
51. A.B.Aleksnadrov, I.Yu.Apacheva, E.L.Feinberg et al, Completely Automated Measurement Facility (PAVICOM) for Track-Detector Data Processing, *Nuclear Instruments&Methods in Physics Research, A*, 535 (2004) 542-545.

52. W.G.Pratt, Digital Image Processing, Wiley, New York, 1991.
53. J.C.Russ, The Image Processing Handbook, CRC Press, Boca Raton, 1995.
54. K.Niwa, K.Hoshino, and K.Niu, Proc.Int. Cosmic Ray Symp. on High Energy Phenomena (Cosmic Ray Lab., Univ. Tokyo, 1974) p.149.
55. S.Aoki et.al., Nucl.track and Radiat.Meas. 12 (1986) 249.
56. S.Aoki, M.Sc.Thesis, Nagoya University (1987) in Japanese.
57. Калинин С.А., Котельников К.А., Мартынов А.Г., Полухина Н.Г., Фейнберг Е.Л. «Полностью автоматизированный комплекс ПАВИКОМ» «Наука-производству», № 12, 2000, стр.29.
58. Егоров О.К., Котельников К.А., Старков Н.И., Полухина Н.Г., Фейнберг Е.Л. «Полностью автоматизированный микроскопный комплекс ПАВИКОМ-1» ПТЭ, 2003, № 6, с.131-132.
59. Егоров О.К., Котельников К.А., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Фейнберг Е.Л. «Полностью автоматизированный микроскопный комплекс ПАВИКОМ-2» ПТЭ, 2003, № 6, с.133-134.
60. 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.
61. Feinberg E.L., Kotelnikov K.A., Polukhina N.G. “Completely Automated Measuring Complex (PAVICOM) for Track-Detector Data Processing” Physics of Particles and Nuclei 2004, v.35, N 3, p.409-423.
62. Goncharova L.A., Dobrotin N.A., Kotelnikov K.A., Loktionova N.A., Martynov A.G., Polukhina N.G., Fil’kov L.V. «Proposal to the Investigation of Nucleus-Nucleus Interactions with the Help of Emulsion Magnetic Chamber» Препринт ФИАН, М., 1991.
63. Chernavskaya O.D., Dobrotin N.A., Feinberg E.L., Fil’kov L.V., Goncharova L.A., Kotelnikov K.A., Martynov N.G., Polukhina N.G. «CERN Experiment EMU-15 on Ultrarelativistic Very High Ion Central Collision» Препринт ФИАН, № 7, М., 1994.
64. Boos E.G., Kvochkina T.N., Loktionova N.A.,Polukhina N.G. 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.
65. А.Б.Александров, дипломная работа МФТИ (рук.Н.Г.Полухина) «Методика исследования взаимодействий ядер атомов свинца с энергией 158

А ГэВ по данным автоматизированной обработки экспериментального материала эмульсионных треков» Москва, 2004 г.

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

67. 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 треков для исследования Pb-Pb взаимодействий при энергии 158 ГэВ/нуклон» Препринт ФИАН № 23, 2005.

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

69. N.M. Astafyeva, I.M.Dremin, K.A. Kotelnikov, Mod. Phys. Lett. A12 (1997) 1185.

70. И.М. Дремин, Письма в ЖЭТФ 30 (1979) 152.

71. Apanasenko A.V., Goryachikh A.A., Zayarnaya I.S.....Polukhina N.G. et.al. «Characteristics of Individual Nuclear Interaction in Superaccelerator Energy Region» 20 International on Cosmic Ray Conference, Moscow, v.5, p.202-205, 1987.

72. Апанасенко А.В., Вальчак М., Горячих А.А.....Полухина Н.Г. и др. «Аэростатные исследования первичных космических лучей и их взаимодействий с веществом при высоких энергиях» Известия АН СССР, сер.физ. т.53, № 2, стр.250-252, 1989.

73. Apanasenko A.V., Walchak M., Goryachikh A.A.Polukhina N.G.et al. “Balloon Investigations of Primary Cosmic Rays and their Interation with Matter at High-Energy” Bull. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser. 53 (1989) No. 2 40-42.

74. Apanasenko A.V., Kotelnikov K.A., Goncharova L.A.....Polukhina N.G. et. al. «Stratospheric Investigations of Primary Cosmic Rays and their Interactions at High Energy» 5-th International Symposium of Very High Energy Cosmic Ray Interactions, Lodz, Poland, p.264-269, 1988.

75. Апанасенко А.В., Гончарова Л.А., Горячих А.А.....Полухина Н.Г. и др. «Аэростатные исследования нуклон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий при энергиях больше 1 ТэВ/нуклон» Сборник «Краткие сообщения по физике», «Исследования на высотных аэростатах», с. 15-19, 1989.

76. Apanasenko A.V., Goncharova L.A., Goryachikh A.A....Polukhina N.G. et al. «Analysis of Hadron-Nucleus and Nucleus-Nucleus Interactions of High

- Multiplicity» 21 International on Cosmic Ray Conference, Australia, v.8, p.112, 1990.
77. Apanasenko A.V., Goncharova L.A., Goryachikh A.A....Polukhina N.G. et al. « On Hadronic Emission Region Size in Very high Energy Nucleon-Nucleus and Nucleus-Nucleus Collisions» Препринт ФИАИ № 62, 1991.
78. Kotelnikov K.A., Polukhina N.G., Gu Yidong, Lu Zhuguo “Scientific Ballooning in the USSR” Indian Journal of Radio&Space Physics, v.20, June&August, p.209-211, 1991.
79. Апанасенко А.В., Гончарова Л.А., Горячих А.А....Полухина Н.Г. и др. «Об области генерации вторичных пионов во взаимодействии адрон-ядро и ядро-ядро с энергией ≥ 25 ТэВ, зарегистрированных с помощью РЭК» Известия АН СССР, сер.физ., 55, 647, 1991.
80. Apanasenko A.V., Goncharova L.A., Goryachikh A.A.....Polukhina N.G. et al. “Regions of Secondary Pion Generation in Hadron Nuclear and Nuclear-Nuclear Interactions of Energy ≥ 25 -TEV” Bull. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser. 55 (1991) No. 4 21-23.
81. Chernavskaya O.D., Dobrotin N.A., Feinberg E.L.....Polukhina N.G. et. al. «Central High Energy Heavy Nuclei Collisions and Ring-Like Effect» XXIV International on Cosmic Ray Conference, Rome, 1995, vol.1, p.68-71.
82. Chernavskaya O.D., Dobrotin N.A., Dremin I.M....Polukhina N.G. et.al. « The Central Pb-Pb Interactions with Enrgies 158 GeV/Nucleon» 28th International Conference on High Energy Physics Warsaw, 1996, v.1, p.941-942.
83. Добротин Н.А., Дремин И.М., Фейнберг Е.Л....Полухина Н.Г. и др. «Исследования центральных Рb-Рb взаимодействий при высоких энергиях» Изв.АН, сер.физ., т.63, N.3, 1999, стр. 485-488.
84. Dobrotin N.A., Dremin I.M., Feinberg E.L.Polukhina N.G. et. al. “Central Pb-Pb Interaction at High-Energies” Bull.Russ.Acad.Sci.Phys.63:393-395,1999.
85. Dremin I.M., Ivanov O.V., Kalinin S.A....Polukhina N.G. et. al. «Wavelet-Patterns in Nucleus-Nucleus Collisions at 158 A GeV» Phys.Lett. B, v. 499 (1-2) (2001), p.97-103.
86. Dremin I.M., Ivanov O.V., Kalinin S.A....Polukhina N.G. et. al. « Wavelet-Patterns in Nucleus-Nucleus Collisions at 158 A GeV» Proc. Of the 4th Rencontres du Vietnam, p.531-533, 2000.
87. Dremin I.M. “Ring-Like Events: Cherenkov gluons or Mach waves?” Nucl.Phys. A (2006); hep-ph/0507167.
88. I.M.Dremin, O.V.Ivanov, V.A.Nechitailo, “Wavelets and their uses”, UFN 171 (2001) 465; Physics-Uspekhi 44 (2001) 447.

89. RUNJOB Collaboration Apanasenko A., Derbina V.A.et.al. Composition and energy spectra of cosmic ray primaries in the energy range 10^{13} - 10^{15} eV/particle observed by Japanese-Russian joint balloon experiment// *Astroparticle Physics* 2001. V.6, N 16, P.13 – 46.
90. (Сотрудничество RUNJOB) Апанасенко А.В., Галкин В.И. и др. :Исследование первичных космических лучей высоких энергий в российско-Японском баллонном эксперименте RUNJOB //Изд. АН, 2001, сер. физ. т.65, №3, с.433 –436.
91. (RUNJOB Collaboration) Kamioka E., Berezhvskaya V.A. et al. First results obtained by RUNJOB campaign // *Advances in Space Research* , 2001. V:26, N11, P. 1839 – 1845.
92. (RUNJOB Collaboration) Publichenko P.A., Derbina V.A. Poluhina N.G. et al. :The development of measurement system for heavy primaries identification with the use of screen type films in RUNJOB experiment// *Proc. of 27th International Cosmic Ray Conference: August 2001 Germany, Hamburg* 2001. V.6, P. 2131 – 2134.
93. Hareyama M. et al. (RUNJOB collaboration) // *Nucl. Instr. Method.* 2003. V. 512. P. 553.
94. Furukawa M. et al. (RUNJOB collaboration) // *Proc. 28th ICRC.* 2003. V. 4 P. 1885.
95. Публиченко П.А., Дербина В.А., Свешникова Л.Г., Полухина Н.Г., Котельников К.А. «Методика автоматического сканирования рентгеновских пленок» Препринт ФИАН № 8, 2003.
96. (RUNJOB Collaboration) Publichenko P.A., Derbina V.A. Poluhina N.G. et al. “Investigation of Heavy Nuclei in Cosmic Rays” *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 66:1798-1801,2002.
97. (RUNJOB коллаборация) Публиченко П.А., Дербина В.А. Полухина Н.Г. и др. «Исследование тяжелых ядер в космических лучах» *Изд. РАН.*66:1627-1630,2002.
98. Азаренкова И.Ю., Егоров О.К., Исламов Т.А.Полухина Н.Г. и др. «Методика исследования электронов внутренней конверсии на полностью автоматизированном микроскопном комплексе ПАВИКОМ» *ПТЭ*, 2004, № 1, с.66-68.
99. Azarenkova I.Yu., Egorov O.K., Islamov T.A.....Polukhina N.G. et al. “Method for Studing Internal-Conversion Electrons on the Fully Automated PAVIKOM Microscope-Based Complex” *Instruments and Experimental Techniques* 2004, v.47, N 1, 58-60.

100. Апачева И.Ю., Егоров О.К., Исламов Т.А....Полухина Н.Г. и др. «Методика исследования электронов внутренней конверсии на полностью автоматизированном микроскопном комплексе ПАВИКОМ» Труды 54 Международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Белгород, 2004, стр.276.
101. Goncharova L.A., Dobrotin N.A., Kotelnikov K.A.....Polukhina N.G. et al. «The Unique Nuclear Interaction of Ultra High Energy Registered by the Stratospheric Emulsion Chamber» 23 International on Cosmic Ray Conference, Calgari, v.4, p.21-24, 1993.
102. Манагадзе А.К., Оседло В.И., Галкин В.И.....Полухина Н.Г., и др. «Компланарный разлет частиц в ядерном взаимодействии при $E > 10^{16}$ эВ, зарегистрированном в стратосфере» Письма в ЭЧАЯ, 2002, № 3 [112] стр.19-24.
103. Managadze A.K., Osedlo V.I., Galkin V.I. ...Polukhina N.G. et. al. “A Coplanar Emission of Particles in Nuclear Interaction for $E(0) > 10^{16}$ EV Detected in the Stratosphere” Part.Nucl.Lett.112:19-24,2002.
104. Galkin V.I., Goncharova L.A., Kopenkin V.V.Polukhina N.G. et. al. “Characteristics of STRANA Stratospheric Superfamily with $E(0) > 10^{16}$ eV” Bull.Russ.Acad.Sci.Phys.66:1697-1699,2002.
105. Галкин В.И., Гончарова Л.А., Копенкин В.В. Полухина Н.Г. и др. «Характеристики стратосферного суперсемейства СТРАНА с $E(0) > 10^{16}$ эВ» Изв.РАН.66:1544-1546,2002.
106. Belaga V. V. et al. Phys.Atom.Nucl.58:1905-1910, 1995.
107. Belaga V. V. et al. Phys.Atom.Nucl.60:791-795, 1997.
108. Kovalenko A.D., Krasnov V.A., Larionova V.G.....Polukhina N.G....et.al.” Nuclear Clustering Quest in Relativistic Multifragmentation” Few-Body Systems Suppl. 14, 241-244 (2003).
109. Adamovich M.I., Bradnova V., Chernyavsky M.M.....Polukhina N.G.et.al. “Investigation of Light Nucleus Clustering in Relativistic Multifragmentation Process” Письма в ЭЧАЯ, 2003, № 2 (117), стр.29-33.
110. Adamovich M.I., Bradnova V., Chernyavsky M.M.Polukhina N.G.et.al. «Investigation of Light Nucleus Clustering in Relativistic Multifragmentation Process» Phys.Atom.Nucl.67:514-517,2004, nucl-ex/0301003.
111. Адамович М.И., Браднова В., Вокал С.Полухина Н.Г. и др. «Исследование кластеризации легких ядер в процессах релятивистской фрагментации» Ядерная физика, 2004, т.67, с. 533-536.

112. Bradnova V., Chernyavsky M.M., Gaitinov A.Sh., Goncharova L.A.Polukhina N.G. et.al. "Studies of Light Nucleus Clustering in Relativistic Multifragmentation Process" Acta Physica Slovaca, 2004, vol.54, N 4, 351-365.
113. Андреева Н.П., Браднова В., Вокал С.Полухина Н.Г. и др. «Топология «белых звезд» в релятивистской фрагментации легких ядер» Препринт ОИЯИ Р1-2004-91.
114. Андреева Н.П., Браднова В., Вокал С.Полухина Н.Г. и др. «Топология «белых звезд» в релятивистской фрагментации легких ядер» Ядерная физика, 68, 484-494, 2005.
115. Тумендэлгэр Ц. и др. «Калориметрия электроядерной мишени для уран-свинцовой сборки при энергии протонов 1.5 ГэВ» Препринт ОИЯИ Р1-99-247. 1999.
116. 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.
117. Котельников К.А., Кузнецов С.А., Гончарова Л.А.....Полухина Н.Г.и др. «Автоматизация измерений и анализа трековой информации об энерговыделении в урановом blankets электроядерной системы» Препринт ФИАН, N 25, Москва, 2001.
118. Баранов Д.Г., Гагарин Ю.Ф., Дергачев В.А., Якубовский Е.А. «Исследование тяжелых ядер космических лучей твердотельными трековыми детекторами на орбитальных станциях» ЖЭТФ. 1999. Т.69. вып.9, с.94-98.
119. Баранов Д.Г., Гагарин Ю.Ф., Дергачев В.А. и др. «Энергетические спектры частиц железа солнечного и галактического происхождения внутри и вне магнитосферы Земли» Изв. АН. сер. физ. 2001. Т.65. № 3. с.327.
120. «Атлас спектров электронов внутренней конверсии нейтронодефицитных радиоактивных нуклидов в области $A=131-172$ » Ташкент, «Узбекистон», 1991.
121. Г.Е.Беловицкий, Л.А.Гончарова, Н.Г.Полухина и др. «Исследование корреляций нейтронов в гало-ядрах в реакциях с передачей двух нейтронов». Препринт ФИАН, № 17, 2003 г.
122. G.Belovitsky, E.Konobeevski, A.Stepanov N.Polukhina «Determination of Charged Particle Trajectories in nuclear Photoemulsion» Proc. of LV National Conference on Nuclear Physics "Frontiers in the Physics of Nucleus", 2005, Saint-Petersburg, p.231.

123. G.Belovitsky, E.Konobeevski, A.Stepanov N.Polukhina «Method of Study of Halo-Nucleus Structure using Neutron Transfer Reaction» Proc. of LV National Conference on Nuclear Physics “Frontiers in the Physics of Nucleus”, 2005, Saint-Petersburg, p.164.
124. G.Belovitsky, E.Konobeevski, A.Stepanov N.Polukhina «Photoemulsion Method of Study of neutron Halo Using Neutron Transfer Reaction» Proc. of 5th Conference Nuclear and Particle Physics, 2005, Cairo, Egypt, 78-80.
125. Aleksandrov A.B., Apacheva I.Yu., Feinberg E.L....Polukhina N.G. et.al. “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.
126. С.Пауэлл, П.Фаулер, Д.Перкинс «Исследование элементарных частиц фотографическим методом», Москва, 1962.
127. Баранов Д.Г., Гагарин Ю.Ф., Н.С.Иванова и др. «Фотометрическое определение заряда ядер в фотоядерной эмульсии» Препринт ФТИ им.А.Ф.Иоффе № 654, Ленинград, 1980.
128. Войковский Б.А., Галактионов А.И., Третьякова М.И., Чудаков А.Е. «Фотометрирование следов заряженных частиц в фотоэмульсии» ПТЭ, 1957, № 6, стр.38-41.
129. Воронков А.Е., Соловьева М.Ф., Третьякова М.И., Сухов Л.В., Чернявский М.М. «Опыт работы на приборе по автоматическому измерению ионизации и импульса на следах релятивистских частиц» ПТЭ, 1964, № 4, стр. 75-77.
130. Александров А.Б., Апачева И.Ю., Гончарова Л.А....Полухина Н.Г. и др. «Методика измерения зарядов релятивистских ядер в фотоэмульсии на автоматизированном комплексе ПАВИКОМ» Препринт ФИАН № 29, 2005.
131. Гинзбург В.Л., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Фейнберг Е.Л., Царев В.А. «Проблемы и перспективы поиска следов тяжелых и сверхтяжелых ядер в оливинах из метеоритов» ДАН, 2005, т.402, № 4, с.1-3.
132. Ginzburg V.L., Polukhina N.G., Feinberg E.L., Starkov N.I., Tsarev V.A. “Problems and Horizons of the Search for Tracks of Heavy and Superheavy Nuclei in Olivine Crystals from Meteorites (OLIMPIYA project)” Doklady Physics, Vol.50, N 6, 2005, 283-285.
133. Ginzburg, V.L., “Physics and Astrophysics, A Selection of Key Problems”, Pergamon, New York, 1985.

134. Александров А. Б., Гончарова Л. А., Давыдов Д. А.... Полухина Н. Г. И др. «Изучение автоматизированных методов обработки визуальной информации с трековых детекторов на базе комплекса ПАВИКОМ студентами физических факультетов» ДАН, 2006, в печати.

VII. ПРИЛОЖЕНИЕ.

Список публикаций по теме диссертации.

1. Apanasenko A.V., Goryachikh A.A., Zayarnaya I.S., Kotelnikov K.A., Lubchenko V.V., Martynov A.G., Shalamova S.Y., Konovalova N.S., Ivanenko V.M., Kvochkina T.N., Olejnichak J., Podgorzak A., Polukhina N.G. "Characteristics of Individual Nuclear Interaction in Superaccelerator Energy Region" 20 International Cosmic Ray Conference, Moscow, v.5, p.202-205, 1987.
2. Apanasenko A.V., Kotelnikov K.A., Goncharova L.A....Polukhina N.G. et al. «Stratospheric Investigations of Primary Cosmic Rays and their Interactions at High Energy» 5-th International Symposium of Very High Energy Cosmic Ray Interactions, Lodz, Poland, p.264-269, 1988.
3. Апанасенко А.В., Вальчак М., Горячих А.А.....Полухина Н.Г. и др. «Аэростатные исследования первичных космических лучей и их взаимодействий с веществом при высоких энергиях» Известия АН СССР, сер.физ. т.53, № 2, стр.250-252, 1989.
4. Apanasenko A.V., Walchak M., Goryachikh A.A.Polukhina N.G.et al. "Balloon Investigations of Primary Cosmic Rays and their Interation with Matter at High-Energy" Bull. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser. 53 (1989) No. 2 40-42.
5. Апанасенко А.В., Гончарова Л.А., Горячих А.А.....Полухина Н.Г. и др. «Аэростатные исследования нуклон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий при энергиях больше 1 ТэВ/нуклон» Сборник «Краткие сообщения по физике», «Исследования на высотных аэростатах», с. 15-19, 1989.
6. Apanasenko A.V., Goncharova L.A., Goryachikh A.A....Polukhina N.G. et al. «Analysis of Hadron-Nucleus and Nucleus-Nucleus Interactions of High Multiplicity» 21 International on Cosmic Ray Conference, Australia, v.8, p.112, 1990.
7. Apanasenko A.V., Goncharova L.A., Goryachikh A.A....Polukhina N.G. et al. «On Hadronic Emission Region Size in Very high Energy Nucleon-Nucleus and Nucleus-Nucleus Collisions» Препринт ФИАН № 62, 1991.
8. Kotelnikov K.A., Polukhina N.G., Gu Yidong, Lu Zhuguo "Scientific Ballooning in the USSR" Indian Journal of Radio&Space Physics, v.20, June&August, p.209-211, 1991.
9. Goncharova L.A., Dobrotin N.A., Kotelnikov K.A., Loktionova N.A., Martynov A.G., Polukhina N.G., Fil'kov L.V. «Proposal to the Investigation of Nucleus-

Nucleus Interactions with the Help of Emulsion Magnetic Chamber» Препринт ФИАН, М., 1991.

10. Апанасенко А.В., Гончарова Л.А., Горячих А.А.....Полухина Н.Г. и др. «Об области генерации вторичных пионов во взаимодействии адрон-ядро и ядро-ядро с энергией ≥ 25 ТэВ, зарегистрированных с помощью РЭК» Известия АН СССР, сер.физ., 55, 647, 1991.

11. Apanasenko A.V., Goncharova L.A., Goryachikh A.A.....Polukhina N.G. et al. "Regions of Secondary Pion Generation in Hadron Nuclear and Nuclear-Nuclear Interactions of Energy ≥ 25 -TEV" Bull. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser. 55 (1991) No. 4 21-23.

12. Goncharova L.A., Dobrotin N.A., Kotelnikov K.A.....Polukhina N.G. et al. «The Unique Nuclear Interaction of Ultra High Energy Registered by the Stratospheric Emulsion Chamber» 23 International on Cosmic Ray Conference, Calgari, v.4, p.21-24, 1993.

13. Chernavskaya O.D., Dobrotin N.A., Feinberg E.L., Fil'kov L.V., Goncharova L.A., Kotelnikov K.A., Martynov N.G., Polukhina N.G. « CERN Experiment EMU-15 on Ultrarelativistic Very High Ion Central Collision» Препринт ФИАН, № 7, М., 1994.

14. Chernavskaya O.D., Dobrotin N.A., Feinberg E.L.....Polukhina N.G. et. al. «Central High Energy Heavy Nuclei Collisions and Ring-Like Effect» XXIV International on Cosmic Ray Conference, Rome, 1995, vol.1, p.68-71.

15. Boos E.G., Kvochkina T.N., Loktionova N.A.,Polukhina N.G. 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.

16. Chernavskaya O.D., Dobrotin N.A., Dremin I.M....Polukhina N.G. et.al. « The Central Pb-Pb Interactions with Engies 158 GeV/Nucleon» 28th International Conference on High Energy Physics Warsaw, 1996, v.1, p.941-942.

17. N.M.Astafyeva, N.A.Dobrotin, I.M.Dremin et al, «Peculiarities of Secondary Particle Generation Process in Pb-Pb Interactions at 158 A Gev», 6th Conference on the Intersections of Particle and Nuclear Physics, 1997, p.269-273.

18. Добротин Н.А., Дремин И.М., Фейнберг Е.Л.....Полухина Н.Г. и др. «Исследования центральных Рb-Рb взаимодействий при высоких энергиях» Изв.АН, сер.физ., т.63, N.3, 1999, стр. 485-488.

19. Dobrotin N.A., Dremin I.M., Feinberg E.L.Polukhina N.G. et. al. "Central Pb-Pb Interaction at High-Energies" Bull.Russ.Acad.Sci.Phys.63:393-395,1999.

20. Калинин С.А., Котельников К.А., Мартынов А.Г., Полухина Н.Г., Фейнберг Е.Л. «Полностью автоматизированный комплекс ПАВИКОМ» «Наука-производству», № 12, 2000, стр.29.
21. Dremin I.M., Ivanov O.V., Kalinin S.A....Polukhina N.G. et. al. «Wavelet-Patterns in Nucleus-Nucleus Collisions at 158 A GeV» Proc. Of the 4th Rencontres du Vietnam, p.531-533, 2000.
22. Dremin I.M., Ivanov O.V., Kalinin S.A....Polukhina N.G. et. al. «Wavelet-Patterns in Nucleus-Nucleus Collisions at 158 A GeV» Phys.Lett. B, v. 499 (1-2) (2001), p.97-103.
23. Котельников К.А., Кузнецов С.А., Гончарова Л.А.....Полухина Н.Г.и др. «Автоматизация измерений и анализа трековой информации об энерговыделении в урановом blankets электроядерной системы» Препринт ФИАН, N 25, Москва, 2001.
24. (RUNJOB Collaboration) Publichenko P.A., Derbina V.A. Poluhina N.G. et al. :The development of measurement system for heavy primaries identification with the use of screen type films in RUNJOB experiment// Proc. of :27th International Cosmic Ray Conference: August 2001 Germany, Hamburg 2001. V.6, P. 2131 – 2134.
25. Манагадзе А.К., Оседло В.И., Галкин В.И.....Полухина Н.Г., и др. «Компланарный разлет частиц в ядерном взаимодействии при $E > 10^{16}$ эВ, зарегистрированном в стратосфере» Письма в ЭЧАЯ, 2002, № 3 [112] стр.19-24.
26. Managadze A.K., Osedlo V.I., Galkin V.I. ...Polukhina N.G. et. al. “A Coplanar Emission of Particles in Nuclear Interaction for $E(0) > 10^{16}$ EV Detected in the Stratosphere” Part.Nucl.Lett.112:19-24,2002.
27. Galkin V.I., Goncharova L.A., Kopenkin V.V.Polukhina N.G. et. al. “Characteristics of STRANA Stratospheric Superfamily with $E(0) > 10^{16}$ eV” Bull.Russ.Acad.Sci.Phys.66:1697-1699,2002.
28. Галкин В.И., Гончарова Л.А., Копенкин В.В. Полухина Н.Г. и др. «Характеристики стратосферного суперсемейства СТРАНА с $E(0) > 10^{16}$ эВ» Изв.РАН.66:1544-1546,2002.
29. (RUNJOB Collaboration) Publichenko P.A., Derbina V.A. Poluhina N.G. et al. “Investigation of Heavy Nuclei in Cosmic Rays” Bull.Russ.Acad.Sci.Phys.66:1798-1801,2002.
30. (RUNJOB коллаборация) Публиченко П.А., Дербина В.А. Полухина Н.Г. и др. «Исследование тяжелых ядер в космических лучах» Изв. РАН.66:1627-1630,2002.

31. Г.Е.Беловицкий, Л.А.Гончарова, Н.Г.Полухина и др. «Исследование корреляций нейтронов в гало-ядрах в реакциях с передачей двух нейтронов». Препринт ФИАН, № 17, 2003 г.
32. Егоров О.К., Котельников К.А., Старков Н.И., Полухина Н.Г., Фейнберг Е.Л. «Полностью автоматизированный микроскопный комплекс ПАВИКОМ-1» ПТЭ, 2003, № 6, с.131-132.
33. Егоров О.К., Котельников К.А., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Фейнберг Е.Л. «Полностью автоматизированный микроскопный комплекс ПАВИКОМ-2» ПТЭ, 2003, № 6, с.133-134.
34. Kovalenko A.D., Krasnov V.A., Polukhina N.G. et. al. “Nuclear Clustering Quest in Relativistic Multifragmentation” Few-Body Systems Suppl. 14, 241-244 (2003).
35. Публиченко П.А., Дербина В.А., Свешникова Л.Г., Полухина Н.Г., Котельников К.А. «Методика автоматического сканирования рентгеновских пленок» Препринт ФИАН № 8, 2003.
36. Adamovich M.I., Bradnova V., Chernyavsky M.M.....Polukhina N.G.et.al. “Investigation of Light Nucleus Clustering in Relativistic Multifragmentation Process” Письма в ЭЧАЯ, 2003, № 2 (117), стр.29-33.
37. Adamovich M.I., Bradnova V., Chernyavsky M.M.Polukhina N.G.et.al. «Investigation of Light Nucleus Clustering in Relativistic Multifragmentation Process» Phys.Atom.Nucl.67:514-517,2004, nucl-ex/0301003.
38. 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.
39. Feinberg E.L., Kotelnikov K.A., Polukhina N.G. “Completely Automated Measurement Complex (PAVICOM) for Track-Detector Data Processing” Physics of Particles and Nuclei 2004, v.35, N 3, p.409-423.
40. Азаренкова И.Ю., Егоров О.К., Исламов Т.А.Полухина Н.Г. и др. «Методика исследования электронов внутренней конверсии на полностью автоматизированном микроскопном комплексе ПАВИКОМ» ПТЭ, 2004, № 1, с.66-68.
41. Адамович М.И., Браднова В., Вокал С.Полухина Н.Г. и др. «Исследование кластеризации легких ядер в процессах релятивистской фрагментации» Ядерная физика, 2004, т.67, с. 533-536.

42. Bradnova V., Chernyavsky M.M., Gaitinov A.Sh., Goncharova L.A.Polukhina N.G. et.al. "Studies of Light Nucleus Clustering in Relativistic Multifragmentation Process" Acta Physica Slovaca, 2004, vol.54, N 4, 351-365.
43. Андреева Н.П., Баднова В., Вокал С.Полухина Н.Г. и др. «Топология «белых звезд» в релятивистской фрагментации легких ядер» Препринт ОИЯИ Р1-2004-91.
44. A.V.Aleksnadrov, I.Yu.Apacheva, E.L.Feinberg et al, Completely Automated Measurement Facility (PAVICOM) for Track-Detector Data Processing, Nuclear Instruments&Methods in Physics Research, A, 535 (2004) 542-545.
45. Azarenkova I.Yu., Egorov O.K., Islamov T.A....Polukhina N.G. et al. "Method for Studing Internal-Conversion Electrons on the Fully Automated PAVIKOM Microscope-Based Complex" Instruments and Experimental Techniques 2004, v.47, N 1, 58-60.
46. Апачева И.Ю., Егоров О.К., Исламов Т.А....Полухина Н.Г. и др. «Методика исследования электронов внутренней конверсии на полностью автоматизированном микроскопном комплексе ПАВИКОМ» Труды 54 Международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Белгород, 2004, стр.276.
47. Aleksandrov A.B., Apacheva I.Yu., Feinberg E.L....Polukhina N.G. et.al. "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.
48. Андреева Н.П., Баднова В., Вокал С.Полухина Н.Г. и др. «Топология «белых звезд» в релятивистской фрагментации легких ядер» Ядерная физика, 68, 484-494, 2005.
49. Гинзбург В.Л., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Фейнберг Е.Л., Царев В.А. «Проблемы и перспективы поиска следов тяжелых и сверхтяжелых ядер в оливинах из метеоритов» ДАН, 2005, т.402, № 4, с.1-3.
50. Ginzburg V.L., Polukhina N.G., Feinberg E.L., Starkov N.I., Tsarev V.A. " Problems and Horizons of the Search for Tracks of Heavy and Superheavy Nuclei in Olivine Crystals from Meteorites (OLIMPIYA project)" Doklady Physics, Vol.50, N 6, 2005, 283-285.
51. 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» Препринт ФИАН № 23, 2005.

52. G.Belovitsky, E.Konobeevski, A.Stepanov N.Polukhina «Determination of Charged Particle Trajectories in nuclear Photoemulsion» Proc. of LV National Conference on Nuclear Physics “Frontiers in the Physics of Nucleus”, 2005, Saint-Petersburg, p.231.
53. G.Belovitsky, E.Konobeevski, A.Stepanov N.Polukhina «Method of Study of Halo-Nucleus Structure using Neutron Transfer Reaction» Proc. of LV National Conference on Nuclear Physics “Frontiers in the Physics of Nucleus”, 2005, Saint-Petersburg, p.164.
54. G.Belovitsky, E.Konobeevski, A.Stepanov N.Polukhina «Photoemulsion Method of Study of neutron Halo Using Neutron Transfer Reaction» Proc. of 5th Conference Nuclear and Particle Physics, 2005, Cairo, Egypt, 78-80.
55. Александров А.Б., Апачева И.Ю., Гончарова Л.А.....Полухина Н.Г. и др. «Методика измерения зарядов релятивистских ядер в фотоэмульсии на автоматизированном комплексе ПАВИКОМ» Препринт ФИАН № 29, 2005.
56. Александров А. Б., Гончарова Л. А., Давыдов Д. А.... Полухина Н. Г. И др. «Изучение автоматизированных методов обработки визуальной информации с трековых детекторов на базе комплекса ПАВИКОМ студентами физических факультетов» ДАН, 2006, в печати.