

УДК 539.1.08

ПОЛНОСТЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС (ПАВИКОМ)
ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛА
ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

*Е. Л. Фейнберг, К. А. Котельников, Н. Г. Полухина**

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

ВВЕДЕНИЕ	763
ОПИСАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИССЛЕДОВАНИЯ, КОТОРЫЕ ПРОВОДЯТСЯ НА УСТА- НОВКЕ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ	766
ПЛАНИРУЕМЫЕ РАБОТЫ НА ПАВИКОМ	768
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	780
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	784
	785

*E-mail: poluhina@sci.lebedev.ru

УДК 539.1.08

**ПОЛНОСТЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС (ПАВИКОМ)
ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛА
ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ**

*Е. Л. Фейнберг, К. А. Котельников, Н. Г. Полухина**

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

Представлено описание установки и методики для полностью автоматизированной обработки материала трековых (эмульсионных и твердотельных) детекторов. Комплекс таких установок (полностью автоматизированный измерительный комплекс — ПАВИКОМ) создан в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН и с 2000 г. успешно используется в ряде разнообразных исследований по ядерной физике высоких и низких энергий, физике космических лучей и др., описанных в обзоре. Дается характеристика технических возможностей и современного статуса ПАВИКОМ.

General description of the Lebedev Physical Institute measurement facility PAVICOM for completely automated track detector (emulsion and solid tracker) data processing is presented as well as the relevant methodical prescriptions. An outlook is given at a number of investigations in low- and high-energy physics, cosmic ray physics, etc., which were effectively carried out at PAVICOM since 2000. Technical horizon and nowadays ability of the setup are reviewed too.

ВВЕДЕНИЕ

Возможность регистрации продуктов радиоактивных распадов в эмульсии была впервые обнаружена А. Беккерелем в 1896 г. После этого открытия потребовалось несколько десятков лет, в течение которых технологические усовершенствования фотоэмульсии придали ей свойства трекового детектора элементарных частиц, сохранившиеся без особых изменений до настоящего времени [1], когда наряду с фотоэмульсиями стали использоваться и твердотельные детекторы.

Одной из наиболее примечательных характеристик ядерной эмульсии является высокая эффективность образования в толще желатина треков заряженных частиц, состоящих из цепочек зерен серебра. Так, например, в эмульсии высокой чувствительности однократно заряженные релятивистские

*E-mail: poluhina@sci.lebedev.ru

частицы создают на 100 мкм следа около 40 зерен серебра [2]. Диаметр таких зерен равен примерно 1 мкм, что определяет чрезвычайно высокое пространственное разрешение эмульсии. Такое высокое пространственное разрешение позволяет при измерении углов заряженных частиц получать результат с *точностью* 10^{-3} и даже 10^{-4} рад (такая точность достигается при измерении следов частиц в трекерах, представляющих собой слоистую среду, в которых зазоры между тонкими пленками ядерной эмульсии составляют несколько миллиметров). Именно эти свойства ядерной эмульсии, а также 4π -геометрия эмульсионных установок использовались во многих ядерно-физических исследованиях [3, 4] и обеспечили такое внушительное долголетие этой методики. Вместе с тем у ядерной эмульсии имеются недостатки. Так, например, ядерная эмульсия пригодна только для интегральных измерений и не может быть использована в *триггерном* режиме. Многочисленные попытки разработать управляемые ядерные эмульсии, несмотря на серьезные усилия, не смогли в полной мере разрешить эту проблему [5]. Был у этой методики еще один очень серьезный недостаток — это тяжелый и утомительный труд при проведении измерений координат треков в эмульсиях, которые выполнялись вплоть до последнего времени визуально на оптических микроскопах с высоким увеличением и с применением иммерсионного масла. Скорость измерений при этом оказывалась невысокой, что определяло *низкую статистику* обработанных событий. Кроме этого, получаемые результаты с трудом поддавались *проверке* на возможные сбои, возникающие в процессе обработки материала (например, потери измерителями следов частиц и другие ошибки).

Эта проблема в значительной мере была решена благодаря прогрессу, который был достигнут в последние годы в производстве прецизионной техники, 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. Все это позволило провести *полную автоматизацию* труда микроскопистов. При измерениях в таком автоматическом режиме оцифрованные изображения следов заряженных частиц и ядер в эмульсии, 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 в ядерных эмульсиях практически полностью исключает использование изнурительного визуального труда микроскопистов и ускоряет процесс обработки материала приблизительно на три порядка по сравнению с его длительностью при использовании так называемых полуавтоматов [6, 7]. Кроме ускорения измерений, новый метод позволяет обрабатывать большие массивы экспериментальных данных и существенно увеличивать статистику событий, что раньше было практически нереально.

Ядерные эмульсии широко используются в целом ряде экспериментов, проводимых физиками Европы, Америки, Азии. Бесспорными лидерами в автоматизации обработки ядерных эмульсий являются японские физики [8, 9], начавшие осуществлять полную автоматизацию в середине 1990-х гг. Это означало настоящую революцию в эмульсионной методике, которой без такой автоматической обработки материала было трудно конкурировать с бурно развивающимися электронными методами исследований. В нескольких университетах Японии в настоящее время работает около полутора десятков полностью автоматизированных микроскопов [10]. Поэтому именно в Японии в 1998 и 2002 гг. проводились международные симпозиумы по технике ядерных эмульсий, в ходе которых обсуждался качественный скачок в развитии методики ядерных эмульсий и прогресс в автоматизации их обработки. Большое внимание в работе этих симпозиумов уделялось вопросам совершенствования измерительных автоматов, в частности увеличению скорости обработки материала, вопросам применения на этих автоматах прецизионной техники промышленного изготовления и апробированных библиотек программного обеспечения.

Автоматизацией измерений в эмульсиях также активно занимаются в ЦЕРН и в других европейских научных центрах, где действуют семь таких автоматов. Широкие измерительные возможности, имеющиеся в этих центрах, позволяют не только успешно проводить обработку материала экспериментов с эмульсионными мишенями больших объемов, таких как эксперимент CHORUS, изучающий взаимодействия нейтрино (масса эмульсионной мишени равна примерно 770 кг [11, 17, 18]), но и разрабатывать новые физические проекты, масса эмульсии в которых может достигать десятков тонн (например, проект нейтринного эксперимента OPERA [12]).

Таким образом, в настоящее время в мире функционируют более двух десятков полностью автоматизированных установок для обработки ядерных эмульсий. В России единственный комплекс из двух установок подобного типа был создан в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН — это высокоэффективный полностью автоматизированный измерительный комплекс (ПАВИКОМ) для обработки данных эмульсионных и твердотельных трековых детекторов, используемых в ядерной физике и физике высоких энергий [13, 14]. ПАВИКОМ позволил существенно ускорить и облегчить обработку экспериментального материала и предопределил разработку проектов новых экспериментов, для проведения которых появилась возможность использовать большие объемы мишеней и большие площади эмульсионных и твердотельных трековых детекторов [15, 16].

Возможности ПАВИКОМ не только удовлетворяют потребности исследований, проводимых в ФИАН, но используются также другими российскими лабораториями и институтами.

1. ОПИСАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

ПАВИКОМ состоит из двух независимых полностью автоматизированных измерительных установок ПАВИКОМ-1 и ПАВИКОМ-2, которые различаются техническими параметрами, прежде всего различными по величине перемещениями оптических столов (см. рис. 1) и, соответственно, допустимыми размерами пленок для обработки. Так, например, при обработке материала эксперимента RUNJOB, в котором облучаемые пленки имели максимальный размер порядка 40 см, необходим был большой стол и использовался ПАВИКОМ-1. Обработка эмульсионных камер ЕМУ-15, имеющих диаметр около 10 см, проводилась на установке ПАВИКОМ-2.

В качестве прецизионной механической системы на установке ПАВИКОМ-1 используется стол немецкой фирмы MICOS, жесткая конструкция которого обеспечивает 0,5-мкм точность измерения координат по всем трем осям X , Y , Z . Максимальные перемещения оптического стола по осям X и Y составляют 400 и 800 мм; перемещения тубуса микроскопа, установленного на линейке Z -координаты стола, — 200 мм. Перемещения оптического стола и линейки Z -координаты осуществляются шаговыми двигателями, управляемыми контроллером, на который поступают команды от компьютера либо от джойстика при ручном управлении.

Поскольку ПАВИКОМ-1 нацелен на проведение измерений в ядерных эмульсиях, рентгеновских пленках и твердотельных трековых детекторах, применяемых в различных экспериментах, оптика установки — объектив микроскопа и конденсор — комплектуется в соответствии с решаемой физической задачей. Так, например, при обработке двухслойных рентгеновских пленок российско-японского эксперимента RUNJOB использовалась оптика



Рис. 1. Фотографии измерительного комплекса ПАВИКОМ: а) руководитель работы академик Е. Л. Фейнберг у автоматической установки ПАВИКОМ-1; б) старший научный сотрудник Н. Г. Полухина около установки ПАВИКОМ-2

с небольшим увеличением $K = 2^x$; при измерениях в ядерной эмульсии увеличение микроскопа составляет $K = 60^x$; числовая апертура объектива $NA = 1,3$, числовая апертура конденсора $A = 0,9$.

Оптика микроскопа проецирует изображение объекта на CCD-матрицу системы VS-СТТ, обеспечивающую ввод оцифрованных высококачественных изображений в компьютер. Эта система имеет следующие характеристики:

- 1024 уровня «градации серого»;
- размер CCD-камеры 1360×1024 пикселей;
- размер каждого пикселя 4,65 мкм.

Для управления установкой ПАВИКОМ-1 и первичной обработки видеоизображений используется отдельный ПК Pentium-3 с соответствующим программным обеспечением.

Для ПАВИКОМ-2 был приобретен стол фирмы «Carl Zeiss», пределы автоматического перемещения которого составляют 100×100 мм; точность измерения координат тоже составляет 0,5 мкм. Этот прецизионный столик был смонтирован на микроскопе МПЭ-11 производства ЛОМО. При измерениях в ядерной эмульсии используется увеличение $K = 60^x$, числовая апертура объектива $NA = 1,25$, числовая апертура конденсора $A = 1,2$. На ПАВИКОМ-2 используется CCD-камера со следующими параметрами:

- 256 уровней «градации серого»;
- размер CCD-матрицы 597×537 ячеек;
- размер ячейки $12,7 \times 8,3$ мкм.

Для управления установкой ПАВИКОМ-2 и первичной обработки видеоизображений используется ПК Pentium-3 и специальные пакеты программ. Еще один ПК Pentium-3 применяется в качестве базового сервера для всего комплекса ПАВИКОМ.

Математическая обработка оцифрованных изображений, введенных в компьютеры, производится при помощи библиотеки программ, написанных на языке C++. При такой обработке проводится поиск и распознавание образов измеряемых объектов, пространственное восстановление следов частиц в треках, определение их координат, определение координат точек взаимодействия и другие операции. При этом специальный пакет программ вырабатывает команды, управляющие движением столов в процессе измерений.

Таким образом, при проведении измерений на ПАВИКОМ обязанности оператора на установке ограничиваются только наблюдением за штатной работой техники, заменой фотоэмульсионных пленок и т. д. Кроме такого качественного изменения труда, автоматы типа ПАВИКОМ, как уже упоминалось, ускоряют процесс обработки первичного экспериментального материала приблизительно на три порядка, что позволяет выполнять обширные по объему измерения за сравнительно короткие промежутки времени. Так, например, при обработке материала фиановского эксперимента EMU-15 в ЦЕРН необходимо измерить в слоях ядерной фотоэмульсии приблизительно 10^7 координат

наг следов заряженных частиц. Такой объем измерений даже на современном полуавтоматическом микроскопе потребовал бы 5–10 человеколет работы, что практически нереально.

2. ИССЛЕДОВАНИЯ, КОТОРЫЕ ПРОВОДЯТСЯ НА УСТАНОВКЕ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

Полностью автоматизированные установки комплекса ПАВИКОМ оказываются достаточно универсальными и могут быть использованы при обработке материала как экспериментов, которые проводятся в настоящее время (EMU-15, RUNJOB, «Спектр», «Платан», «Энергия + трансмутация», «Беккерель», «Ядра»), так и экспериментов, которые находятся в стадии обсуждения, в частности при проведении научно-исследовательской работы «Пленочные астрофизические структуры», финансируемой Росавиакосмосом по программе использования малых спутников типа «Солнечный парус».

Эксперимент EMU-15 (ФИАН) — изучение ядерной материи при сверхвысоких температурах и сверхплотных состояниях. Экспериментальная методика — эмульсионные трекары облучались в ЦЕРН пучками ядер атомов свинца с энергией 32 ТэВ/ядро [19, 20].

Для изучения свойств ядерной материи в экстремальных состояниях — при высоких плотностях и температурах, в частности для поиска признаков возможного проявления кварк-глюонной и/или валонной (валон — краткий термин, используемый нами для обсуждения конститuentных (массивных) кварков) плазмы, объединенной группой теоретиков и экспериментаторов ФИАН в ЦЕРН был проведен эксперимент EMU-15, в ходе которого фотоэмульсионные камеры были облучены пучками ускоренных ядер атомов свинца с энергией 32 ТэВ/ядро.

Эмульсионная камера эксперимента EMU-15 состоит из тонкой (толщиной 300 мкм) свинцовой мишени и 38 слоев ядерной фотоэмульсии (каждый толщиной 50 мкм), политых на основу толщиной 25 мкм. Один слой ядерной эмульсии располагался непосредственно перед свинцовой мишенью, остальные — на определенных расстояниях за мишенью для регистрации следов вторичных заряженных частиц. Габаритные размеры камеры: длина 260 мм, диаметр 95 мм. При облучении ускоренными ядрами атомов свинца камеры помещались в поперечное магнитное поле с величиной $B = 2$ Тл и располагались так, что плоскости свинцовой мишени и ядерных фотоэмульсий были установлены перпендикулярно пучку ядер Рb. При такой конструкции камеры полная толщина ядерной фотоэмульсии в каждой камере составляла всего около 0,07 каскадных единиц (к. е.), т. е. достаточно малую величину, что очень важно при регистрации центральных Рb-Рb-столкновений, в которых генерируются многие сотни вторичных частиц. Поток ядер атомов свинца при

облучении каждой камеры составлял около 10000 частиц. Приблизительно 30 центральных Pb-Pb-взаимодействий было найдено в каждой камере.

Основной методической проблемой этих исследований является необходимость выполнения большого объема измерительных работ в ядерных фотоэмульсиях. Из проведенных оценок этих работ следует, что при обработке около 100 центральных Pb-Pb-столкновений, зарегистрированных камерами, необходимо провести около десятка миллионов измерений координат следов вторичных заряженных частиц, генерированных в ядерных взаимодействиях. Выполнить такой объем измерительных работ практически возможно только с использованием полностью автоматизированного комплекса типа ПАВИКОМ. В настоящее время на ПАВИКОМ проводятся тестовые обработки центральных столкновений ядер атомов свинца, которые позволяют справиться с такими методическими трудностями измерений, как шивки координат различных полей зрения, прослеживание одних и тех же следов в разных слоях ядерной фотоэмульсии камер и ряд других проблем.

На рис. 2 показано поле зрения на фиксированной глубине в эмульсии, на котором видны следы вторичных заряженных частиц одного из центральных взаимодействий ядер атомов свинца. На рис. 2, *а* представлена микрофотография поля зрения (размер кадра 75×75 мкм) со следами в эмульсии вторичных заряженных частиц, полученная при помощи CCD-камеры; на рис. 2, *б* — эта же фотография после компьютерной обработки, при которой были выделены кластеры зерен фотоэмульсии. При дальнейшей обработке по центрам тяжести выделенных кластеров восстанавливаются пространственные положения

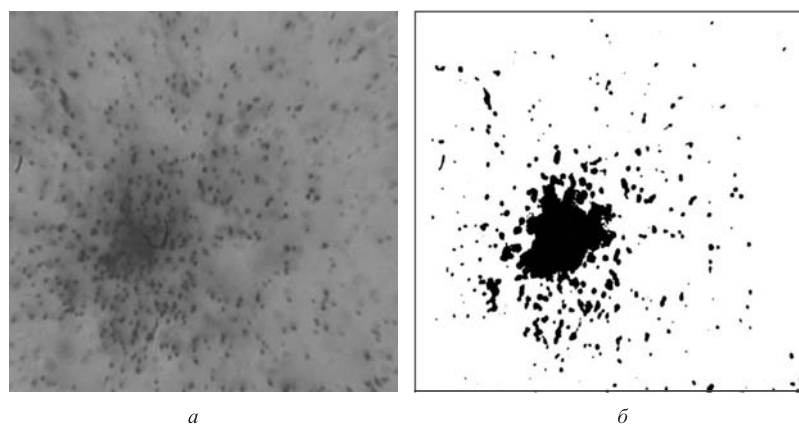


Рис. 2. Микрофотография поля зрения на фиксированной глубине в эмульсии со следами вторичных заряженных частиц одного из центральных взаимодействий ядер атомов свинца с энергией 158 ГэВ/нуклон (критерий отбора центральных взаимодействий — большая множественность и отсутствие тяжелых фрагментов)

треков частиц. Полученные таким образом экспериментальные данные по углам вылета вторичных заряженных частиц позволят исследовать особенности в угловых распределениях частиц, проводить поиск многочастичных корреляций, появления которых можно ожидать при адронизации возбужденной ядерной материи, анализировать эти распределения с целью поиска признаков кварк-глюонной плазмы.

В качестве иллюстрации научной перспективности таких исследований можно привести результаты анализа материала обработки пяти центральных Pb-Pb-столкновений, измеренных в ФИАН на полуавтомате АСНИ «Микрон», на котором по сравнению с ПАВИКОМ был автоматизирован только процесс записи координат. На рис. 3 приведены распределения по величинам псевдобыстрот, рассчитанных для вторичных заряженных частиц этих пяти событий. Для анализа полученного материала был применен [21–23] активно развиваемый в последние годы так называемый метод двумерного вейвлет-разложения [24, 25]. При таком анализе исследуются коэффициенты вейвлет-разложения W_{j_1, k_1, j_2, k_2} двумерного распределения вторичных частиц $f(\theta, \varphi)$ по величинам полярных и азимутальных углов их вылета:

$$W_{j_1, k_1, j_2, k_2} = \int f(\theta, \varphi) \psi(2^{-j_1} \theta - k_1; 2^{-j_2} \varphi - k_2) d\theta d\varphi,$$

где $f(\theta, \varphi) = \sum \delta(\theta - \theta_i) \delta(\varphi - \varphi_i)$; θ_i и φ_i — полярные и азимутальные углы частиц данного события; k_1 и k_2 определяют положения частиц; j_1 и j_2 означают анализируемые шкалы вейвлет-разложения; функция ψ является анализирующим вейвлетом.

Результаты анализа данных этих пяти центральных взаимодействий указывают на существование особенностей в разлете вторичных заряженных частиц. Методы теории распознавания образов, в частности вейвлет-метод (метод локализованного спектрального анализа), использованные при обработке экспериментального материала, подтверждают наличие особенностей в разлете вторичных частиц — струй, кольцевых структур. Струям частиц соответствуют пики в распределении по псевдобыстротам, которые, как показал проведенный анализ, не могут быть обусловлены статистическими флуктуациями.

Чем выше флуктуации плотности частиц в данной области, тем большие значения приобретают соответствующие вейвлет-коэффициенты.

Вейвлет-анализ был применен, в частности, для выявления кольцевых структур, обусловленных коллективными эффектами в разлете вторичных частиц [23–28] и приписываемых черенковскому глюонному излучению [21]. Результаты проведенного таким образом анализа позволили количественно оценить вероятность имитации наблюдаемых кольцевых структур статистическими флуктуациями в разлете вторичных частиц, которая оказалась равной $1,6 \cdot 10^{-3}$.

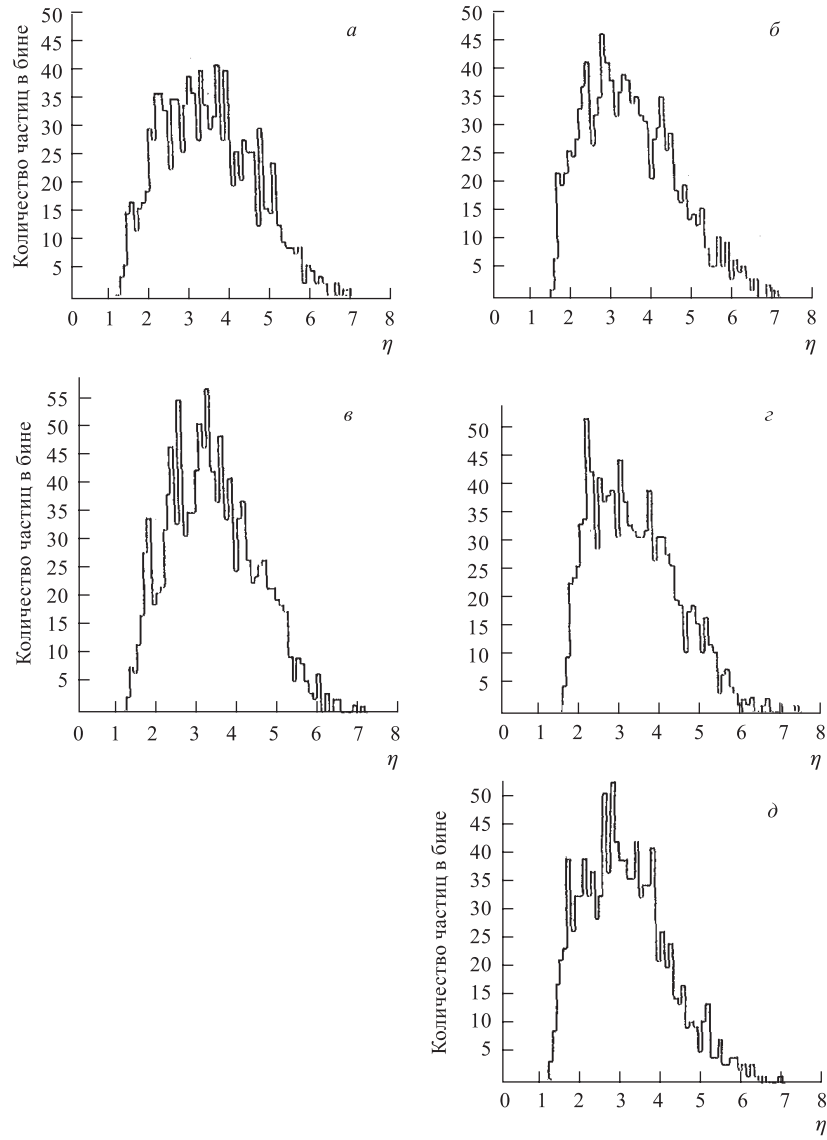


Рис. 3. Распределения по псевдобыстротам вторичных заряженных частиц пяти центральных взаимодействий из банка данных эксперимента EMU-15: а) множественность 1051 частицы, событие № 3; б) множественность 1077 частиц, событие № 4; в) множественность 1221 частицы, событие № 6; г) множественность 1034 частиц, событие № 10; д) множественность 1072 частиц, событие № 19

Эксперимент RUNJOB (НИИЯФ МГУ — ФИАН — 7 университетов Японии) — изучение ядерного состава и энергетического спектра первичного космического излучения прямыми методами при высоких энергиях в рамках российско-японской коллаборации.

Основная цель эксперимента — развить и использовать в обработке данных новый метод выделения тяжелых ядер, основанный на сканировании рентгеновских пленок «экранного типа» (SXF), который позволяет уменьшить порог регистрации тяжелых ядер и дает возможность получить в рамках одного эксперимента энергетический спектр и интенсивность ядер с зарядом меньше 24 в энергетическом диапазоне 0,1–100 ТэВ/частица. Пленки SXF представляют собой наборы из двухслойных рентгеновских пленок, обжаты с обеих сторон тонкими сцинтиллирующими экранами. Когда тяжелое ядро проходит через пленку SXF, в обоих экранах происходят вспышки света, которые регистрируются в рентгеновских слоях эмульсии как двойное пятно, различимое невооруженным глазом. Каждая камера эксперимента, облученная в стратосфере на высоте около 35 км, содержала 10 слоев пленки SXF размером 400 × 500 мм. Количество пятен на рентгеновской пленке после недельной экспозиции в стратосфере составляет около 200 пятен/см². Был разработан пакет программ для автоматического сканирования пленок, распознавания пятен, возникших при прохождении через пленки тяжелых ядер, и записи координат всех пятен в системе координат эмульсионной камеры.

Сканирование одной пленки занимало 11–12 ч непрерывной работы автомата (см. рис. 4). Для каждого пятна измерялись его координаты, размер, величина потемнения в центре и среднее потемнение.

Автоматизация измерений позволила обрабатывать пленки SXF и, соответственно, привела к новому методу регистрации ядер — методу «вершинного триггера». В настоящее время обработан весь материал пленок SXF эксперимента RUNJOB, находящихся в распоряжении российских ученых. Найдено около 20000 треков тяжелых ядер, после определения энергии которых значительно расширится мировая статистика по группе тяжелых ядер.

Измерения проведены многократно при различных параметрах сканирования, определяющих работу алгоритма распознавания следов ядер. Полученные таким образом данные были использованы для восстановления треков от тяжелых ядер, построения угловых распределений, измерения зарядовых диапазонов регистрируемых частиц, что позволило определить зарядовую чувствительность камер, оценить эффективность регистрации частиц, получить целеуказания для поиска следов ядер в эмульсии. Точность целеуказания — 150 мкм на площади 50 × 40 см при эффективности поиска 100%. Поиск ядер происходил в автоматическом режиме. Точка взаимодействия определялась менее чем за 15 с, и объектив автоматически перемещался в нужное место. (В соответствии с ранее существовавшей методикой визуально искали треки в рентгеновской пленке, затем, вручную складывая вместе рентгенов-

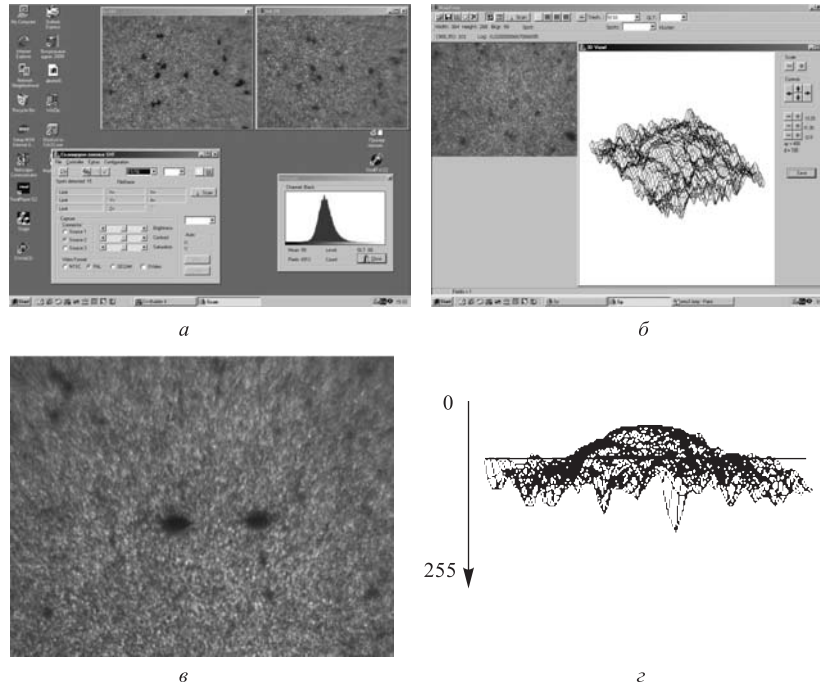


Рис. 4. Обработка SXF-пленок эксперимента RUNJOB: *а)* вид экрана монитора ПК во время автоматической обработки; слева внизу — окно программы управления сканированием; справа внизу — гистограмма распределений почернений для выбранной контрастности изображений; справа сверху — изображение текущего кадра, полученное CCD-камерой; слева сверху — изображение обработанного предыдущего кадра, уже содержащее информацию о каждом найденном пятне — его координаты, размер, величину потемнения в центре и среднее потемнение; *б)* 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 сут); *в)* пятно от ядра, прошедшего через двухстороннюю SXF-пленку, автоматически найденное при сканировании на ПАВИКОМ; *г)* трехмерное изображение пятна на SXF-пленке

скую и ядерную пленки, находили их в ядерной эмульсии. Точность целеуказания при таком методе составляла 1 мм. 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. В настоящее время ведется поиск взаимодействий и разрабатывается методика и программное обеспечение для определения энергии ядер. Методика автоматической обработки и предварительные результаты доложены на нескольких конференциях [29–32].

«Энергия + трансмутация» (ОИЯИ — Национальный университет Монголии, Улан-Батор) — изучение характеристик ядерного реактора, работающего в подпороговом режиме [33, 34].

Изучение распределений нейтронов в бланкете электроядерной системы проекта «Энергия + трансмутация» осуществляется при помощи твердотельных трековых пленочных детекторов, в которых после травления видны треки осколков деления ядер урана. Для обработки таких пленочных детекторов на ПАВИКОМ было разработано математическое обеспечение [35], которое позволило в полностью автоматическом режиме оцифровывать увеличенные оптические изображения следов на пленках, распознавать следы осколков и рассчитывать их концентрацию (см. рис. 5). С использованием этого программного обеспечения на ПАВИКОМ была проведена обработка экспериментального материала двух сеансов работы электроядерной установки на протонном пучке синхрофазотрона ОИЯИ. В результате была показана надежность и эффективность такого метода измерений и анализа данных. В настоящее время продолжают работы по созданию математического обес-

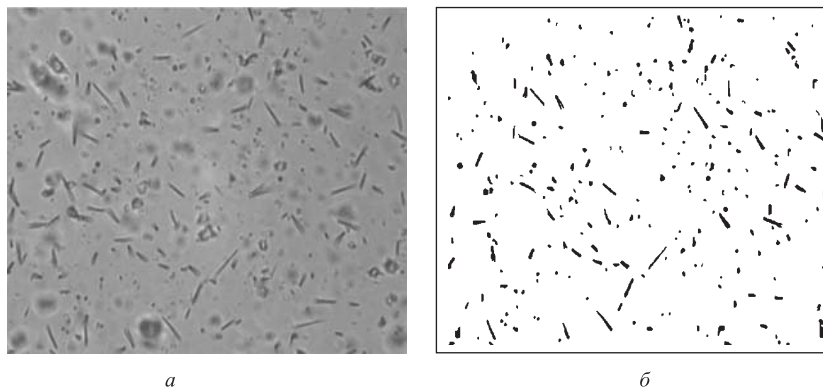


Рис. 5. а) Видеоизображение одного поля зрения размером около 100×100 мкм в твердотельном детекторе эксперимента «Энергия + трансмутация»; видны треки осколков деления ядер урана. б) Результат работы программы, в автоматическом режиме сканирующей пленки, распознающей следы осколков и определяющей их концентрацию

печения для обработки пленок, полученных при высоких значениях интенсивности нейтронов, когда необходимо учитывать эффекты наложения изображений осколков деления.

«Беккерель» (ОИЯИ–ФИАН) — облучение эмульсий вторичными пучками нуклотрона для детального исследования процессов фрагментации легких радиоактивных ядер, а также для получения обзорной информации по зарядовым состояниям вторичных частиц при фрагментации промежуточных и тяжелых ядер [36]. Планируемые результаты должны пролить свет на гипотезу о кластерной структуре легких радиоактивных ядер, а также на возможность коллективных возбуждений ядерной материи, образующейся при столкновении ядер. Благодаря чрезвычайно высокому пространственному разрешению методика ядерных эмульсий может привести к качественно новым результатам в этой области ядерной физики.

Эмульсии будут облучаться вторичными пучками радиоактивных ядер гелия, бериллия, бора, углерода, азота, сформированными на основе первичных пучков стабильных ядер нуклотрона. При получении на нуклотроне пучков тяжелых ядер появится возможность облучить эмульсии также ядрами атомов висмута.

Особый интерес для понимания структуры ядра представляют новые возможности эмульсионной методики в изучении когерентной (дифракционной) диссоциации ядер (когда мишенное ядро эмульсии остается невозбужденным), в частности лития, углерода, кислорода, магния и серы.

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. По этой причине оставшееся невозбужденным ядро оказывает минимальное влияние на фрагментировавшее, лишь незначительно его возбуждая, и 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.

Преимущества использования пучка нуклотрона для исследования фрагментации — это мгновенный характер реакции, достижение режима предельной фрагментации, коллимация продуктов фрагментации в узком конусе, а также минимальные ионизационные потери продуктов реакций. Примером служит когерентная диссоциация ${}^6\text{Li}$: отношение вероятности распадов ${}^4\text{He} - d$, ${}^3\text{He} - t$, ${}^4\text{He} - pn$ и ddd описывается соотношением 23 : 4 : 4 : 0, что определенно указывает на то, что главный член в волновой функции раз-

ложения для ${}^6\text{Li}$ представляет собой прямое произведение двух кластерных волновых функций ${}^4\text{He}$ и d . Энергия связи между этими частями так мала, что эта кластерная структура явно обозначена в продуктах распада (рис. 6) [37].

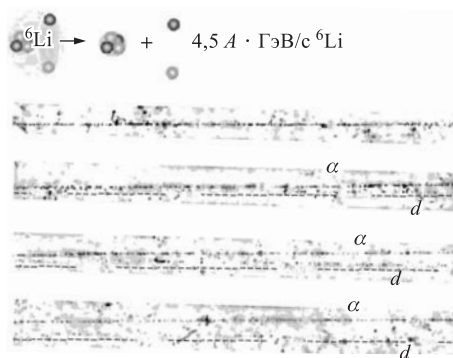


Рис. 6. Пример когерентной диссоциации ${}^6\text{Li}$: главный член в волновой функции разложения для ${}^6\text{Li}$ представляет собой прямое произведение двух кластерных волновых функций ${}^4\text{He}$ и d . Видеоизображение этого распада, разбитое на три строки, получено на ПАВИКОМ

ной центральной частью ядра. В работе будет определено полное сечение неупругих взаимодействий ядер в фотоэмульсии, что позволит оценить радиусы ядер. В фотоэмульсии измеряются полные заряды фрагментов и регистрируются события с перезарядкой первичного ядра. Полученные результаты будут ценными для понимания особенностей структуры таких ядер.

«Платан» (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) — исследование первичных космических лучей солнечного и галактического происхождения методом многослойных твердотельных трековых детекторов [38, 39].

Методика твердотельных трековых детекторов (ТТД) используется Физико-техническим институтом им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург) для изучения потоков ядер первичного космического излучения солнечного и галактического происхождения.

При прохождении заряженной частицы через полимерную пленку за счет 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 . Отно-

Эмульсии обладают особыми преимуществами при исследованиях с нейтронодефицитными ядрами. Исключительный интерес представляет поиск доказательств наличия протонного гало для радиоактивных ядер, играющих важную роль в астрофизических процессах ядерного синтеза, таких как ${}^8\text{B}$. Именно это направление работы представляется наиболее актуальным на ближайшие годы.

В проводимых исследованиях взаимодействий легких радиоактивных ядер с ядрами фотоэмульсии единым методом систематически изучается структура нескольких нейтронодефицитных ядер. Обращено внимание на поиск проявления структуры, подобной протонному гало, и структур с нестабиль-

шение $V_T \cos(90^\circ - \alpha)/V_0 > 1$ 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 движения частицы и приближения к точке остановки S в слое. Видеоизображение треков для останавливающихся в слое частиц и проходящей через слой частицы (два конуса, идущих навстречу друг другу с верхней и нижней поверхностей слоя) в CR-39 приведено на рис. 7. 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 ($Z = 26$).

ТТД являются пороговыми детекторами. В качестве примера порогового ТТД можно привести детектор, изготовленный из лавсана (полиэтилентерефталата) отечественного производства. При режиме травления слоев



Рис. 7. Оцифрованные оптические изображения при увеличении $40\times$ следов ядер первичного космического излучения солнечного и галактического происхождения в твердотельном детекторе CR-39 эксперимента «Платан»

толщиной 180 мкм в шестинормальном растворе КОН при температуре $(40 \pm 0,05)^\circ\text{C}$ в течение 28 ч регистрируются треки ядер железа с энергией около 50 МэВ/нуклон. Порог регистрации у лавсана несколько выше, чем у лексана (поликарбоната), но существенно ниже порогов изготовленных за рубежом полиэтилентерефталатных пленок — кронара и мелинекса.

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 (см. рис. 7), записанные на CD-дисках, переданы в Санкт-Петербург.

«Спектр» (ИГЭФ–ОИЯИ) — экспериментальное исследование спектров электронов внутренней конверсии; метод ядерной спектроскопии, позволяющий получать многообразные сведения о структуре возбужденных состояний атомных ядер [40].

Изучая спектры электронов внутренней конверсии, можно исследовать 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 получить данные о спине и четности ядерных состояний. Зная коэффициент внутренней конверсии, в ряде случаев (при смешанной мультипольности гамма-излучения) можно находить соотношения, существующие 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 позволит выявить мультипольность переходов, интенсивности которых на 3–4 порядка меньше интенсивностей известных переходов.

На ПАВИКОМ сняты спектрограммы (см. рис. 8) с разрешением около 7 эВ для двух типов изотопов — ^{68}Er и ^{65}Tb . Измерения, выполненные на ПАВИКОМ, позволяют определить интенсивности уровней, а также интенсивности 0-0-переходов, недоступные в обычной технике гамма-спектроско-

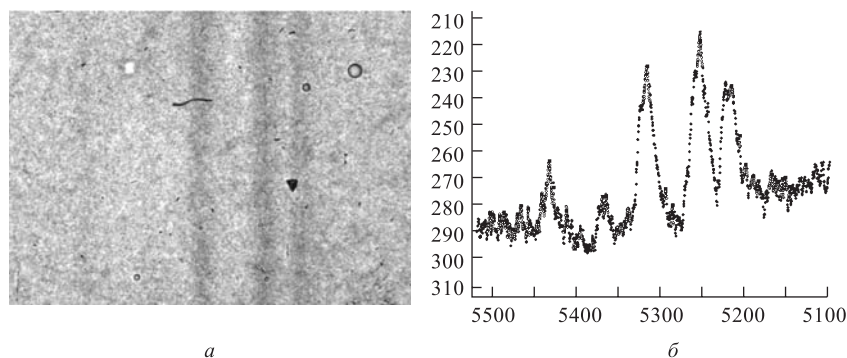


Рис. 8. Один из кадров спектрограммы при исследовании спектров электронов внутренней конверсии изотопов редкоземельных элементов (^{68}Er), полученной на ПАВИКОМ с разрешением около 7 эВ: а) видеоизображение; б) результат математической обработки кадра. При математическом распознавании линий почернения производилось вычитание фона, сложение почернений по вертикали, аппроксимация полученных кривых почернения гауссианом, определялось положение максимального почернения по расчетным кривым и по реальному видеоизображению

пии. Предварительные результаты уже показали, что у некоторых изотопов редкоземельных элементов существуют десятки ранее неизвестных ядерных переходов, и главная цель исследования — выяснить интенсивности таких переходов, энергии и мультипольности.

«Ядра» (ИЯИ РАН) — изучение эмиссии легких заряженных частиц (ЛЗЧ), сопровождающих деление урана протонами, мюонами и пионами [41–43].

При взаимодействии протонов, мюонов или пионов (с энергиями от 153 до 1700 МэВ) с ядрами урана могут испускаться легкие заряженные частицы с $Z = 1, 2$ как следствие одного из процессов: 1) каскадно-испарительного процесса; 2) деления ядра остатка; 3) испарения из сильновозбужденных осколков. Поэтому при изучении испускаемых ЛЗЧ можно получить информацию о процессе деления и свойствах ядер, далеких от бета-стабильности, а также о механизме взаимодействия с тяжелыми ядрами.

Ранее наблюдалась эмиссия ЛЗЧ при спонтанном делении и делении тепловыми нейтронами [44]. В планируемых для обработки на ПАВИКОМ экспериментах ИЯИ РАН изучается эмиссия частиц из осколков, в каскадно-испарительном процессе и при высокой энергии возбуждения компаунд-ядра.

Проведены методические измерения для двух десятков случаев деления урана в толстослойной эмульсии. Идет отладка пакета программ.

3. ПЛАНИРУЕМЫЕ РАБОТЫ НА ПАВИКОМ

Обработка уникальных событий (СТРАНА). Используя широкие измерительные возможности ПАВИКОМ, планируется провести переобработку материала рентген-эмульсионных камер, облученных космическими лучами в аэростатных экспериментах ФИАН в 1970–1980-х гг. В частности, представляет большой интерес уникальное гамма-адронное семейство с полной энергией больше 10^{16} эВ СТРАНА («СТРАТосферное событие имени Николая Алексеевича Добротина», зарегистрированное в 7-суточном полете 1975 г. на высоте около 30 км) [45–47].

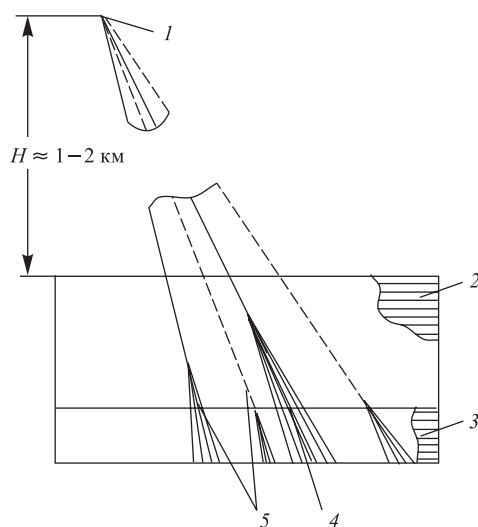


Рис. 9. Схема ядерного взаимодействия с энергией около 10^{16} эВ в рентген-эмульсионной камере ФИАН, экспонированной в полете аэростата 1975 г.: 1 — точка взаимодействия на высоте 1–2 км над эмульсионной камерой; 2 — мишенный блок, включающий 100 слоев ядерной эмульсии и 100 пластин из оргстекла, общая толщина блока $0,3\lambda_{\text{взаимод}}$, или 0,5 к.е.; 3 — гамма-блок, состоящий из 9 свинцовых пластин, 18 рентгеновских пленок, 9 слоев ядерной эмульсии, общая толщина блока 9 к.е.; 4 — прохождение лидирующего каскада (взаимодействие «Люда»); 5 — 108 каскадов с $\Sigma E_{\gamma} \approx 2 \cdot 10^{15}$ эВ

Многослойная рентген-эмульсионная камера, в которой было зарегистрировано это событие, состояла из мишенного и пространственного блоков и калориметра. Мишенный блок включал 100 слоев эмульсии толщиной 50 мкм, прослоенных пластинами из оргстекла толщиной 1,5 мм. В пространственном блоке 10 слоев эмульсии были прослоены оргстеклом толщиной 5 мм. Суммарная толщина мишенного и пространственного блоков эквивалентна 0,5 к.е., или 0,3 пробега ядерного взаимодействия для протона. В калориметре ядерная и рентгеновская эмульсии были прослоены 9 слоями свинца толщиной 0,5 мм. Суммарная толщина калориметра 9 к.е., или 0,26 пробега ядерного взаимодействия (см. рис. 9).

На рис. 10 показана фотография гамма-адронного семейства в калориметре. Семейство состоит из 107 частиц (76 гамма-квантов, 30 адронов, одна лидирующая частица). С учетом всех поправок энергия воздушного семейства составляет $0,9 \cdot 10^{16}$ эВ без учета лидирующей частицы.

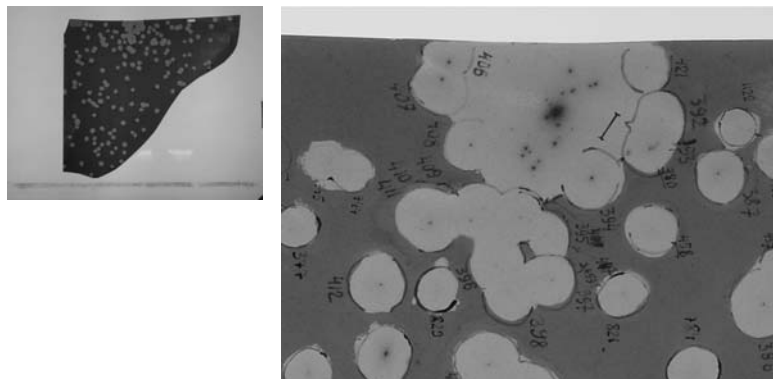


Рис. 10. Часть 7-го слоя рентгеновского блока камеры с семейством СТРАНА; справа — в увеличенном масштабе; отрезок, начерченный фломастером на пленке, равен 1 см

Высокоэнергичная лидирующая частица испытала взаимодействие в 12-м слое мишенного блока, в результате которого возник узкий пучок вторичных частиц, быстро развивающийся в углеродном веществе мишени и образующий большое пятно потемнения в центре семейства на рентгеновских пленках в калориметре (см. рис. 11). По псевдобыстротному распределению вторичных частиц и модельным расчетам была оценена энергия лидирующей частицы, которая оказалась равной 10^{16} эВ.

Таким образом, полная энергия первичной частицы оценивается в $2 \cdot 10^{16}$ эВ.

В настоящее время ведется переобработка этого уникального в мировой экспериментальной статистике семейства СТРАНА, поскольку ограниченные ранее измерительные возможности не позволяли провести достаточно глубокий анализ этого события. По всей вероятности, это событие вообрало в себя одновременно многие черты, присущие широким атмосферным ливням при сверхвысоких энергиях, — и выстроенность при больших передачах импульса вблизи ствола ливня [48] (т. е. среди лидирующих частиц), и кольцевые структуры, которые образуют «медленные» частицы на его периферии. Можно думать, что первая обусловлена достаточно жесткими взаимодействиями отдельных нуклонов (двойная неупругая дифракция?) [49], в то время как вторые несут на себе печать коллективных возбуждений в ядерной материи.

В результате обработки на ПАВИКОМ ядерных эмульсий стратосферной камеры, в которой было зарегистрировано семейство СТРАНА, будут получены достаточно полные данные о развитии каскада лидирующей частицы, об углах разлета каскадов воздушного семейства и других характеристиках события.

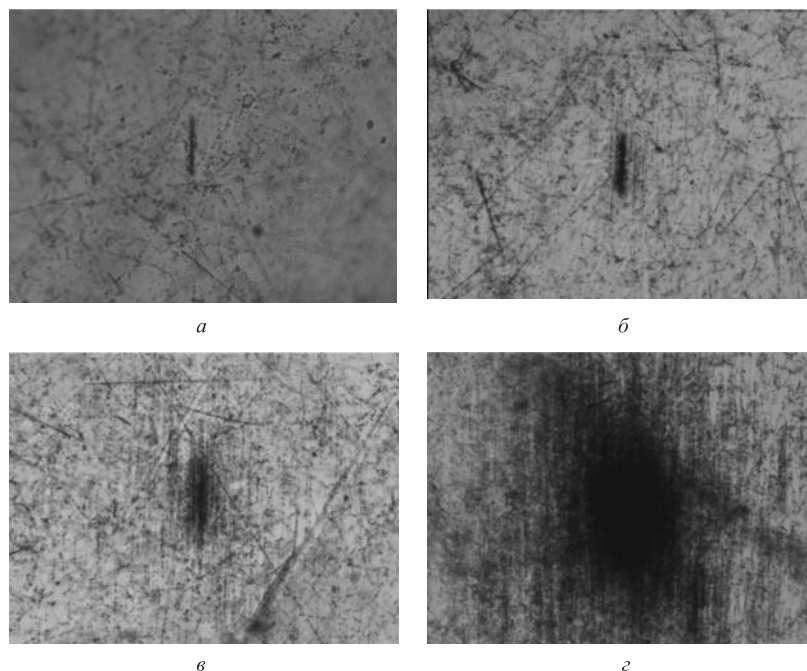


Рис. 11. Развитие каскада от высокоэнергичной лидирующей частицы, которая испытала взаимодействие в 12-м слое мишенного блока: а) 13-й слой ядерной эмульсии в мишенном блоке; б) 30-й слой ядерной эмульсии в мишенном блоке; в) 99-й слой ядерной эмульсии в мишенном блоке; г) 102-й слой ядерной эмульсии в гамма-блоке

Проект «Пленочные астрофизические структуры». В ходе выполнения этого проекта в числе других задач предполагается изучение ядерного состава солнечных космических лучей при помощи многопленочных трековых детекторов.

В настоящее время в России, США и Европе проводятся работы по созданию «солнечного парусного корабля» — космического аппарата, снабженного тонкопленочными «парусами» площадью в несколько гектаров и движущегося под действием давления солнечного света. Эти работы стимулировали развитие технологии производства и развертывания в космосе тонкопленочных конструкций большой площади (пленочные астрофизические структуры — ПАС). Возможности, которые открывают ПАС, могут оказаться чрезвычайно интересными и в других областях науки и техники. Физическим институтом им. П. Н. Лебедева РАН, как участником финансируемой Росавиакосмосом научно-исследовательской работы «ПАС», предложена широкая программа

астрофизических исследований [50], основанная на использовании ПАС, которая включает в том числе эксперименты по измерению величин и вариаций потоков космических ядер.

Интерес к ядерной компоненте космического излучения солнечного происхождения чрезвычайно высок и определяется главным образом возможностью исследовать процессы, протекающие в короне Солнца и в межпланетном пространстве Солнечной системы. Так, например, определение геомагнитного порога для различных ядер этого излучения позволяет определять зарядовые состояния этих ядер и тем самым получать крайне важную информацию о температуре в тех областях короны Солнца, где ускоряются заряженные частицы. Кроме этого, представляется также интересным изучение величин потоков и энергетических спектров ядер и связи этих характеристик со вспышками на Солнце, с ударными волнами и т. д.

Возможности, возникающие при использовании полимерных пленок программы ПАС в качестве твердотельных трековых детекторов ядер, очень привлекательны. Использование только двух-трех слоев детектора предполагает идентификацию в них ядер малых энергий, которые имеют малый пробег и останавливаются в этих слоях (разумеется, в слоях будут регистрироваться и проходящие ядра с большими энергиями). При общей толщине пленок ~ 300 мкм в них останутся ядра железа с энергией от ~ 5 до ~ 14 МэВ/нуклон. При таких же пробегах более тяжелые ядра будут регистрироваться при несколько больших энергиях. Распространенность ядер малых энергий галактических космических лучей крайне низка. Поэтому при измерении потоков таких ядер использование больших площадей детектора имеет существенное значение.

Изучение ядер ГКЛ в области энергий порядка десятков МэВ/нуклон только начинается. Статистические ошибки пока велики и не позволяют сделать надежный вывод о форме энергетического спектра ядер малых энергий (например, ядер железа) и тем более интерпретировать природу происхождения этих ядер: определяется ли найденная в экспериментах плоская форма спектра галактическими ядрами, или она представляет собой сумму двух спектров (аномальной и галактической компонент, соответственно уменьшающейся и возрастающей с увеличением энергии). Данные о сверхтяжелых ядрах с зарядом $Z > 30$, относительная распространенность которых может быть в несколько тысяч раз меньше распространенности ядер железа в этой области энергий, вообще отсутствуют. Большие площади детектора, составляющие сотни квадратных метров, позволят решать вопрос о регистрации таких редких ядер космических лучей. В то же время потоки ионов железа солнечных космических лучей в указанном интервале энергий близки к максимальным значениям в их спектре и, следовательно, могут быть зарегистрированы в достаточно малых вспышках. Для мощных вспышек может быть изучено изменение потока ядер во временных интервалах в случае, если будет исполь-

зоваться ТТД со слоями, которые при экспонировании будут смещаться друг относительно друга с определенной скоростью. Предполагаемое относительное смещение слоев превращает ТТД из интегрального в дифференциальный по времени трековый детектор. Сдвиг слоев позволяет отделять ядра ГКЛ от ядер СКЛ и разделять частицы от отдельных солнечных вспышек.

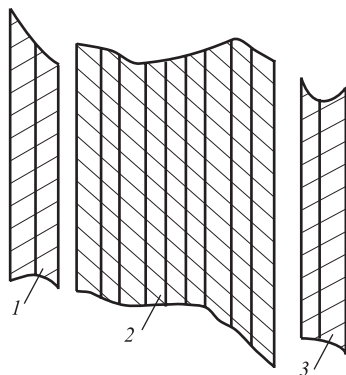


Рис. 12. Схема многопленочной установки проекта ПАС: 1, 3 — наружные слои; 2 — внутренний слой

Экспонирование на малом космическом аппарате многопленочной установки, схематично показанной на рис. 12, с площадью порядка 100 м^2 позволит получить первичные экспериментальные данные по ядрам СКЛ и ГКЛ. Установка состоит из двух наружных и одного внутреннего слоя, причем наружные слои склеены из двух пленок из органического вещества толщиной 20 мкм, внутренний слой — из девяти таких же пленок. Таким образом, для ядер, падающих под углами к поверхности установки, близкими к 90° , пробеги в веществе пленок будут измеряться с точностью, равной приблизительно половине толщины самих пленок, т. е. $\delta R \approx 1 \text{ мг/см}^2$.

Статистика зарегистрированных событий должна быть достаточной для того, чтобы определить геомагнитные пороги для различных ядер, зарядовые состояния ядер, их энергетические спектры и интенсивности. Эти результаты будут представлять интерес для решения как фундаментальных проблем теоретической астрофизики, так и практических задач, в частности для космической метеорологии.

После возвращения на Землю пленки будут протравлены в щелочном растворе и затем поступят на ПАВИКОМ — единственную в России установку, технические возможности которой позволяют проводить обработку трековых твердотельных детекторов столь больших площадей. По специально составленным программам на ПАВИКОМ будут определяться заряды ядер, величины их энергий, геомагнитные широты, на которых ядра были зарегистрированы, углы их падения на установку и т. д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, оказалось, что полностью автоматизированный измерительный комплекс ПАВИКОМ, который изначально создавался для измерений в ядерных эмульсиях эксперимента ЕМУ-15, по скорости и точности измерений, по универсальности и возможностям программного обеспечения

может эффективно использоваться при выполнении больших объемов измерительных работ для широкого круга экспериментов. В настоящее время на ПАВИКОМ проводится обработка данных или подготавливаются измерительные работы для шести российских институтов. Поэтому практически ПАВИКОМ превратился в центр коллективного пользования.

Полная автоматизация процесса измерений оказалась возможной благодаря применению современных достижений прецизионной механики и возможностям средств вычислительной техники и программного математического обеспечения. Создание подобных комплексов означает революционное преобразование экспериментов, использующих трековую технику регистрации частиц.

Создание уникального комплекса для автоматической обработки материала трековых детекторов стало возможным благодаря финансовой поддержке этой работы Российской академией наук. Частично работы по ПАВИКОМ поддержаны грантом РФФИ №03-02-16134 и грантом Миннауки №01-33.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Becquerel H.* // C. R. Acad. Sc. 1896. V. 122. P. 501; 1086.
2. *Мыльцева В. А. и др.* Характеристики ядерных фотоэмульсий различных модификаций на основе эмульсии P-2 // ПТЭ. 2002. № 6. С. 34–37.
3. *Kinoshita S.* The Photographic Action of the α -Particles Emitted from Radio-Active Substances // Proc. Roy. Soc. A. 1910. V. 83. P. 432–453.
4. *Blau M.* // Acad. Wiss. Wien. 1925. V. 134. P. 427.
5. *Cushchin E. M. et al.* Electronically Controlled Detection of Charged Particles in Nuclear Emulsions // Nucl. Instr. Meth. B. 1988. V. 34. P. 269–281.
6. *Дайон М. И. и др.* Система «Микрон» для автоматизации и анализа измерений в ядерной фотоэмульсии. Препринт ФИАН №214. М., 1986.
7. *Алешин Ю. Д., Колесников В. В., Силаев В. И.* // ПТЭ. 1997. № 2. С. 43.
8. *Aoki S. et al.* A Hybrid Experiment to Search for Beauty Particles // Nucl. Instr. Meth. A. 1989. V. 274. P. 64–79.
9. *Kodama K. et al.* Hybrid Emulsion Spectrometer for the Detection of Hadronically Produced Heavy Flavor States // Nucl. Instr. Meth. A. 1990. V. 289. P. 146.
10. *Aoki S.* Historical Review of Automatic Scanning // Proc. of the 2nd Intern. Workshop on Nuclear Emulsion Techniques, 2002 (in print).
11. *Eskut E. et al. (CHORUS Collab.)* // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 401. P. 7.
12. *Kodama K. et al.* The OPERA $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ Oscillation Experiment in the Neutrino Beam // Proc. of the 1st Intern. Workshop on Nuclear Emulsion Techniques, Nagoya, 1998. P. 576.
13. <http://www.lebedev.ru/structure/pavicom/index.htm>
14. *Котельников К. А. и др.* Полностью автоматизированный комплекс ПАВИКОМ // Наука — производству. 2000. № 12. С. 29.

15. Aoki S. The Large Area Emulsion Tracker of the CHORUS Experiment // Preprint CERN-EP-2001-074.
16. Царев В. А. и др. Анализ научных задач астрофизических исследований с большеразмерными пленочными структурами и проработка возможности создания космического аппарата. Отчет в Росавиакосмос по контракту №089-0409/01. 10.10.2001. 78 с.
17. Van de Vyver B., Lemonne J. Determination of the Semi-Leptonic Branching Fraction of Neutrino-Induced Charm Hadrons Using Nuclear Emulsion. Preprint CERN-THESIS-2002-024.
18. Kawamura T. Nuclear Emulsion Techniques in the CHORUS Experiment. Preprint CERN/CM-P/CM-P00041082.
19. Chernavskaya O. D. et al. CERN Experiment EMU-15 on Ultrarelativistic Very Heavy Ion Central Collision. Preprint No. 7 of Lebedev Physical Institute of RAS. M., 1994.
20. Chernavskaya O. D. et al. The Central Pb-Pb Interactions with Energies 158 GeV/nucleon // Proc. of the 28th Intern. Conf. on High Energy Physics, Warsaw, 1996. V. 1. P. 941–942.
21. Dremín I. M. Coherent Hadronic Radiation at Superhigh Energies // JETP Lett. 1979. V. 30. P. 140.
22. Dremín I. M. Coherent Production of Hadrons // Yad. Fiz. 1981. V. 33. P. 1357.
23. Dremín I. M. et al. Wavelet Patterns in Nucleus-Nucleus Collisions at 158 A · GeV // Phys. Lett. B. 2001. V. 499. P. 97–103.
24. Дремин И. М. Дальнедействующие корреляции и вейвлеты // УФН. 2000. Т. 170. С. 1235.
25. Дремин И. М. Вейвлеты и их использование // Там же. Т. 171. С. 465.
26. Astafyeva N. M. et al. Peculiarities of Secondary Particle Generation Process in Pb-Pb Interactions at 158 A · GeV // Proc. of the 6th Conf. on the Intersections of Particle and Nuclear Physics, USA, 1997. P. 269–273.
27. Добротин Н. А. и др. Исследования центральных Pb-Pb-взаимодействий при высоких энергиях // Изв. АН. Сер. физ. 1999. Т. 63, № 3. С. 485–488.
28. Dremín I. M. et al. Wavelet-Patterns in Nucleus-Nucleus Collisions at 158 A · GeV // Proc. of the 4th Rencontres du Vietnam, Vietnam, 2000. P. 531–533.
29. Aranasenko A. et al. (RUNJOB Collab.). 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 // Astropart. Phys. 2001. V. 6, No. 16. P. 13–46.
30. Анапасенко А. В. и др. (сотрудничество RUNJOB). Исследование первичных космических лучей высоких энергий в российско-японском баллонном эксперименте RUNJOB // Изв. АН. Сер. физ. 2001. Т. 65, № 3. С. 433–436.
31. Kamioka E. et al. (RUNJOB Collab.). First Results Obtained by RUNJOB Campaign // Adv. Space Res. 2001. V. 26, No. 11. P. 1839–1845.
32. Publichenko P. A. et al. (RUNJOB Collab.). The Development of Measurement System for Heavy Primaries Identification with the Use of Screen Type Films in RUNJOB Experiment // Proc. of the 27th Intern. Cosmic Ray Conf., Hamburg, Germany, Aug. 2001. V. 6. P. 2131–2134.
33. Тумендэлгэр Ц. и др. Калориметрия электроядерной мишени для уран-свинцовой сборки при энергии протонов 1,5 ГэВ. Препринт ОИЯИ Р1-99-247. Дубна, 1999.
34. Кривоустов М. И. и др. О первом эксперименте по калориметрии уранового бланкета 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. Дубна, 2000.

35. *Котельников К. А. и др.* Автоматизация измерений и анализа трековой информации об энерговыделении в урановом бланкете электроядерной системы. Препринт ФИАН № 25. Москва, 2001.
36. *Adamovich M. I. et al. (BECQUEREL Collab.)*. Investigation of Light Nucleus Clustering in Relativistic Multifragmentation Processes // Письма в ЭЧАЯ. 2003. № 2[117]. С. 29–33.
37. *Adamovich M. I. et al.* // Phys. At. Nucl. 1999. V. 62. P. 1378–1387.
38. *Баранов Д. Г. и др.* Исследование тяжелых ядер космических лучей твердотельными трековыми детекторами на орбитальных станциях // ЖТФ. 1999. Т. 69, вып. 9. С. 94–98.
39. *Баранов Д. Г. 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.
40. *Алешин Ю. Д. и др.* Методика обработки бета-спектрограмм на универсальной установке МАС-1 // ПТЭ. 2001. № 3. С. 72–76.
41. *Беловицкий Г. Е. и др.* Испускание заряженных частиц при поглощении отрицательных мюонов ядрами урана // ЯФ. 1986. Т. 43, вып. 5. С. 1057–1064.
42. *Беловицкий Г. Е. и др.* Эмиссия легких заряженных частиц, сопровождающих деление ядер урана протонами с энергией 153 МэВ // ЯФ. 1995. Т. 58, вып. 12. С. 2131–2139.
43. *Беловицкий Г. Е., Штейнгард О. М.* Эмиссия легких заряженных частиц, сопровождающих деление ядер урана отрицательными пионами с энергией ≥ 1700 МэВ // Изв. АН. Сер. физ. 2000. Т. 64, № 1. С. 68–75.
44. *Nowicki L. et al.* // Nucl. Phys. A. 1982. V. 375. P. 187.
45. *Апанасенко А. В. и др.* Стратосферное суперсемейство с $\Sigma E_\gamma > 2 \cdot 10^{15}$ эВ // Краткие сообщ. по физике. 1977. Т. 10. С. 20.
46. *Apanasenko A. V. et al.* Stratospheric Superfamily with $E_\gamma \approx 10^{16}$ eV: Experimental Data, Analysis and Interpretation // Proc. of the 17th ICRC, Paris, 1981. V. 5. P. 319.
47. *Goncharova L. A. et al.* The Unique Nuclear Interaction of Ultra High Energy Registered by the Stratospheric Emulsion Chamber // Proc. of the XXIII ICRC, Calgary, 1993. V. 4. P. 21–24.
48. *Манагадзе А. К. и др.* Компланарный разлет в ядерном взаимодействии при $E_0 > 10^{16}$ эВ, зарегистрированном в стратосфере // Письма в ЭЧАЯ. 2002. № 3[110]. С. 19.
49. *Royzen I. I.* Theoretical Approach to Alignment Phenomenon // Mod. Phys. Lett. A. 1994. V. 9, No. 38. P. 3517–3522.
50. *Tsarev V. A. et al.* Detection of Ultra-High Energy Cosmic Rays with «Solar-Sail» Type Detector // Proc. of the 10th Lomonosov Conf. on Elementary Particle Physics (in print);
Котельников К. А. и др. О возможности регистрации космических лучей ультравысоких энергий радиометодом со спутников и аэростатов // Изв. РАН. Сер. физ. 2002. Т. 66, № 11. С. 1638–1640.