

## АДАПТАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ ПАВИКОМ-1 ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЯДЕРНЫХ ЭМУЛЬСИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА SND@LHC

М. М. Чернявский, Н. С. Коновалова, Н. М. Окальева, Н. Г. Полухина,  
Ж. Т. Садыков, Т. В. Щедрина, Н. И. Старков, Е. Н. Старкова

*Сканирующая установка ПАВИКОМ-1 является одним из автоматизированных микроскопов оптического измерительного комплекса ПАВИКОМ, созданного в ФИАН для высокотехнологичной обработки экспериментов в области ядерной физики, физики космических лучей и физики высоких энергий, использующих твердотельные трековые детекторы. Представлена очередная модернизация установки ПАВИКОМ-1, позволяющая осуществлять сканирование фотографических ядерных эмульсий ускорительного эксперимента SND@LHC.*

**Ключевые слова:** фотографическая ядерная эмульсия, автоматизированная обработка, трековая методика.

*Введение.* Среди всех регистрирующих устройств, используемых в физике элементарных частиц, ядерно-эмульсионные детекторы обладают самым высоким пространственным разрешением. Новый этап развития эмульсионной технологии связан с достижениями в области цифрового считывания с помощью высокоскоростного автоматического сканирования и разработкой эмульсий нового поколения, которые успешно применяются в экспериментах на ускорителях для восстановления топологии событий и обнаружения элементарных частиц, в частности, при изучении процессов с участием нейтрино. Характеристики современных ядерных эмульсий и основные области их применения представлены в [1].

Для обработки экспериментов с использованием эмульсионных камер в настоящее время применяется метод сетевого сканирования, использующий параллельную обра-

ботку данных на основе быстрой электроники и приборов с зарядовой связью (CCD-камер) для регистрации и оцифровывания оптических изображений (см., напр., [2–4]). При измерениях в автоматическом режиме оцифрованные изображения следов заряженных частиц, полученные при помощи CCD-камеры, вводятся в компьютер, математическое обеспечение которого позволяет производить поиск, распознавание и анализ треков, восстанавливать их пространственное положение, реконструировать вершины взаимодействий и распадов, и т. д. Метод позволяет также определять импульс частицы по многократному кулоновскому рассеянию и идентифицировать электроны с помощью образовавшихся электронных каскадов.

Современная измерительная аппаратура позволяет сканировать двухсторонние эмульсионные пленки со скоростью до  $100 \text{ см}^2/\text{час}$ , что, учитывая микронные размеры треков, обеспечивает возможность обработки больших объёмов данных в режиме реального времени. Это имеет принципиальное значение для крупных экспериментов с большим объёмом эмульсионных данных, как в случае экспозиции эмульсионных модулей на ускорительных пучках.

Модернизация установки ПАВИКОМ-1 была осуществлена с целью её адаптации для обработки данных эксперимента SND@LHC, который проводится в ЦЕРН при активном участии авторов. SND@LHC [5] – это компактный автономный эксперимент для изучения высокоэнергичных нейтрино с псевдобыстротами  $7.2 < \eta < 8.4$ , образовавшихся на Большом адронном коллайдере, что позволяет исследовать физику рождения тяжелых ароматов в передней области. Детектор представляет собой гибридную систему, включающую 830-килограммовую мишень из вольфрамовых пластин, чередующихся с эмульсионными и электронными трекерами (которая является также электромагнитным калориметром), адронный калориметр и систему идентификации мюонов. Обработка части облучённых эмульсий осуществляется в ФИАН.

Необходимо отметить, что стандартных разработок для создания оборудования и построения алгоритмов обработки изображений в ядерных эмульсиях не существует. С учётом особенностей эксперимента, на основе оригинальных решений, разработанных в лабораториях – участниках эксперимента, проводится непрерывная модернизация оборудования, совершенствуются программы обработки и анализа данных.

В статье представлены результаты работ по адаптации сканирующего микроскопа ПАВИКОМ-1 к обработке эмульсионных данных эксперимента SND@LHC.

*Автоматизированный измерительный комплекс ПАВИКОМ.* В ФИАН обработка экспериментальных данных на уровне, соответствующем лучшему современному стан-

дартам, осуществляется на автоматизированном сканирующем комплексе ПАВИКОМ (Полностью Автоматизированный Измерительный КОМПлекс), позволяющем обрабатывать данные всех используемых в современной экспериментальной физике твердотельных трековых детекторов, содержащих визуальную информацию о характеристиках частиц и их взаимодействиях, включая ядерные эмульсии, пластиковые детекторы, фосфатные стекла, кристаллы оливинов из метеоритов и т. д. На установках комплекса ПАВИКОМ осуществляется поиск и оцифровка треков заряженных частиц в материале детектора, их отслеживание, систематизация и первичная обработка данных.

Основными компонентами установок комплекса ПАВИКОМ являются автоматизированные оптические микроскопы, оборудованные высокоскоростными видеокамерами, платами для оцифровки видеоизображения, прецизионными механическими столами, графическими станциями и современными компьютерами с высокими вычислительными возможностями. Объектив микроскопа формирует на светочувствительной матрице видеокамеры изображение трека последовательно по всей толщине образца. Полученный сигнал передаётся на вход платы для оцифровки и захвата изображения; плата пересылает эти данные в память компьютера и выводит оцифрованный видеосигнал в реальном времени на монитор.

Пакет программного обеспечения ПАВИКОМ включает широкоугольную систему сканирования LASSO [6], являющуюся продуктом исследовательских и конструкторских работ участников эксперимента, ориентированных на повышение скорости процесса сканирования, расширение углового допуска при идентификации треков и высокую результативность при восстановлении треков. Данная система реализована на базе аппаратного обеспечения European Scanning System (ESS) и обладает необходимой степенью адаптивности для интеграции с оборудованием новых поколений.

Архитектура программного обеспечения LASSO, представленная модульным принципом организации, показана на рис. 1 [7]. Каждый модуль в рамках данной архитектуры реализует определенную функциональность и предоставляет удобные интерфейсы для её использования. Модули, отвечающие за захват изображений и управление положением объектива, обеспечивают соответствующие функции. Модуль графического пользовательского интерфейса (GUI) предоставляет собой удобный графический интерфейс, позволяющий пользователю вручную изменять параметры системы сканирования и управлять самим процессом сканирования. Направляющий модуль координирует работу как предметного стола, так и камеры в процессе сканирования, вычисляет координаты изображения и передает их в модуль обработки изображений. Последний

осуществляет реконструкцию кластеров (наборов смежных пикселей), передавая их в модуль отслеживания для последующей реконструкции зерен (вертикальных цепочек кластеров) и микротреков (последовательностей зерен). Модуль Guide представляет собой интерфейс обратной связи, позволяющий управлять процессом сканирования путем изменения его параметров без прерываний, а также внешний интерфейс управления, который может быть использован другими приложениями для управления процессом сканирования.

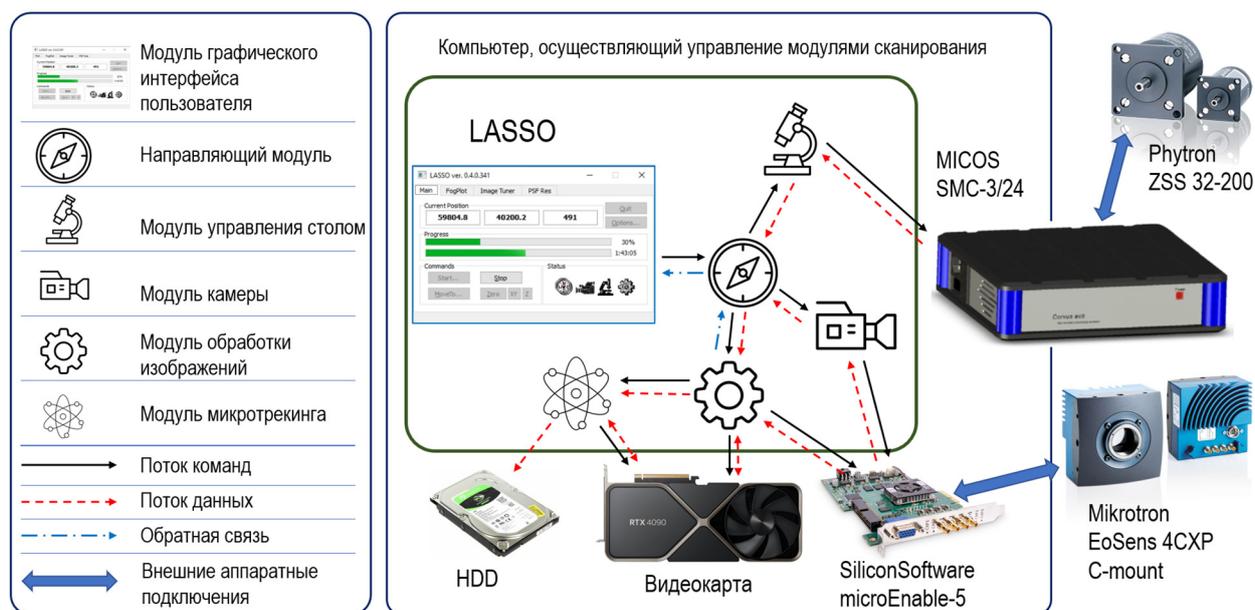


Рис. 1: Схема структуры LASSO в комплексе ПАВИКОМ-1 [7].

*Установка ПАВИКОМ-1 и меры по её модернизации.* На самой крупной установке комплекса, ПАВИКОМ-1 [8], установлен большой прецизионный стол фирмы MICOS с оптической системой, комплектуемой в соответствии с поставленной экспериментальной задачей. Он включает массивную платформу и подвижный предметный столик размером  $500 \times 800$  мм<sup>2</sup> (рис. 2). Над столом закреплен оптический блок, оснащенный видеокамерой, с возможностью перемещения в вертикальной плоскости. Точность перемещения предметного стола составляет 0.5 мкм. Виброустойчивость стола достигается большой массой установки ( $\sim 1$  т). Для уменьшения теплового расширения кронштейн для крепления микроскопа выполнен из гранита. Управление предметным столом осуществляется как с компьютера, так и в ручном режиме с помощью джойстика.

Видеокамера Mikrotron EoSens 4CXP C-mount представляет собой устройство на основе монохромной CMOS-цифровой матрицы с разрешением  $2336 \times 1728$  пикселей



Рис. 2: Автоматизированная оптическая установка ПАВИКОМ-1.

и максимальной частотой 563 кадра в секунду. В оптической системе установлен объектив Nikon CFI Plan Fluor 20X MI, имеющий числовую апертуру 0.75 и дающий 20-кратное увеличение. Аналоговый сигнал с видеокамеры передается по специальному дата-кабелю CXR 5W5 на вход платы захвата изображений SiliconSoftware microEnable-5, технические характеристики которой совместимы с параметрами камеры и графической станции. Данная комплектация разработана в сотрудничестве Лаборатории элементарных частиц ФИАН и Неапольской Лабораторией INFN (Италия) с учетом основных компонентов системы, что позволяет использовать уже существующие алгоритмы и параметры обработки изображений, реализованные для предыдущей комплектации системы.

В ходе очередной модернизации автоматизированного микроскопа ПАВИКОМ-1 были выполнены, в частности, следующие работы:

1) Смонтированы (но не припаяны) концевые выключатели – детали для ограничения движения на вертикальный двигатель, приобретенные в Неаполе. В настоящее время используются оригинальные выключатели микроскопа MICOS. По результатам тестовых сканирований может быть принято решение о замене их на итальянские, если точность движения окажется недостаточно высокой.

2) Изготовлена и введена в действие новая система освещения по Келеру, аналогичная системам, применяемым на двух других установках комплекса. Необходимость получения равномерно освещенного поля зрения и освещение его максимально широким пучком света достигается в современной микроскопии именно путем организации освещения по Келеру.

3) Интегрирована система управления столом MICOS в модуль Stage программы LASSO.

4) Отсканированы первые эмульсии эксперимента SND@LHC, получены результаты по микротрекам (МТ). Распознавание полной картины взаимодействий частиц в детекторе требует восстановления так называемых базовых (состоящих из двух микротреков) и объёмных (проходящих через весь детектор) треков. При облучении эмульсий на ускорителе плотность треков очень высока, обработать и проанализировать все треки можно только на огромных вычислительных мощностях ЦЕРН. Поэтому задачей сканирующих лабораторий, входящих в сотрудничество, является подготовка базы данных по микротрекам для их окончательной обработки в ЦЕРН.

После установки ограничителя (концевого выключателя) на вертикальный двигатель для защиты предметного стекла и объектива микроскопа от механических повреждений, а также улучшенной системы освещения были проведены первичные сканирования ядерной эмульсии эксперимента SND@LHC. В данной работе представлены результаты сканирования эмульсий одного из первых тестовых сеансов, RUN 1, при полной загрузке нейтринного детектора во время сеанса облучения, интегральная светимость которого составила  $0.5 \text{ фб}^{-1}$  [9]. Эмульсионная пластина нейтринного детектора SND@LHC эксперимента имеет размеры  $192 \times 192 \text{ мм}^2$ , именно увеличение размеров эмульсионных пластин потребовало модернизировать оборудование. Данная модернизация позволит в будущем обрабатывать и данные других экспериментов, использующих ядерную эмульсию подобных размеров как трековый детектор. На рис. 3 показаны распределения реконструированных онлайн в процессе сканирования микротреков для верхнего и нижнего эмульсионного слоя, соответственно, цветовая шкала отображает количество восстановленных МТ.

Область распределений МТ в плоскости XY на рис. 3 имеет размер  $182 \times 182 \text{ мм}^2$ , меньший номинального размера эмульсионного слоя, что объясняется необходимым при сканировании техническим отступом от края эмульсии. Экспериментальные результаты демонстрируют равномерность распределений МТ в объеме эмульсионного слоя как для верхнего, так и нижнего, на всей площади эмульсионной плёнки.

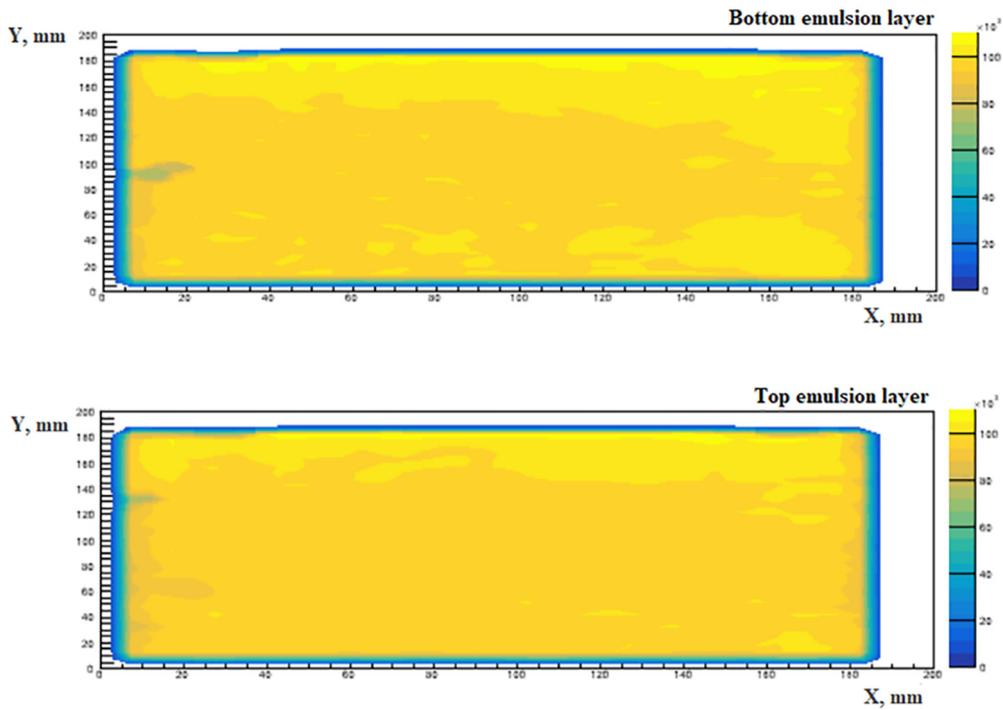


Рис. 3: Распределение микротроек для верхнего и нижнего слоев ядерной эмульсии.

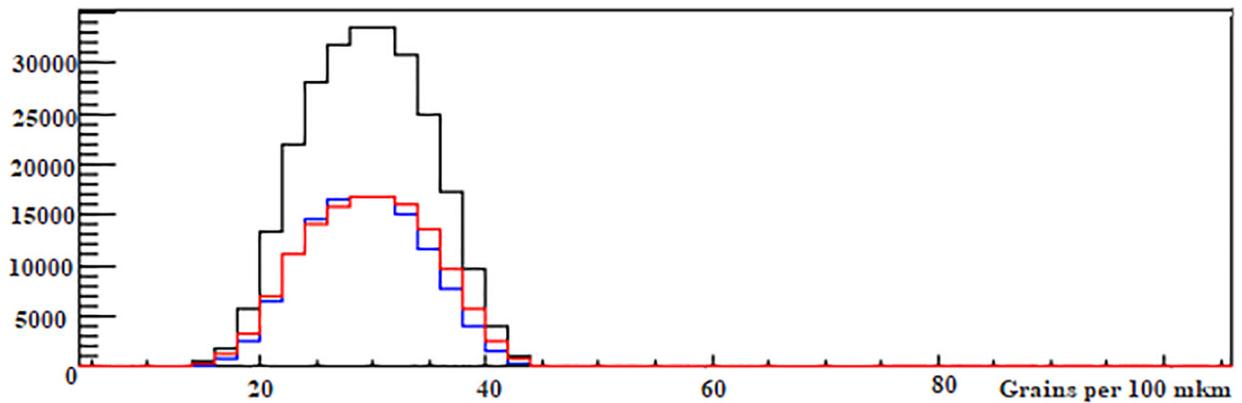


Рис. 4: Чувствительность эмульсионного слоя: синяя линия – нижний эмульсионный слой, красная линия – верхний эмульсионный слой, черная – их суммарное распределение.

Другой важной характеристикой ядерной эмульсии, которую необходимо контролировать при сканировании, является чувствительность, т. е. число проявленных зерен серебра на 100 мкм трека однозарядной частицы. На рис. 4 даны распределения по

числу проявленных зерен в верхнем и нижнем эмульсионном слое, а также суммарное распределение по двум слоям.

Результаты на рис. 4 демонстрируют высокую чувствительность эмульсии, а именно: более 30 зерен на 100 мкм трека и её равномерность как для верхнего (красный цвет), так и для нижнего (синий цвет) эмульсионного слоя.

Экспериментальные результаты, полученные с помощью сканирующей станции ПАВИКОМ-1, представленные на рис. 3 и 4, демонстрируют успешность выполненной модернизации, а именно: адекватное измерение характеристик произведенной с высоким качеством эмульсии, корректную настройку сложной оптической системы и возможность в полном объеме выполнять сканирование эмульсий эксперимента SND@LHC для создания базы данных по микротрекам.

*Заключение.* Высокотехнологичный автоматизированный комплекс ПАВИКОМ, созданный в Физическом институте имени П. Н. Лебедева, позволяет анализировать экспериментальные данные, полученные с помощью детекторов на основе фотографической ядерной эмульсии. Статья описывает очередной этап модернизации установки ПАВИКОМ-1, включающий интеграцию программного пакета прецизионного стола MICOS в программный модуль Stage комплекса LASSO и установку улучшенной системы освещения. В России получены первые результаты сканирования эмульсионных пластин эксперимента SND@LHC.

Работа поддержана Российским научным фондом по программе “Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами” (проект № 23-12-00054).

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. Ariga, T. Ariga, G. De Lellis, et al., Nuclear Emulsions. In: Particle Physics Reference Library, (Springer, Cham, 2020), v. 2, p. 383. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35318-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35318-6_9).
- [2] M. De Serio, M. Ieva, M. T. Muciaccia, et al., Nucl. Instrum. Meth. A **554**, 247 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.08.017>.
- [3] A. Alexandrov, A. Buonauro, L. Consiglio, et al., JINST **11**, P06002 (2016). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/06/P06002>.
- [4] L. Arrabito, E. Barbuto, C. Bozza, et al., Nucl. Instrum. Meth. A **568**, 578 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.06.072>

- [5] G. Acampora, C. Ahdida, R. Albanese, et al., JINST **19**, P05067 (2024).  
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/05/P05067>.
- [6] A. Alexandrov, M. Vladymyrov, V. Tioukov, LASSO – Large Angle Scanning System for OPERA, Zenodo (2020). <https://doi.org/10.5281/zenodo.4385773>.
- [7] V. T. Vasilev, N. S. Konovalova, N. M. Okatieva, et al., Phys. Atom. Nucl. **86**, 2251 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1063778823090272>.
- [8] A. Alexandrov, N. Konovalova, N. Okateva, et al., Measurement **187**, 110244 (2022).  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110244>.
- [9] N. Polukhina, N. Konovalova, T. Shchedrina, Physics **5**, 499 (2023).  
<https://doi.org/10.3390/physics5020035>.

Поступила в редакцию 17 июля 2024 г.

После доработки 31 июля 2024 г.

Принята к публикации 2 августа 2024 г.