

## ОПЫТНОЕ ОБЛУЧЕНИЕ НА НУКЛОТРОНЕ ОИЯИ ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ ЯДРАМИ КСЕНОНА

*В. Браднова<sup>а</sup>, Д. А. Артеменков<sup>а</sup>, Л. А. Гончарова<sup>б</sup>,  
Е. Д. Донец<sup>а</sup>, Е. Е. Донец<sup>а</sup>, П. И. Зарубин<sup>а</sup>, И. Г. Зарубина<sup>а</sup>,  
А. Д. Коваленко<sup>а</sup>, Н. В. Кондратьева<sup>а</sup>, Н. К. Корнегруца<sup>а</sup>,  
А. И. Малахов<sup>а</sup>, П. А. Рукояткин<sup>а</sup>, В. В. Русакова<sup>а</sup>, Н. Г. Полухина<sup>б</sup>,  
А. С. Русецкий<sup>б</sup>, Н. И. Старков<sup>б</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

Ядерная эмульсия облучена ядрами ксенона, ускоренными на нуклотроне ОИЯИ. На облученной эмульсионной пленке выполнено визуальное и автоматизированное сканирование профиля выведенного пучка.

Nuclear track emulsion is exposed to Xe nuclei accelerated by the JINR Nuclotron. Visual and automated scanning of the extracted beam profile is performed in the exposed emulsion film.

PACS: 21.45.+v; 23.60.+e; 25.10.+s

В сеансе работы нуклотрона в марте 2010 г. ионы ксенона  $^{124}\text{Xe}^{42+}$ , полученные на источнике КРИОН, были ускорены до энергии около 1 АГэВ, что соответствует напряженности магнитного поля в кольце ускорителя 7,9 кГс. Ускоренные ядра выводились из нуклотрона через фольгу фланца, что позволило выводить ионы  $\text{Xe}^{53+}$  с полной обдиркой электронов. Для диагностики ускоренного пучка в фокусе Ф3 канала выведенного пучка облучены как пленки ядерной эмульсии МР толщиной 20 мкм (производство НИКФИ), размещенные перпендикулярно к направлению пучка, так и «толстые» слои ядерной эмульсии толщиной около 450 мкм, ориентированные вдоль пучка. Основная цель этой методической работы — продемонстрировать факт успешного ускорения ядер  $^{124}\text{Xe}$ . На материале облучений ядрами с высокой ионизирующей способностью оказалось возможным оценить некоторые аспекты цифровой обработки, которые будут представлены ниже. Макрофотографии прохождения и взаимодействия ядер Хе в эмульсии, полученные с помощью фотокамеры NIKON D70 на микроскопе МБИ-9, находятся на сайте сотрудничества БЕККЕРЕЛЬ [1].

На поверхностях продольно облученных слоев эмульсии достаточно отчетливо проявляются «гребни» следов сильноионизирующих частиц с глубиной проникновения в слой около 4 см. При микроскопическом прослеживании по следам были найдены несколько взаимодействий с высокой множественностью. Один из примеров приведен на

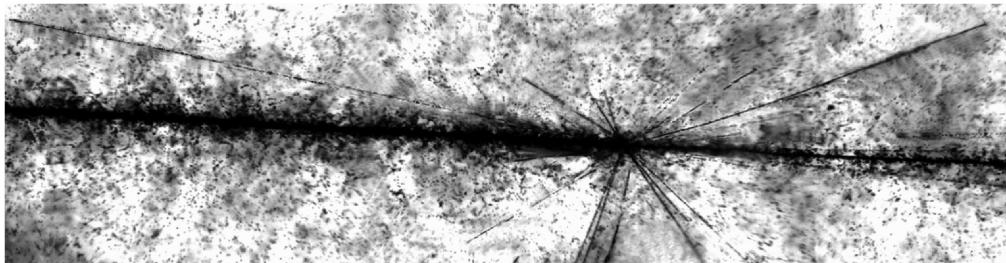


Рис. 1. Макрофотография при 60-кратном увеличении взаимодействия ядра Хе в эмульсии с образованием высокозарядного фрагмента

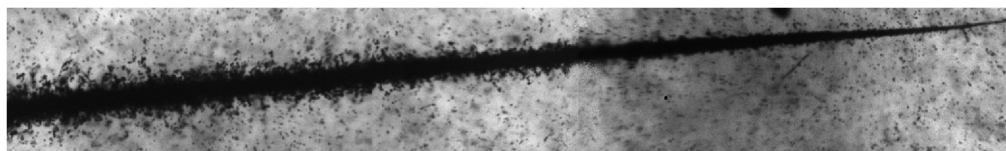


Рис. 2. Макрофотография при 60-кратном увеличении участка остановки ядра Хе



Рис. 3. Макрофотография при 20-кратном увеличении эмульсионной пленки, облученной в пучке ядер Хе, в области наибольшей плотности пучка

рис. 1. Несколько следов удалось просмотреть в пределах одного эмульсионного слоя до остановки. Фотография такой остановки ядра приведена на рис. 2. Средняя длина следов такого типа составила  $\lambda_{\text{exp}} = (38 \pm 15)$  мм. Рассчитанное по программе SRIM значение пробега ионов  $^{124}\text{Xe}^{42+}$  с начальной энергией 1 АГэВ с учетом предшествующего вещества, составившего 100 мкм железа и 15 мм сцинтиллятора, находится в согласии со столь малой экспериментальной величиной  $\lambda_{\text{exp}}$ .

На проявленной эмульсионной пленке след от потока ядер  $\text{Xe}^{53+}$  представляет собой слабо различимое потемнение с диаметром, не превышающим 1 см. На рис. 3 представлена макрофотография, сделанная с 20-кратным увеличением в области наибольшей интенсивности, на которой видны поперечные сечения следов частиц с высокой ионизацией. Участок этой области представлен на рис. 4 при 90-кратном увеличении. На этом

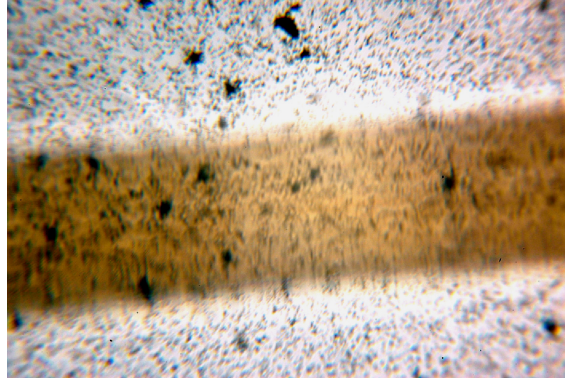


Рис. 4. Макрофотография при 90-кратном увеличении эмульсионной пленки, облученной в пучке ядер Хе, в области наибольшей плотности пучка; приведена суперпозиция с фотографией волоса

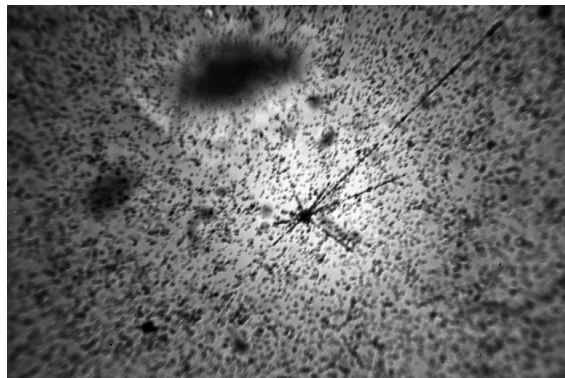


Рис. 5. Макрофотография при 90-кратном увеличении ядерной звезды в эмульсионной пленке, облученной в пучке ядер Хе

снимке приводится сравнительное фото человеческого волоса толщиной около 60 мкм, совмещенное при 40 % прозрачности. Рис. 5 демонстрирует звезду расщепления тяжелого ядра мишени на не менее чем семь фрагментов, что подтверждает факт облучения высокоэнергичными ядрами. Из-за малой толщины пленки такие события являются крайне редкими. Поперечный профиль пучка был измерен с использованием координатной сетки окуляра с шагом 0,36 мм путем подсчета около 7000 следов ядер Хе. Наблюдается характерная неоднородность профиля (рис. 6).

Темное пятно на эмульсии от пучка было сфотографировано цифровой камерой (без микроскопа). Файл изображения был сохранен в виде однобитовой карты, давшей распределение пикселей с яркостью изображения выше определенного порога. Подсчет таких пикселей привел к примерно такому же числу трековых отметок ядер Хе. На основе полученной карты было построено двумерное изображение (рис. 7), которое передает характерные особенности профиля, полученного визуальным подсчетом (рис. 6). Некоторое различие связано с несовпадением границ анализируемых областей и критериев отбора треков при обработке фотографии.

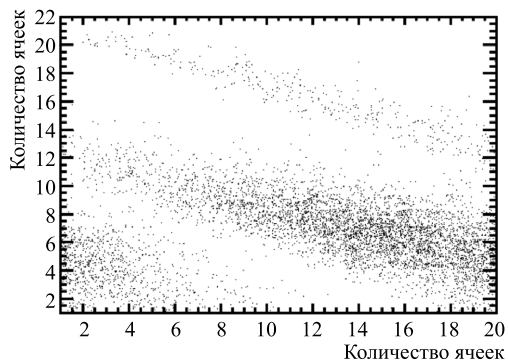


Рис. 6. Поперечный профиль пучка ядер Хе с шагом 0,36 мм, полученный при визуальном подсчете

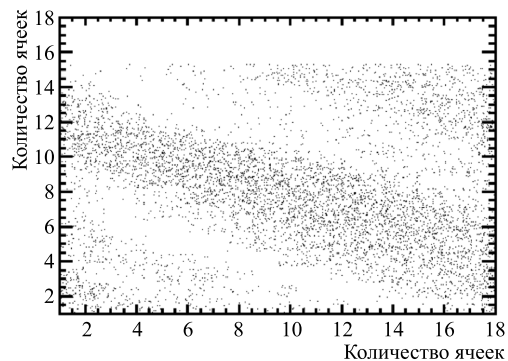


Рис. 7. Поперечный профиль пучка ядер Хе с шагом 0,36 мм, полученный при фотографировании

Для детального изучения следов ядер Хе эмульсионная пленка была отсканирована на микроскопе ПАВИКОМ-2 (рис. 8), являющемся частью автоматизированного комплекса ПАВИКОМ (ФИАН) [2–6]. Для этой методической работы были адаптированы программы автоматизированной обработки ПАВИКОМ для распознавания и оценки профиля пучка. Отметим, что комплекс ПАВИКОМ изначально создавался для обработки событий, зарегистрированных с помощью ядерных фотоэмульсий, облученных пучком ядер свинца с энергией 158 ГэВ/нуклон на ускорителе SPS (ЦЕРН) в рамках эксперимента EMU-15. Основным направлением исследования этого эксперимента является



Рис. 8. Автоматизированный комплекс ПАВИКОМ-2 (ФИАН; создан на основе микроскопа МПЭ-11 с управляемым столиком, видеокамерой и платой захвата изображения); на экране — изображение участка облученной эмульсионной пленки

поиск возможных сигналов образования кварк-глюонной плазмы при сверхвысоких температурах в сверхплотных состояниях материи. Однако универсальность и потенциально большие аппаратные возможности комплекса ПАВИКОМ позволили использовать его для существенно более широкого круга задач. В частности, на комплексе производится обработка данных эксперимента БЕККЕРЕЛЬ. Установка используется также для обработки эмульсии эксперимента OPERA [7]. В настоящее время на комплексе ПАВИКОМ обрабатываются детекторы практически всех типов трековых детекторов (фотоэмульсии, рентгеновские пленки, майлар, пластик, кристаллы). Фактически ПАВИКОМ работает в режиме центра коллективного пользования. Сотрудники примерно 10 российских и нескольких иностранных институтов совместно с группой ПАВИКОМ проводят обработку и анализ экспериментальных данных. При этом сотрудники группы ПАВИКОМ активно участвуют в создании специализированного программного обеспечения, проведении сканирования и в физическом анализе результатов.

Пленка была отсканирована при восьмикратном увеличении на ПАВИКОМ-2 и после адаптации для данного типа эмульсий стандартного программного обеспечения ФИАН обработана в автоматическом режиме. При обработке было обнаружено, что следы частиц можно разбить на две группы. Одна из них включает достаточно темные (степень потемнения  $\sim 60$  по шкале пикселей, в которой 0 — черные, 255 — белые) и крупные пятна ( $\sim 4$  мкм), принадлежащие тяжелому ядру, а вторая — пятна меньших размеров ( $\sim 2$  мкм) и более светлые (степень почернения  $\sim 100$ ), принадлежащие фрагменту тяжелого ядра. Эти признаки дают возможность достаточно надежно разделить ядра по их заряду. Для примера получено распределение пятен по степени потемнения на полях зрения, полученных в трех областях: в области сгущения тяжелых ядер (рис. 9), легких фрагментов (рис. 10) и в промежуточной области (рис. 11). Пики распределений аппроксимированы функциями Гаусса.

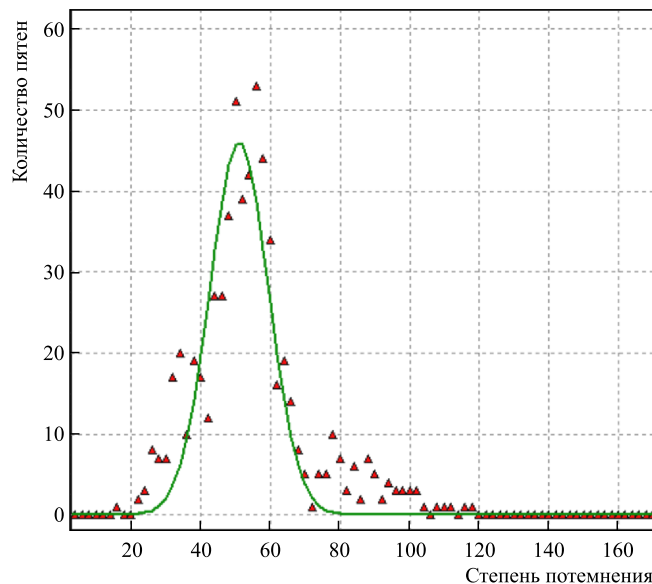


Рис. 9. Распределение пятен по степени потемнения в области сгущения тяжелых ядер

Таким образом, выполненная работа продемонстрировала факт успешного ускорения ядер ксенона на нуклотроне ОИЯИ. Для преодоления неопределенности в энергии первичных ядер, вызванной торможением в эмульсии, необходимо существенное повышение энергии пучка. Проведенное сравнение методов просмотра эмульсионной пленки указывает на возможность получения детальной информации о профилях пучков реля-

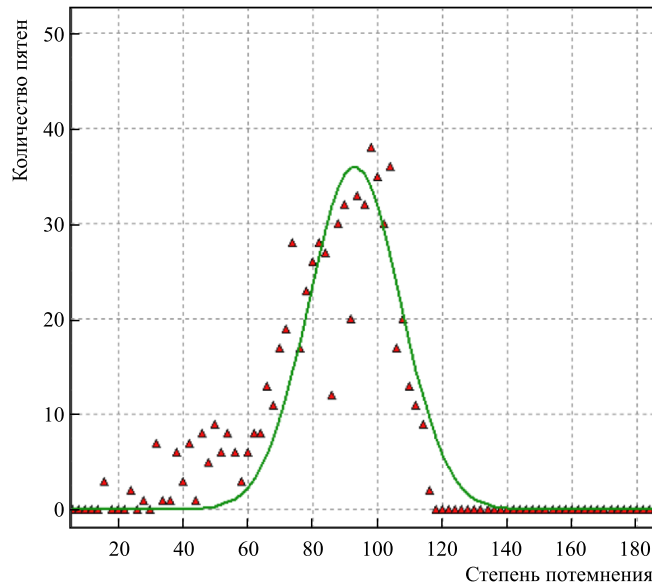


Рис. 10. Распределение пятен по степени потемнения в области сгущения легких фрагментов

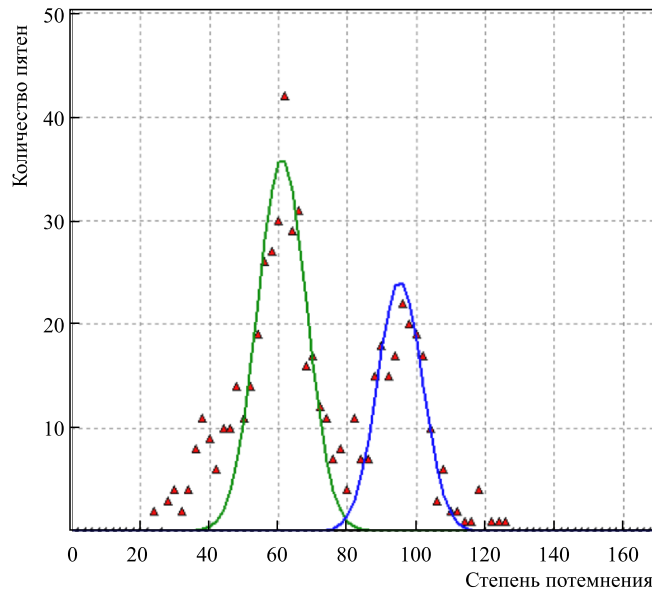


Рис. 11. Распределение пятен по степени потемнения в промежуточной области

тивистских ядер малой интенсивности на автоматизированном микроскопе. Наблюдается двухкомпонентный по заряду ядер пучок с пространственным расщеплением основного пучка и сопровождающих фрагментов, которые должны иметь близкое значение отношения заряда к массовому числу. Этот факт указывает на потенциальную возможность использования головного участка канала вывода нуклотрона как сепаратора вторичных ядер. В настоящее время ведется полное сканирование области облучения эмульсии. Выполненная адаптация программного обеспечения ПАВИКОМ позволит использовать его и при анализе других поперечных облучений эмульсионной пленки релятивистскими ядрами. В группе ПАВИКОМ разработан алгоритм автоматической фокусировки и отслеживания длинных треков при продольном облучении толстых эмульсий ядрами, обнаружения вершины взаимодействия и определения зарядов релятивистских частиц по геометрическим характеристикам их треков [8]. Использование возможностей ПАВИКОМ открывает перспективу автоматизированного анализа новых облучений ядерной эмульсии тяжелыми релятивистскими ядрами. Работа поддержана грантом 09-02-9126 СТ-а РФФИ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веб-сайт сотрудничества БЕККЕРЕЛЬ <http://becquerel.jinr.ru/>
2. *Калинин С. А. и др.* Полностью автоматизированный комплекс ПАВИКОМ // Наука — производству. 2000. № 12. С. 29.
3. *Егоров О. К. и др.* Полностью автоматизированный микроскопный комплекс ПАВИКОМ-1 // ПТЭ. 2003. № 6. С. 131–132.
4. *Егоров О. К. и др.* Полностью автоматизированный микроскопный комплекс ПАВИКОМ-2 // Там же. С. 133–134.
5. *Aleksandrov A. B. et al.* Completely Automated Measurement Facility (PAVICOM) for Track-Detector Data Processing // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 535. P. 542.
6. *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. С. 763–787.
7. *Aleksandrov A. et al.* The Pattern Recognition Software for Automatic Treatment of Track Detector Data at the PAVICOM Completely Automated Measuring Facility // Rad. Meas. 2008. V. 43, Suppl. 1. P. S120–S124.
8. *Александров А. Б. и др.* Методика измерения зарядов релятивистских ядер в фотоэмульсии на автоматизированном комплексе ПАВИКОМ // ПТЭ. 2007. № 4. С. 46–50.

Получено 15 февраля 2011 г.