

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТРОЙНОГО ЯДЕРНОГО ДЕЛЕНИЯ В ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ

*К. З. Маматкулов¹, И. Амброзова², Д. А. Артеменков¹,
В. Браднова¹, А. А. Зайцев¹, П. И. Зарубин^{1,*}, И. Г. Зарубина¹,
М. Какона², Р. Р. Каттабеков¹, А. Марей³, А. Неагу⁴, О. Плоц²,
В. В. Русакова¹, Р. Станоева⁵, К. Турек², Е. Фиру⁴, М. Хайдук⁴*

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Институт ядерной физики, Ржеж, Чехия

³ Университет Минуфии, Египет

⁴ Институт космических исследований, Магуреле, Румыния

⁵ Юго-Западный университет, Благоевград, Болгария

Описана подготовка к поиску тройного деления тяжелых ядер и анализу угловых корреляций осколков на основе ядерной эмульсии и автоматического микроскопа. Начаты поверхностные облучения ядерной эмульсии источником Cf. Обнаружены и изучены планарные события, содержащие только тройки осколков.

Preparation for search of ternary fission of heavy nuclei and analysis of fragment angular correlations on the basis of nuclear track emulsion and automated microscope is presented. Surface exposures of emulsion to a Cf source are started. Planar events containing only fragment triples are found and studied.

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

В сочетании с анализом на автоматизированном микроскопе метод ядерной эмульсии (ЯЭ) [1–3] открывает уникальные возможности для исследований в ядерной и нейтронной физике и радиационной дозиметрии. Становится возможным решение известных проблем поиска и измерения коротких ядерных следов с наилучшим пространственным разрешением (0,5 мкм) на беспрецедентном уровне статистики. Начальный этап на этом пути состоит в воспроизведении результатов прошлого с использованием традиционных измерительных микроскопов с 90-кратным увеличением объективов. Достичь такого разрешения на автоматизированных микроскопах еще пред-

*E-mail: zarubin@ihe.jinr.ru

стоит. На этой основе возможна выработка рекомендаций для разработки конкретных алгоритмов поиска следов с учетом реальных сложностей.

Одним из направлений, вызывающих современный интерес к ЯЭ, является физика ядерного деления. Тройное деление ^{235}U под действием тепловых нейтронов было обнаружено на основе ЯЭ, которая пропитывалась химическим соединением, обогащенным этим изотопом [4]. Достаточно давно исследовалось спонтанное деление изотопа ^{252}Cf , введенного в ЯЭ [5, 6]. Еще предстоит установить соотношение вероятностей тройного и бинарного делений. В настоящее время выдвинута гипотеза коллинеарного тройного деления ядер [7, 8], существование которого может проявиться в событиях с испусканием легчайшего осколка в направлении одного из тяжелых фрагментов. Конечно, осколки деления не могут быть полностью идентифицированы в ЯЭ. Ценность метода ЯЭ состоит в наилучшем угловом разрешении, что позволяет подвергнуть проверке существование такого явления при анализе угловых корреляций. Кроме того, возможны измерения длин и толщин следов и, значит, их классификация.

Интерес к дальнейшему применению ЯЭ стимулировал ее воспроизведение предприятием «Микрон», являющимся частью компании «Славич» (г. Переславль-Залесский) [9]. В настоящем исследовании используются образцы, произведенные поливом ЯЭ слоем около 100 мкм на стеклянную подложку. Облучения поверхности образцов ЯЭ, проводимые в Отделении радиационной дозиметрии (ИЯФ Чешской АН, Прага), сначала выполнялись ручным перемещением источника ^{252}Cf . Теперь источник перемещается по программе специально разработанным устройством. Выдвинуто предложение анализа достаточной площади ЯЭ, облученной источником ^{252}Cf с подходящей плотностью следов α -частиц и осколков спонтанного деления [10]. Его развитие состоит в применении образцов ЯЭ, обогащенных изотопом ^{235}U и облученных тепловыми нейтронами. Далее представлены находки предварительного этапа облучения ЯЭ источником. Будучи интересны сами по себе, они указывают на возможность их применения при масштабном анализе больших площадей ЯЭ.

Наиболее вероятным образом изотоп ^{252}Cf распадается под воздействием излучения α -частиц с энергией 5–6 МэВ, следы которых заполняют облучаемый образец. Кроме того, этот изотоп испытывает спонтанное деление на пару (3 %) или тройку (0,1 %) осколков. Для сравнения образец ЯЭ облучался источником ^{241}Am , излучающим только α -частицы в том же диапазоне энергии. Так как пробеги продуктов распада малы, облучения источниками выполняются без светозащитной бумаги в затемненном помещении при красном свете. При поверхностном облучении не ожидалось более двух осколков деления, поскольку третий излучается в сторону источника. Признак облучения ^{252}Cf состоит в присутствии следов α -частиц тройного деления, пробеги которых значительно превышают пробеги α -частиц распада [10].

При просмотре поверхности слоев ЯЭ, облученной источником Cf, обнаружены планарные события также троек осколков, примеры которых приведены на рис. 1. К сожалению, качество этих снимков не передает детальность реальных наблюдений. Стоит подчеркнуть исключительность этого наблюдения троек. Для полного наблюдения троек следов их вершины находятся глубже толщины следов. На рис. 2 представлено распределение 96 вершин деления Cf на три фрагмента по глубине слоя ЯЭ, среднее значение которого составляет $(4,1 \pm 0,2)$ мкм (RMS 2,5 мкм). Возможно, этот эффект обязан связыванию атомов Cf в микрокристаллах AgVg и их дрейфу. По-видимому, поверхностная защита источника с начальной толщиной напыленного золота 50 мкг/см^2 (согласно паспорту источника) не предотвратила такое проникновение.

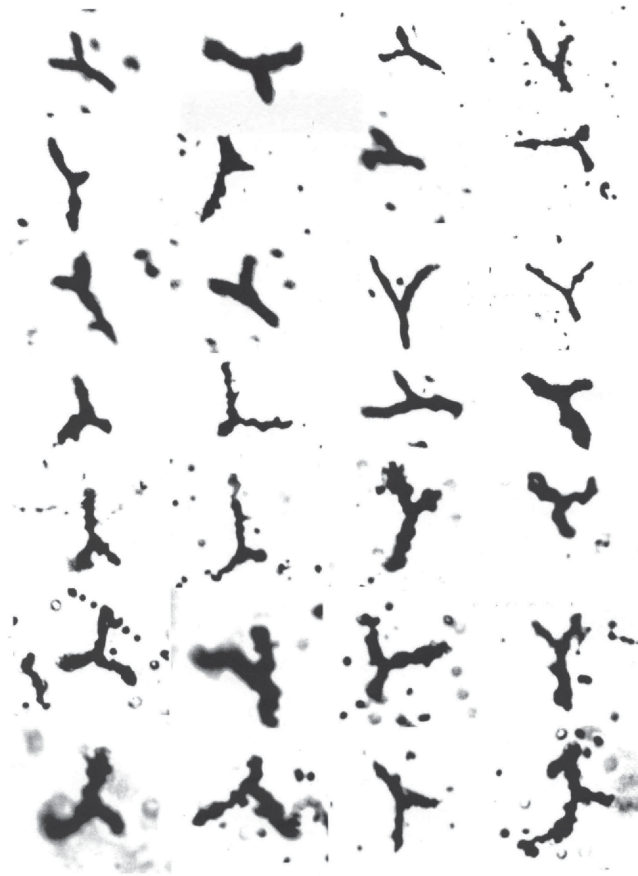


Рис. 1. Примеры наблюдавшихся событий тройного деления

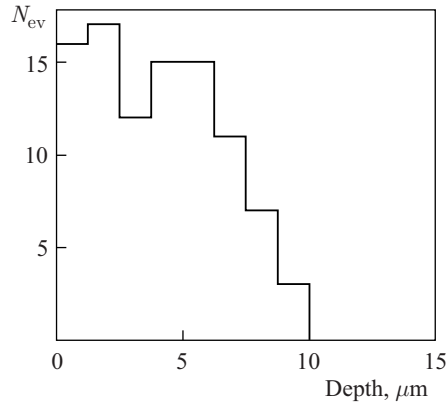


Рис. 2. Распределение событий тройного деления ^{252}Cf по глубине в слое ЯЭ

В 96 найденных событиях тройного деления измерены пробеги L_{fr} всех осколков (рис. 3, *a*). Среднее значение L_{fr} равно $(4,6 \pm 0,13)$ мкм (RMS 2,1 мкм), а грубая оценка средней энергии составляет порядка 400 А кэВ. Калибровка пробегов ионов в ЯЭ должна быть продвинута существенно ниже 1 А МэВ. В этих событиях измерены углы разлета между осколками (рис. 3, *б*). Их распределение характеризуется средним значением $(111 \pm 2)^\circ$ (RMS 36°). Можно заключить, что кандидатов на коллинеарное деление пока не обнаружено. Удобным критерием выделения энергии при тройном делении является суммарный пробег осколков L_{sum} (рис. 4, *a*). Распределение L_{sum} имеет среднее значение $(14 \pm 0,4)$ мкм (RMS 3,5 мкм). Степень асимметричности тройки характеризует длина суммарного вектора пробега L_{ecc} (рис. 4, *б*), связанная с суммарным импульсом осколков. Распределение L_{ecc} описывается распределением Рэля с параметром $(3,7 \pm 0,3)$ мкм.

Можно сделать практический вывод, что воспроизведенная ядерная эмульсия была успешно применена в физическом исследовании с тяжелыми ионами предельно низкой энергии. Предложенная задача анализа крайне редких событий тройного деления сводится к нахождению планарных троек ядерных

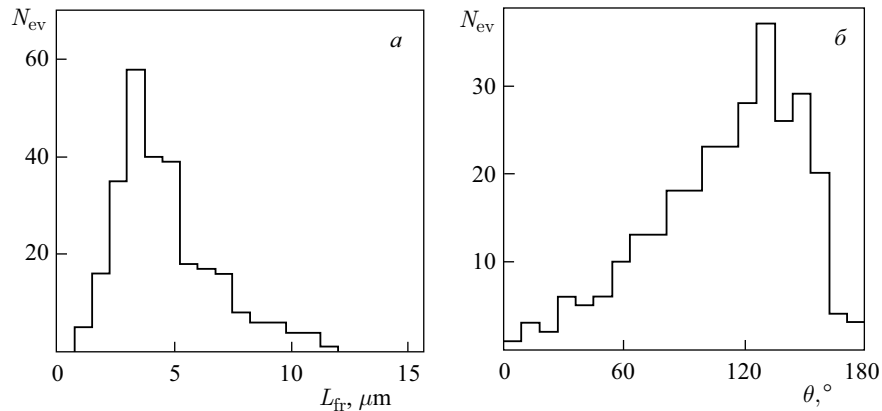


Рис. 3. Распределение событий тройного деления ^{252}Cf по пробегу осколков L_{fr} (*a*) и по углу разлета между ними θ (*б*)

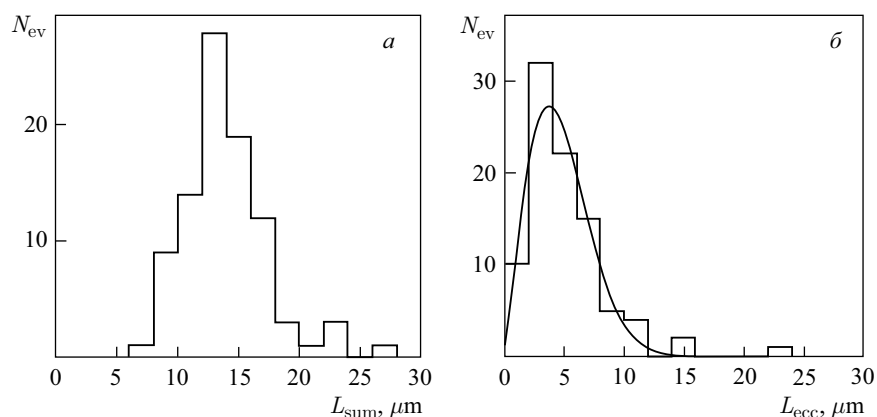


Рис. 4. Распределение событий тройного деления ^{252}Cf по суммарному пробегу троек осколков L_{sum} (а) и длине суммарного вектора пробега L_{ecc} (б)

осколков. Их следы должны иметь протяженность от 1 до 10 мкм, начинаясь в общей вершине. Компьютерный анализ изображений позволит отобрать распады для совершенного ручного анализа. Автоматизация поиска событий тройного деления резко сократит наиболее затратный этап по времени и поможет сфокусировать ручной анализ на уже обнаруженных событиях. Таким образом, ручной и автоматический анализы дополняют друг друга.

Макрофотографии найденных событий, архивируемые на сайте проекта BECQUEREL [11], могут служить прототипами для разработки программ поиска троек осколков на автоматическом микроскопе HSP-1000 ОРД ИЯФ [12]. На этом микроскопе при 20-кратном увеличении ведется опытное сканирование значительных площадей ЯЭ, облученной источником калифорния. Для полного использования разрешения ЯЭ проводится его обновление для применения объектива с 60-кратным увеличением, погружаемого в иммерсионное масло. В целом настоящее исследование, имеющее целью возвращение ЯЭ в практику ядерного эксперимента на основе продвинутой микроскопии, послужит прототипом решения широкого круга задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Powell C. F., Fowler P. H., Perkins D. H. The Study of Elementary Particles by the Photographic Method. London; New York: Pergamon Press, 1959.
2. Barkas W. H. Nuclear Research Emulsions. New York; London: Acad. Press, 1963.
3. Goldschmidt-Cremont Y. Photographic Emulsions // Ann. Rev. Nucl. Sci. 1953. P. 141.

4. *Tsien San-Tsiang et al.* On the New Fission Process of Uranium Nuclei // *Phys. Rev.* 1947. V. 71. P. 382.
5. *Titterton E. W., Brinkley T. A.* Rare Modes in the Spontaneous Fission of Californium-252 // *Nature.* 1960. V. 187. P. 228.
6. *Muga M. L., Bowman H. R., Thompson S. G.* Tripartition in the Spontaneous-Fission Decay of ^{252}Cf // *Phys. Rev.* 1961. V. 121. P. 270.
7. *Kamanin D. V., Pyakov Y. V.* Clusterization in Ternary Fission // *Lect. Notes Phys.* 2014. V. 875. P. 183.
8. *Nasirov A. K. et al.* Peculiarities of Cluster Formation in True Ternary Fission of ^{252}Cf and ^{236}U // *Phys. Scripta.* 2014. V. 89. P. 054022.
9. Slavich Company JSC. www.slavich.ru. www.newslavich.com.
10. *Mamatkulov K. Z. et al.* Toward an Automated Analysis of Slow Ions in Nuclear Track Emulsion // *Phys. Procedia.* 2015. V. 74. P. 59; arXiv:1508.2707.
11. The BECQUEREL Project. <http://becquerel.jinr.ru/miscellanea/Prague-dosimetry/Prague-dosimetry.html>.
12. Department of Radiation Dosimetry. <http://www.odz.ujf.cas.cz/>.