

На пути к автоматизированному анализу медленных ионов в ядерной эмульсии

К. З. Маматкулов^a, Р. Р. Каттабеков^a, И. Амброзова^b, Д. А. Артеменков^{a,c},
В. Браднава^a, Д. В. Каманин^a, Л. Майлинг^b, А. Марей^c, О. Плоц^b,
В. В. Русакова^a, Р. Станоева, К. Турек,
А. А. Зайцев^a, П. И. Зарубин^{a*}, И. Г. Зарубина^a

^aОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

^bИнститут ядерной физики, Ржеж, Чешская Республика

^cМосковский инженерно-физический институт, Москва, Россия

^dУниверситет Минуфши, Египет

^eЮго-Западный университет, Благоевград, Болгария

Аннотация

Обсуждается применение метода ядерной эмульсии (ЯЭ) в исследованиях радиоактивности и ядерного деления. Предложено использовать автоматический микроскоп HSP-1000 для поисков коллинеарного кластерного тройного расщепления тяжелых ядер имплантированных в ЯЭ. Проведены калибровки пробегов α -частиц и ионов в новой ЯЭ. Начаты поверхностные облучения ЯЭ источником ^{252}Cf . Изучаются планарные события содержащие фрагменты и длиннопробежные α -частицы, а также тройки фрагментов. Образцы ЯЭ откалиброваны ионами Кг и Хе с энергией 1.2 and 3 А МэВ.

Ключевые слова: ядерная эмульсия, тройное деление, автоматический микроскоп, калифорний, циклотрон, распознавание образов

*Ответственный автор

Адрес электронной почты: zarubin@lhe.jinr.ru

1. Введение

Ядерная эмульсия (ЯЭ) сохраняет статус универсального и недорогого детектора, несмотря на тот факт, что уже прошло столетия с ее разработки. С непревзойденным пространственным разрешением ЯЭ обеспечивает полное наблюдение следов, начиная с осколков деления и вплоть до релятивистских частиц [1-3]. Уникальные возможности ЯЭ заслуживают дальнейшего использования в фундаментальных и прикладных исследованиях, а также с источниками радиоактивности, включая естественные. Применение ЯЭ особенно оправдано в тех пионерских исследованиях, в которых следы ядерных частиц не могут быть реконструированы с помощью электронных детекторов.

Метод ЯЭ основывается на интеллекте, зрении и работоспособности исследователей, использующих традиционные микроскопы. Вопреки широкому интересу к методу, его трудоемкость ведет к ограниченным выборкам из измеренных следов, которые, как правило, представляют только незначительные доли доступной статистики. Применение компьютеризованных и полностью автоматизированных микроскопов в анализе ЯЭ позволяет преодолеть этот разрыв. Эти сложные и дорогие приборы коллективного или даже удаленного использования позволяют описывать беспрецедентные статистики коротких ядерных следов.

Чтобы сделать подобное развитие целенаправленным, необходимо сфокусироваться на актуальном вопросе ядерной физики, решение которого может быть сведено к простым задачам распознавания и измерения следов в ЯЭ. Одной из предложенных задач является поиск коллинеарного тройного кластерного расщепления [4]. Существование этого явления могло бы быть установлено в наблюдениях такого типа тройного деления тяжелых ядер, при котором наиболее легкий осколок испускается в направлении одного из тяжелых фрагментов.

Несмотря на четкую наблюдаемость осколков деления, они не могут быть полностью идентифицированы в ЯЭ. Однако, ценность ЯЭ состоит в комбинации наилучшего углового разрешения и чувствительности. Кроме того, возможно измерять длины и толщины следов, и таким образом классифицировать осколки. В качестве начального этапа обеспечения статистики тройных делений предлагается проанализировать достаточные площади ЯЭ облученные источником ^{252}Cf с подходящей плотностью следов α -частиц и осколков спонтанного деления. Такой подход был разработан в ЯЭ с примесью изотопа ^{252}Cf [5,6].

Выполнить крупномасштабное сканирование ЯЭ предложено на микроскопе HSP-1000 [7] Отделения радиационной дозиметрии Института ядерной физики Академии наук Чешской республики. Использование разрешения ЯЭ будет полным, если микроскоп будет адаптирован для работы с линзами наивысшего разрешения. Потребуется развитие алгоритмов автоматического поиска и анализа следов. С экспериментальной стороны пробеги ионов в ЯЭ должны быть откалиброваны в масштабе α -распада и деления. Развитие подготовительного этапа предложенного исследования представлен ниже.

2. Калибровка α -частицами

Производство ЯЭ типа БР-2, обладающей чувствительностью к релятивистским частицам, продолжалось в Москве четыре десятилетия и завершилось около десяти лет назад. Интерес к ее дальнейшему применению стимулировал производство ЯЭ в цехе МИКРОН, являющегося частью компании «Славич» (г. Переславль Залесский) [8]. В настоящее время образцы ЯЭ производятся слоями толщиной от 50 до 200 μm на стеклянных подложках. Проверка воспроизведенной ЯЭ в облучениях релятивистскими частицами подтвердила ее сходство с ЯЭ БР-2. Было решено продемонстрировать конкурентоспособность ЯЭ в экспериментах, основанных на измерении следов α -частиц и тяжелых ионов на микроскопе KSM с объективом 90 \times .

Исследовались корреляции троек α -частиц в расщеплениях ядер углерода из состава ЯЭ нейтронами с энергией 14.1 МэВ [9]. При измерении распадов ядер ^8He , имплантированных в ЯЭ, проверялись возможности α -спектрометрии, и был установлен эффект дрейфа атомов ^8He [10-12]. Угловые корреляции ядер ^7Li и ^4He , рожденных в расщеплениях ядер бора тепловыми нейтронами изучались в ЯЭ, обогащенной бором. В последнем случае средний пробег Li (при среднеквадратичном рассеянии RMS) равен 3.1 ± 0.3 (0.8) μm при средней толщине 0.73 ± 0.02 (0.05) μm , а для ^4He 5.5 ± 0.5 (1.1) μm и 0.53 ± 0.01 (0.04) μm , соответственно. В этой серии облучений угловое разрешение ЯЭ подтвердилось как совершенное по ожидавшимся физическим эффектам, которые проявились в распределениях по углам разлета продуктов изучавшихся реакций.

Поверхностные облучения образцов ЯЭ в ОРД выполнялись ручным перемещением источника ^{252}Cf . Наиболее вероятным образом изотоп ^{252}Cf распадается излучением α -частиц с энергией 5-6 МэВ, следы которых в основном заполняют облучаемый образец. Этот изотоп также испытывает спонтанное деление на пару или даже тройку осколков с вероятностью 3% и 0.1%, соответственно. 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 выполнялись без светозащитной бумаги в фото-комнате при освещении красным светом.

В случае поверхностного облучения не должно наблюдаться более двух осколков деления, поскольку третий излучается в сторону контактирующего источника. Признак облучения ^{252}Cf состоит в присутствии следов α -частиц тройного деления, пробеги которых значительно превышают пробеги α -частиц распада. Этот канал доминирует в тройном делении ^{252}Cf , имея вероятность 90%. Рис. 1 объединяет измеренные пробеги α -частиц в перечисленных выше облучениях, а значения энергии на вставке вычислены в модели SRIM [14]. Средние значения пробегов и энергии даны в табл. 1.

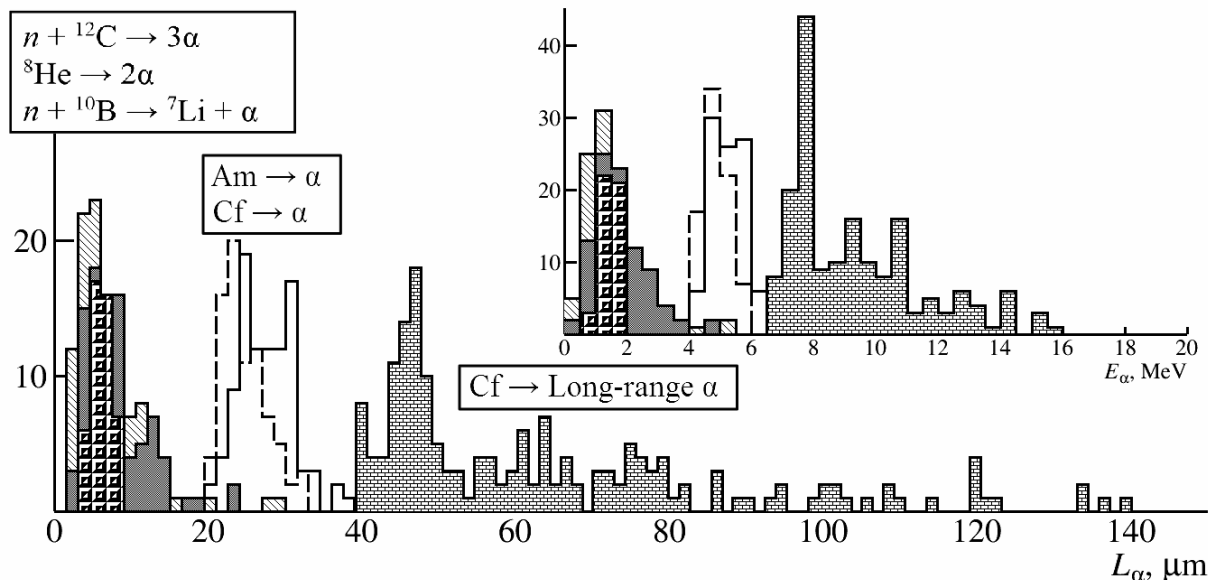


Рис.1. Распределения пробегов α -частиц: $n(14.1 \text{ MeV}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ (наклонная штриховка), ${}^8\text{He} \rightarrow 2\alpha$ (серое), $n_{\text{th}} + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li} + \alpha$ (черные точки), $\text{Cf} \rightarrow \alpha$ (сплошная линия), $\text{Am} \rightarrow \alpha$ (пунктирная линия), $\text{Cf} \rightarrow$ длиннопробежная α (темная штриховка); на вставке: соответствующие энергии α -частиц, оцененная по сплайн-интерполяции расчета пробег-энергия в модели SRIM.

Таблица 1. Средние значения пробегов и энергии α -частиц в изучавшихся реакциях и распадах; в скобках значения RMS.

Распад или реакция	Средний пробег, μm	Средняя энергия, МэВ
$n(14.1 \text{ МэВ}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$	5.8 ± 0.2 (3.3)	1.9 ± 0.05 (0.9)
${}^8\text{He} (2\beta) \rightarrow 2\alpha$	7.4 ± 0.2 (3.8)	1.7 ± 0.03 (0.8)
$n_{\text{th}} + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li} + \alpha$	5.5 ± 0.5 (1.1)	1.4 ± 0.5 (0.3)
${}^{241}\text{Am} \rightarrow \alpha$	27.7 ± 0.4 (4.2)	5.3 ± 0.05 (0.5)
${}^{252}\text{Cf} \rightarrow \alpha$:	33.4 ± 0.6 (3.6)	6.1 ± 0.09 (0.5)
${}^{252}\text{Cf} \rightarrow$ длиннопробежная α	64.2 ± 2.9 (23)	9.4 ± 0.2 (2.1)

Таблица 2. Средние значения пробегов ионов (μm); в скобках значения RMS.

${}^{84}\text{Kr}$ (3 А МэВ)	34.4 ± 0.3 (2.4)
${}^{124}\text{Xe}^{+26}$ (1.2 А МэВ)	20 ± 0.1 (1.0)
${}^{86}\text{Kr}^{+17}$ (1.2 А МэВ)	17 ± 0.2 (1.0)
${}^{252}\text{Cf} \rightarrow 3$ фрагмента	5.1 ± 0.3 (2.0)
${}^{252}\text{Cf} \rightarrow 2$ фрагмента + длиннопробежная α	9.1 ± 0.3 (0.6) 13.1 ± 0.6 (1.1)

3. Калибровки тяжелыми ионами

Образцы ЯЭ облучались в Лаборатории ядерных реакций имени Г. Н. Флерова ОИЯИ на циклотроне ИЦ-100 ионами ${}^{86}\text{Kr}^{+17}$ и ${}^{124}\text{Xe}^{+26}$ с энергией 1.2 А МэВ и на циклотроне У-400М ионами ${}^{84}\text{Kr}$ с энергией 3 А МэВ[15]. Облучения выполнялись в условиях вакуума ускорителей и также без светозащитной бумаги. Фиксация образцов в камерах облучения происходила при освещении, обычном в фотолаборатории. Для наблюдения следов образцы устанавливались со значительным наклоном по отношению к направлениям пучков. Плотности следов достигали 10^6 см^{-2} за несколько секунд облучения образца. Рис. 2 демонстрирует распределение по пробегам ионов, не рассеявшихся в ЯЭ. Их средние значения представлены в табл. 2. Эти данные дают ориентиры для дальнейших калибровок ЯЭ при меньших значениях энергии, которые характерны для деления тяжелых ядер.

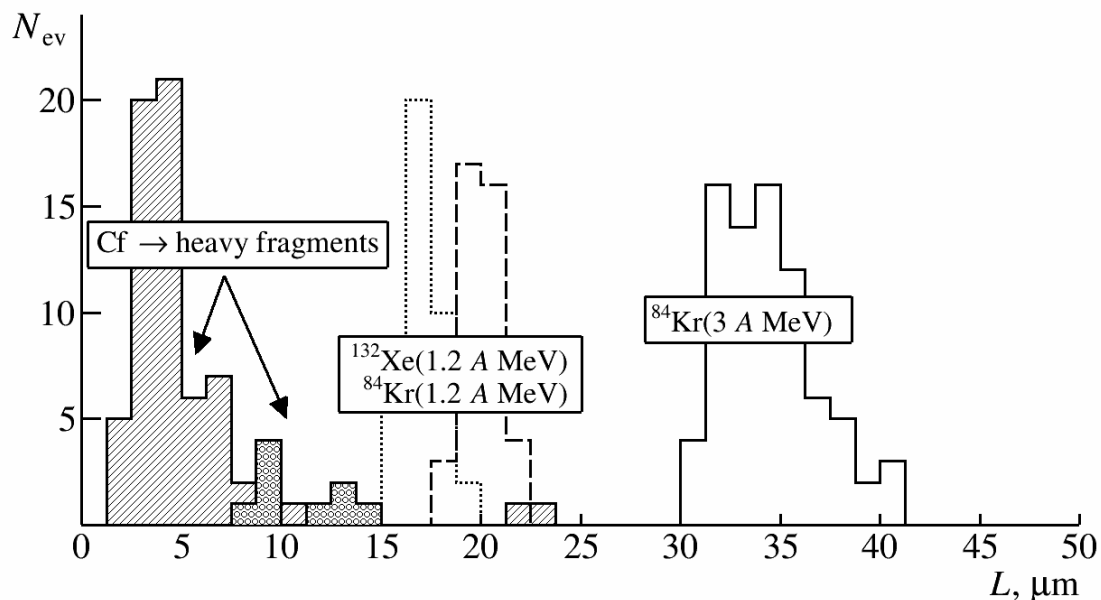


Рис. 2. Распределения пробегов ионов ^{84}Kr , ^{132}Xe , ^{86}Kr и в распадах $\text{Cf} \rightarrow 3$ осколка и $\text{Cf} \rightarrow 2$ осколка + длиннопробежная α .

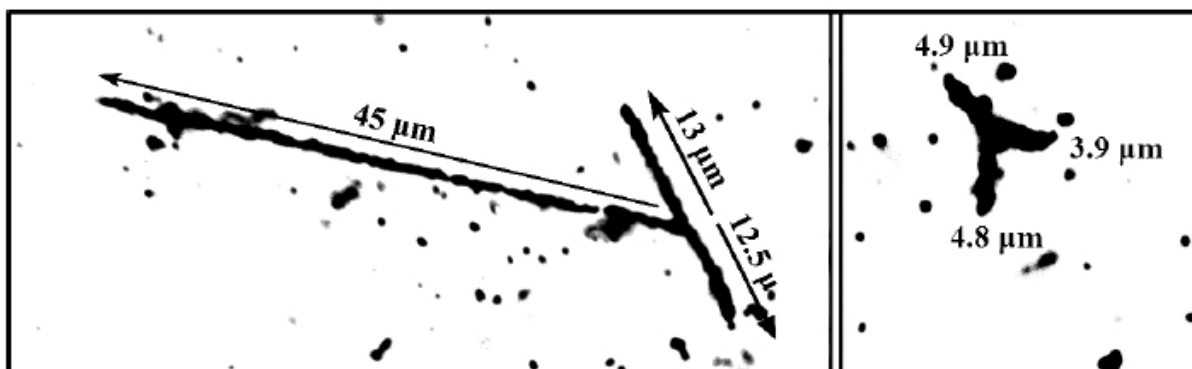


Рис. 3. Примеры наблюдавшихся событий тройного деления: указаны длины следов. Левое фото: длиннопробежная α -частица (длинная стрелка), осколки (стрелки средней длины). Правое фото: три полностью наблюдаемых следа осколков.

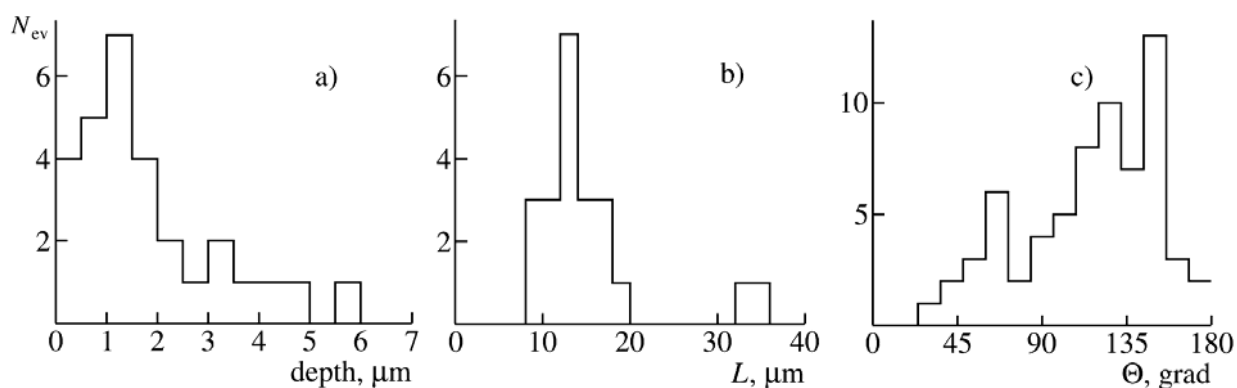


Рис. 4. Распределение делений ^{252}Cf на три фрагмента по глубине в слое ЯЭ (а), суммарных пробегов трех осколков (б) и углов разлета между осколками (с).

Поиски следов тяжелых ионов на поверхности образцов ЯЭ облученных источником ^{252}Cf выполнялись на микроскопе KSM с объективом $15\times$. Обычно на этом этапе используются микроскопы МБИ-9. Использование KSM для поиска крайне редких событий деления упростило немедленный переход к их измерениям с объективом $90\times$.

Обнаружены планарные тройки, состоящие из пар фрагментов и длиннопробежных α -частиц, а также троек осколков. Их примеры даны на рис. 3. Стоит подчеркнуть замечательный факт наблюдения в ЯЭ троек, а не только пар фрагментов. Для столь полного наблюдения троек следов, их вершины должны погружаться на глубину не менее типичной толщины следов. На рис. 4 (а) представлено распределение вершин деления Cf на три фрагмента по глубине слоя ЯЭ, среднее значение которого составляет $1.8 \pm 0.2 \text{ мкм}$ (RMS 1.4 мкм). Возможно, что этот эффект обязан связыванию атомов Cf в микрокристаллах AgBr и их дрейфу. По-видимому, поверхностная защита источника с начальной толщиной напыленного золота 50 мкг/см^2 (согласно паспорту источника) не предотвратила такое проникновение.

В 23 событиях истинно тройного деления, т. е. не содержащих α -частиц, (рис. 3, правое фото) измерены пробеги всех осколков. Сравнение со средними значениями в табл. 2 указывает на то, что средняя энергия осколков деления порядка 400 А кэВ . Однако, это очень грубая оценка. Калибровка пробегов ионов должна быть продвинута существенно ниже 1 А МэВ в контролируемых условиях, обеспечиваемых ускорителями. Эффективным критерием деления на три тяжелых осколка является их суммарный пробег (Рис. 4 (b)), который имеет среднее значение $15.3 \pm 1.4 \text{ мкм}$ при RMS 6.4 мкм . Кроме того, в этих событиях измерены углы разлета между осколками (рис. 4 (c)); Их распределение характеризуется средним значением $116 \pm 5^\circ$ при RMS 36° .

4. Опыт автоматических измерений

Начальный опыт компьютерного анализа следов тяжелых ионов в ЯЭ получен с использованием программы ImageJ program [16] и макрофотографии образца ЯЭ, облученного под углом 45° в пучке $^{132}\text{Xe}^{+26}$. Этапы такого анализа показаны на рис. 5: начальная макрофотография, сделанная камерой НИКОН Д70 с объективом $60\times$, нахождение образов следов, описание их эллипсам, а также определение длин на компьютере (93 следа) и результат ручных измерений не рассеявшихся следов (40 следов). В случае компьютера RMS существенно выше, чем в ручном, и составляет $2.9 \pm 0.2 \text{ мкм}$ и $1.0 \pm 0.1 \text{ мкм}$, соответственно.

Зачастую следы ионов, вошедших в ЯЭ, завершаются загибами или «вилками» из-за рассеяния на ядрах Ag и Br (рис. 6). Например, в случае рассеяний ^{86}Kr средний пробег до точки рассеяния равен $7.7 \pm 0.2 \text{ мкм}$ at RMS 1.8 мкм , что соответствует средней энергии при рассеянии $250 \pm 10 \text{ кэВ}$ at RMS 100 кэВ . Остаточные следы рассеянных ионов имеют средний пробег $5.5 \pm 0.3 \text{ мкм}$ at RMS 3 мкм . Приписать вторичные следы начальному иону и иону отдачи мишени невозможно. Поскольку только следы не рассеявшихся ионов принимались для ручного анализа, такая выборка обеспечила совершенное разрешение по пробегам. Тем не менее, при контроле времени облучения компьютерный анализ может быть применен в желаемом масштабе и разнообразии следов с оценкой энергии ионов, как в ионной профилометрии так и в α -дозиметрии со случайной направленностью следов.

Итак, установлены методические предпосылки для перехода к автоматическому анализу по обсуждаемой теме. Микроскоп HSP-1000 OPD, изготовленный «Сейко Прецижн» является уникальным научным оборудованием европейского уровня. Он оборудован линейным сенсором высокого разрешения, который позволяет в 50 раз большую скорость захвата изображения по сравнению с обычными ПЗС-камерами. Полное изображение образца восстанавливается при непрерывном фотографировании относительно малого числа длинных цепочек. Этот микроскоп с объективом $20\times$ используется при анализе твердотельных детекторов.

Недавно выполнено сканирование образца ЯЭ, облученного ионами $^{132}\text{Xe}^{+26}$ под углом 10° и 45° . Проведен демонстрационный анализ на порядки превышающий возможности человека на массиве из 225 последовательных кадров. Этот анализ должен принимать во внимание осложнения связанные с рассеянием ионов. Для того, чтобы использовать

разрешение ЯЭ полностью, необходимо применить погружаемый в масло объектив 60×. В настоящее время микроскоп HSP-1000 дополняется соответствующим образом.

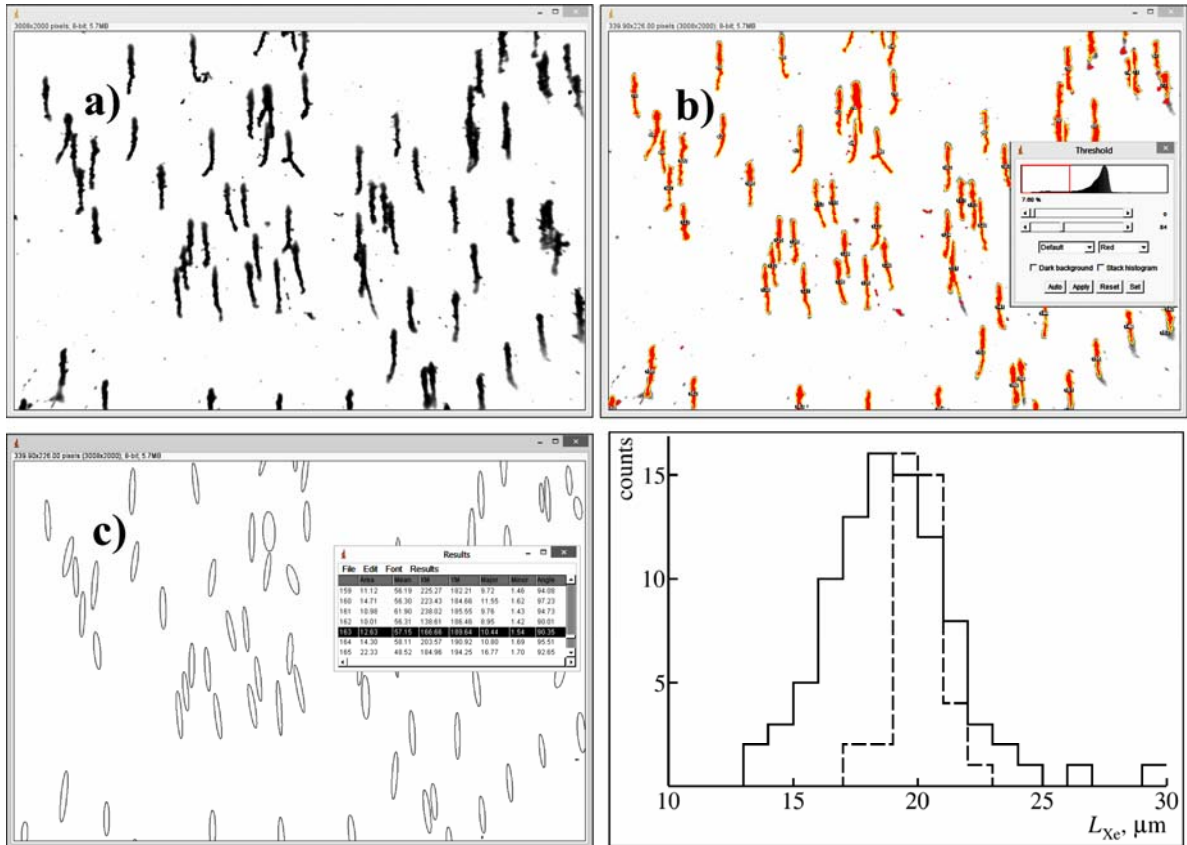


Рис. 5. Этапы компьютерного анализа начальная макрофотография (а), нахождение образов следов (б), описание эллипсами (с) и распределение пробегов ионов при компьютерном (сплошная линия) и ручном (пунктирная линия) анализе (д).

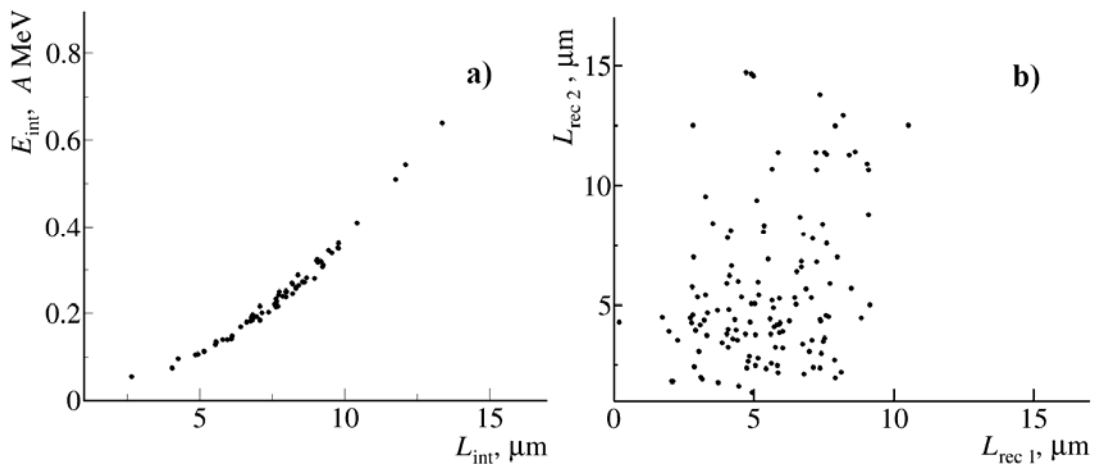


Рис. 6. Пробег ионов до точек рассеяния L_{int} и энергия E_{int} в них по модели SRIM (а); пробег ионов отдачи L_{rec1} и L_{rec2} (б).

5. Заключение

Предложенная задача анализа крайне редких событий тройного деления сводится к нахождению планарных троек ядерных осколков. Начинаясь в общей вершине, будучи случайно направлены, их следы должны иметь протяженность от 1 до 10 μm . 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 анализ дополняют друг друга.

В целом, синергия современных источников радиоактивности, проверенной метрологии ЯЭ и продвинутой микроскопии представляется обещающей перспективой исследования α -радиоактивности и ядерного деления. Можно представить, что ионы трансураниевых элементов будут когда-то имплантированы в ЯЭ. Их яркие распады могут быть найдены как общие вершины для нескольких α -частиц и ядерных осколков. Эта перспектива подчеркивает фундаментальное значение сохранения и модернизации метода ЯЭ. Таким образом, настоящее исследование, сфокусированное на возвращении ЯЭ в практику ядерного эксперимента, послужит прототипом решения впечатляющего числа задач. Макрофотографии обсужденных облучений и видео, базирующихся на них, доступны на сайте проекта БЕККЕРЕЛЬ [17].

6. Благодарности

Авторы выражают благодарность проф. Т. Хусейну и М. Гонеиму (Каирский университет), Х. Эль-Самману (Университет Минофии), Ю. В. Пяткову (Московский инженерно-физический институт), А. И. Малахову (ОИЯИ) и Н. Г. Полухиной (ФИАН) за дискуссии и поддержку. Эта работа была поддержана грантами Полномочных представителей правительств Болгарии, Чешской республики, Египта и Румынии в ОИЯИ,

7. Литература

- [1] C. F. Powell, P. H. Fowler, and D. H. Perkins “The Study of Elementary Particles by the Photographic Method” Pergamon Press (1959).
- [2] Barkas W. H. “Nuclear Research Emulsions” Academic Press (1963).
- [3] Goldschmidt-Cremont Y. “Photographic Emulsions” *Annu. Rev. Nucl. Sci.* **1953.3**, 141.
- [4] Kamanin D. V. and Pyakov Y. V. “Clusterization in ternary fission” *Clusters in Nuclei*, Volume 3, Lecture Notes in Physics **875** (2014) 183, Springer Int. Publ. (*and references herein*); doi: 10.1007/978-3-319-01077-9_6.
- [5] E. W. Titterton and T. A. Brinkley, *Nature* **187**(1960)228,
- [6] M. L. Muga, H. R. Bowman, and S. G. Thompson, *Phys. Rev.* **121**(1961)271 (*and references herein*).
- [7] URL <http://www.odz.ujf.cas.cz/home/resources/microscope-hsp-1000>.
- [8] “Slavich Company JSC” URL www.slavich.ru, www.new.slavich.com.
- [9] R. R. Katabekov *et al.*, *Phys. At. Nucl.*, add. issue, 88(2013); arXiv: 1407.4575.
- [10] D. A. Artemenkov *et al.* *Phys. Part. Nucl. Lett.* **10**(2013)415; URL <http://dx.doi.org/10.1134/S1547477113050026>; arXiv: 1309.4808
- [11] P. I. Zarubin *et al.* *EPJ Web of Conferences* **66** (2014)11044; URL <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20146611044>.
- [12] D. A. Artemenkov *et al.* *Few-Body Syst.*, **55** (8-10)(2014)733; <http://dx.doi.org/10.1007/s00601-014-0885-4>; arXiv: 1410.5188.
- [13] D. A. Artemenkov *et al.* arXiv:1407.4572.
- [14] J. F. Ziegler, J. P. Biersack and M. D. Ziegler “SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter” 2008, ISBN 0-9654207-1-X., SRIM Co; URL <http://srim.org/>.
- [15] URL <http://flerovlab.jinr.ru/flnr/accelerators.html/>.
- [16] “Image processing and analyses in Java” URL <http://rsb.info.nih.gov/ij/>.
- [17] “The BECQUEREL Project” URL <http://becquerel.jinr.ru/>.