



“Автоматический анализ ядерной эмульсии, облученной медленными ионами и нейтронами” П. И. Зарубин

Обсуждается применение метода ядерной эмульсии 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 ²⁵²Cf. Изучаются планарные события содержащие фрагменты и длиннопробежные α -частицы, а также тройки фрагментов. Образцы ЯЭ откалиброваны ионами Kr и Xe с энергией 1.2 and 3 A МэВ. Ядерная эмульсия обогащенная бором применялась на пучках тепловых и быстрых нейтронов.

Ядерная эмульсия (ЯЭ) сохраняет статус универсального и недорогого детектора, несмотря на тот факт, что уже прошло полстолетия с ее разработки. С непревзойденным пространственным разрешением ЯЭ обеспечивает полное наблюдение следов, начиная с осколков деления и вплоть до релятивистских частиц. 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.

КОРРЕЛЯЦИИ α -ЧАСТИЦ В РАСЩЕПЛЕНИЯХ ЯДЕР ^{12}C НЕЙТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 14.1 МЭВ

© 2013 г. Р. Р. Каттабеков^{1,2}, К. З. Маматкулов^{1,3}, Д. А. Артеменков¹, В. Браднава¹, П. И. Зарубин^{1*}, И. Г. Зарубина¹, Л. Майлинг⁴, В. В. Русакова¹, А. Б. Садовский¹

Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10, № 5(182). С. 679–690

ОБЛУЧЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ ЯДРАМИ ^8He НА СЕПАРАТОРЕ ACCULINNA

Д. А. Артеменков^a, А. А. Безбах^a, В. Браднава^a, М. С. Головков^a,
А. В. Горшков^a, П. И. Зарубин^a, И. Г. Зарубина^a, Г. Каминьски^{a,b},
Н. К. Корнегруца^a, С. А. Крупко^a, К. З. Маматкулов^a,
Р. Р. Каттабеков^a, В. В. Русакова^a, Р. С. Слепнев^a,
Р. Станоева^e, С. В. Степанцов^a, А. С. Фомичев^a, В. Чудоба^{a,с}

Few-Body Syst 55:733–736
DOI 10.1007/s00601-014-0885-4

D. A. Artemenkov · A. A. Bezbakh · V. Bradnova · V. Chudoba · M. S. Golovkov
A. V. Gorshkov · Al-Z. Farrag · G. Kaminski · N. K. Kornegruitsa · S. A. Krupko
K. Z. Mamatkulov · R. R. Kattabekov · V. V. Rusakova · R. S. Slepnev · R. Stanoeva
S. V. Stepantsov · A. S. Fomichev · P. I. Zarubin · I. G. Zarubina

^8He Nuclei Stopped in Nuclear Track Emulsion

International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2015) IOP Publishing
Journal of Physics: Conference Series 675 (2016) 022022 doi:10.1088/1742-6596/675/2/022022

Study of nuclear multifragmentation induced by ultrarelativistic μ -mesons in nuclear track emulsion

D A Artemenkov^{1,2}, V Bradnova¹, E Firu³, N K Kornegruitsa¹, M Haiduc³, K Z Mamatkulov¹, R R Kattabekov¹, A Neagu³, P A Rukoyatkin¹, V V Rusakova¹, R Stanoeva⁴, A A Zaitsev^{1,5}, P I Zarubin^{1,5} and I G Zarubina^{1,5}

ОБЛУЧЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ ТЕПЛОВЫМИ НЕЙТРОНАМИ, ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ И μ -МЕЗОНАМИ

© 2015 г. Д. А. Артеменков^{1)*}, В. Браднава¹, А. А. Зайцев^{1),2)}, П. И. Зарубин¹, И. Г. Зарубина¹, Р. Р. Каттабеков^{1),3)}, К. З. Маматкулов^{1),4)}, В. В. Русакова¹



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Physics Procedia 74 (2015) 59 – 66

Physics

Procedia

Conference of Fundamental Research and Particle Physics, 18-20 February 2015, Moscow, Russian Federation

Toward an automated analysis of slow ions in nuclear track emulsion

K.Z. Mamatkulov^a, R.R. Kattabekov^a, I. Ambrozova^b, D.A. Artemenkov^{a,c}, V. Bradnova^a,
D.V. Kamanin^a, L. Majling^b, A. Marey^d, O. Ploc^b, V.V. Rusakova^a, R. Stanoeva^e,
K. Turek^b, A.A. Zaitsev^{a,f}, P.I. Zarubin^{a,f,*}, I.G. Zarubina^{a,f}

International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2015)

IOP Publishing

Journal of Physics: Conference Series 675 (2016) 022012

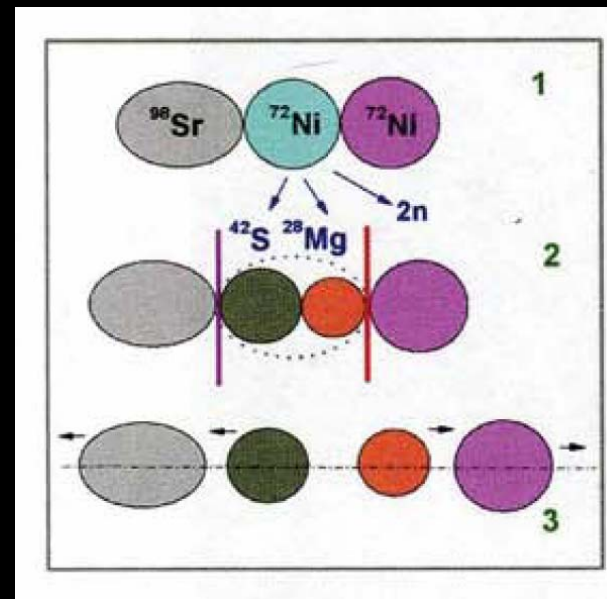
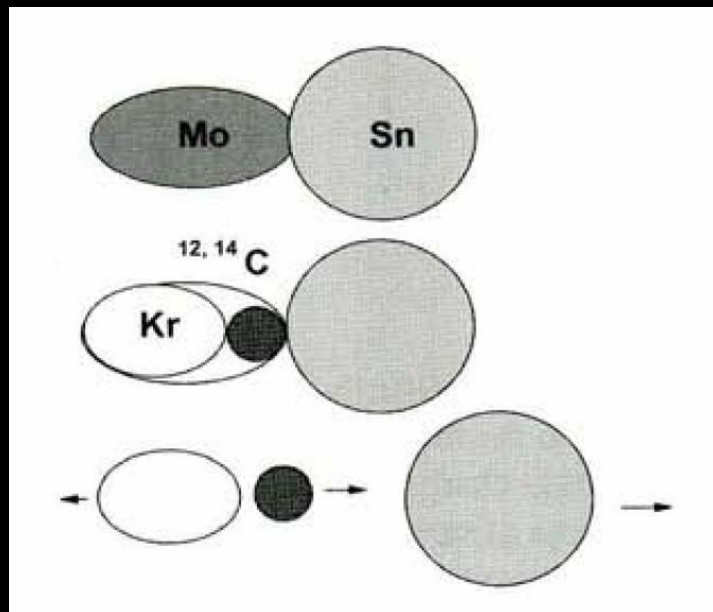
doi:10.1088/1742-6596/675/2/022012

Computer analysis of nuclear track emulsion exposed to thermal neutrons and Cf source

K Z Mamatkulov¹, I Ambrozová², D A Artemenkov^{1,3}, V Bradnova¹,
D V Kamanin¹, R R Kattabekov¹, L Majling², A Marey⁴, O Ploc²,
V V Rusakova¹, R Stanoeva⁵, K Turek², A A Zaitsev^{1,6},
P I Zarubin^{1,6} and I G Zarubina^{1,6}

В рамках проекта БЕККЕРЕЛЬ проводятся облучения опытных образцов ЯЭ, производимые предприятием МИКРОН компании «ТД Славич». Образцы создаются путем полива ЯЭ слоями толщинами от 50 до 200 мкм на стеклянную подложку. Эта ЯЭ соответствует ЯЭ с релятивистской чувствительностью типа БР-2, производство которой прервалось около десяти лет назад. Облучения ЯЭ на ускорителях и реакторах, позволяют не только выполнить калибровку для перспективных проблем, но и сделать наблюдения, имеющие самостоятельную ценность. В свою очередь такие наблюдения дают развитие самой методу ЯЭ, поскольку стимулируют получения материала для развития автоматических микроскопов и образования. Воспроизведенная ЯЭ уже использовалась для спектрометрии по пробегам α -частиц, рожденных в ядерных реакциях и распадах. Опытные облучения направлены на общий контроль качества и чувствительности ЯЭ к релятивистским частицам, а также на сравнение пробегов ядер низких энергий со значениями, вычисляемыми в программах моделирования SRIM и GEANT4.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность коллегам, сделавшим настоящий комплексный эксперимент осуществимым. Использование новых образцов ядерной эмульсии компании «Славич» стало возможным благодаря всесторонней поддержке куратора проекта О.И. Огурка (Москва), а также творческой работе сотрудников предприятия «Микрон» этой компании Ю.А. Березкиной, А.В. Кузнецова и Л.В. Балабановой (Переславль-Залесский). Большую методическую помощь в воспроизводстве технологии ядерной эмульсии оказал А.С. Михайлов (Московский киноинститут). Н.Г. Полухина (ФИАН) и А.И. Малахов (ОИЯИ) оказывали постоянное содействие нашей работе. Существенный вклад в поиск событий внесла лаборант Г.В. Стельмах (ОИЯИ). Настоящая работа была поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 12-02-00067, а также грантами полномочных представителей правительств Болгарии и Румынии в ОИЯИ.



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. 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 .

On the New Fission Processes of Uranium Nuclei

TSIEN SAN-TSIANG, HO ZAH-WEI, R. CHASTEL, AND L. VIGNERON
Laboratoire de Chimie Nucléaire du Collège de France, Paris, France
 February 13, 1947

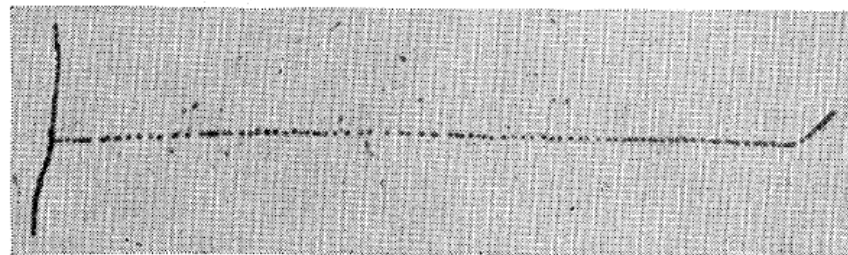


FIG. 1. Ternary fission: third fragment—mass ≈ 9 , range = 17 cm air equivalent.



FIG. 2. Ternary fission: third fragment—mass ≈ 6 , range = 44 cm air equivalent. The two branches on one of the heavy fragments are caused by nuclear collisions.

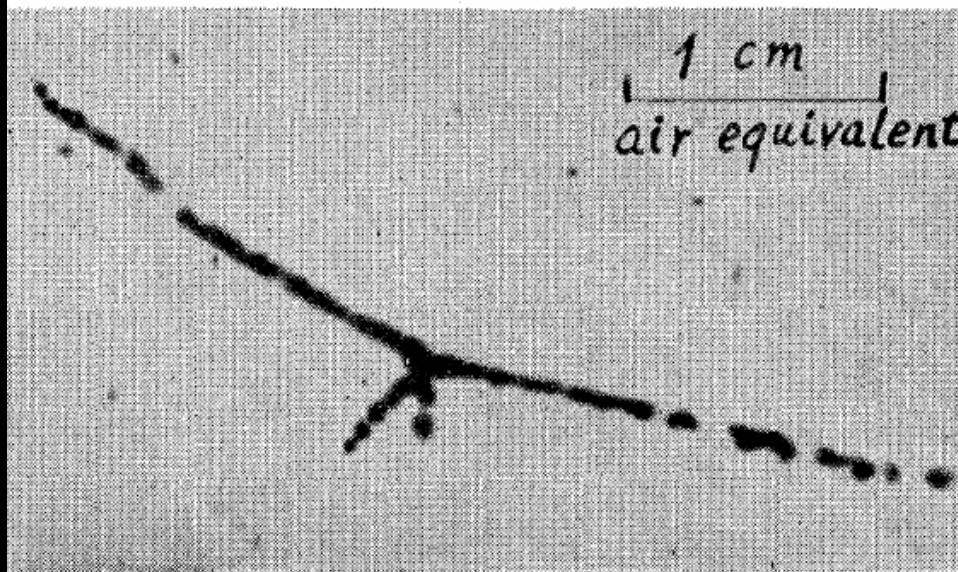


FIG. 4. Quaternary fission.

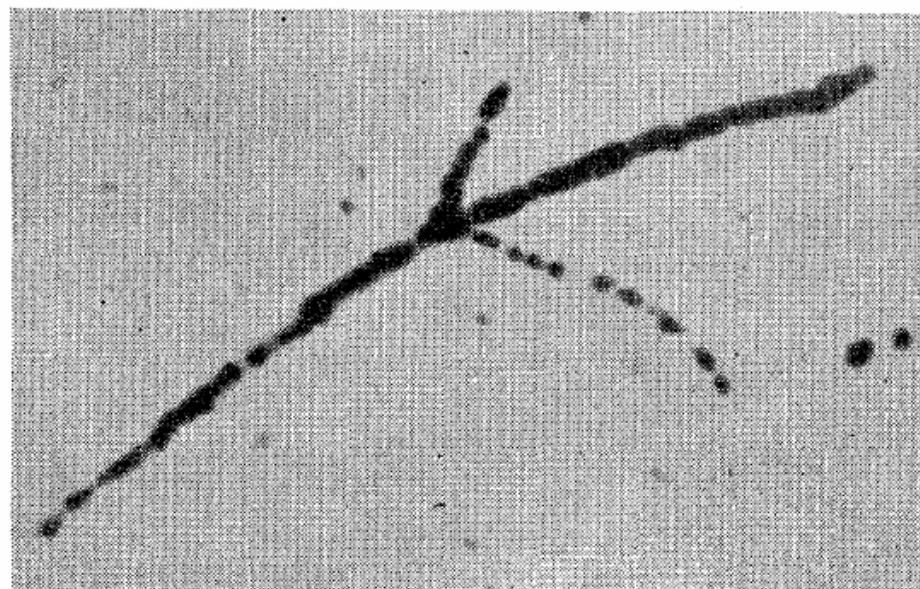
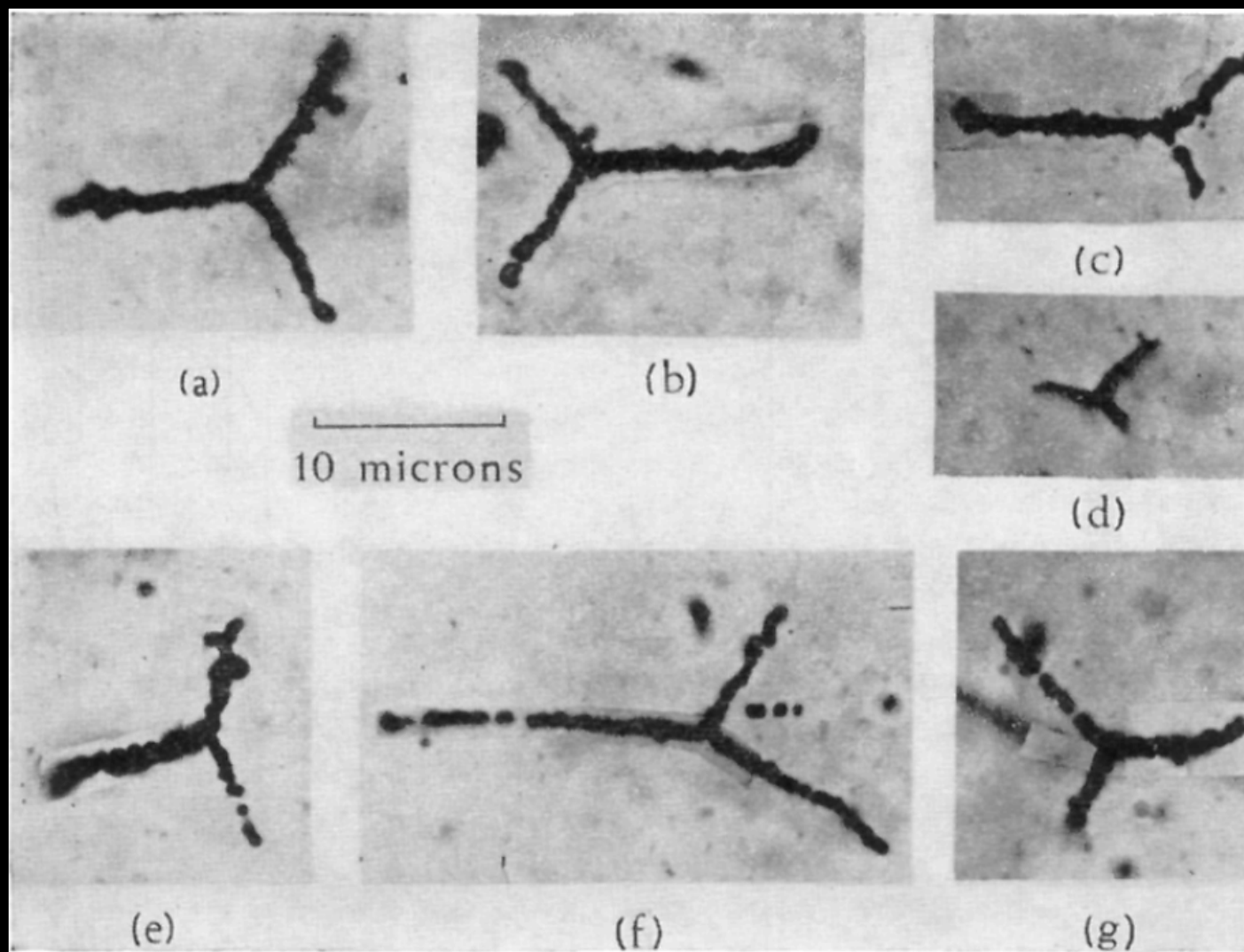


FIG. 5. Quaternary fission. (In same scale as Fig. 4.)

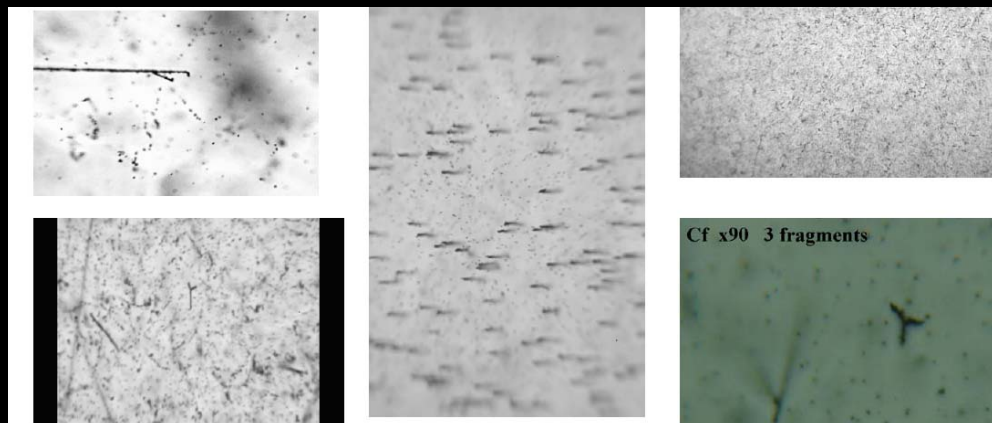
Tripartition in the Spontaneous-Fission Decay of $\text{Cf}^{252}\dagger$

M. LUIS MUGA, HARRY R. BOWMAN, AND STANLEY G. THOMPSON.

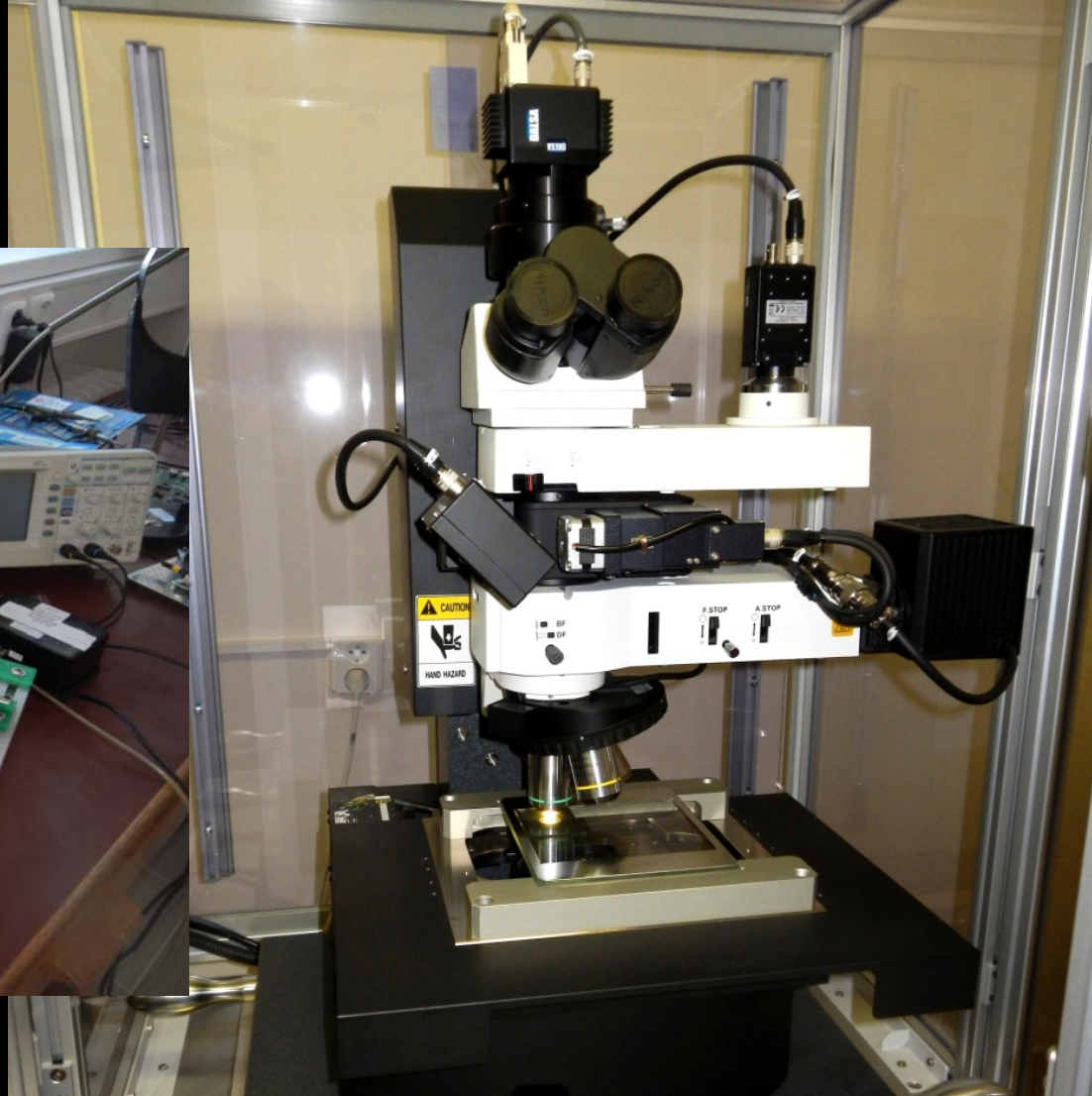
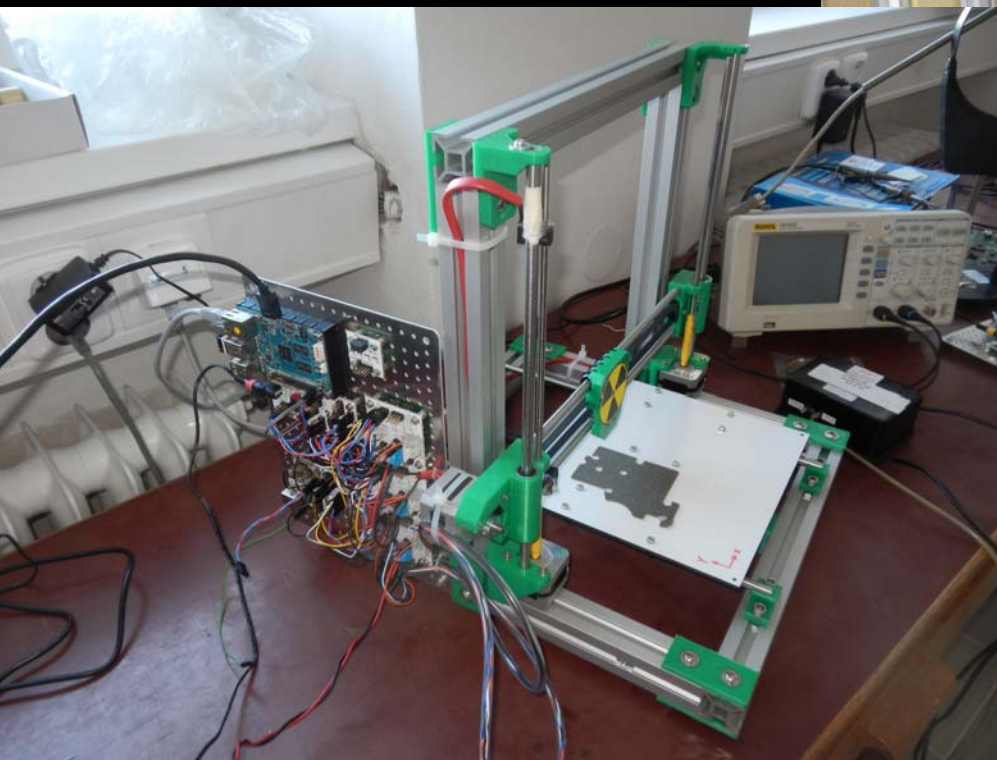
Lawrence Radiation Laboratory, University of California, Berkeley, California



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). 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 90х объективом.



Исследовались корреляции троек α -частиц в расщеплениях ядер углерода из состава ЯЭ нейтронами с энергией 14.1 МэВ. При измерении распадов ядер ^8He , имплантированных в ЯЭ, проверялись возможности α -спектрометрии, и был установлен эффект дрейфа атомов ^8He . Угловые корреляции ядер ^7Li и ^4He , рожденных в расщеплениях ядер бора тепловыми нейтронами изучались в ЯЭ, обогащенной бором. В последнем случае средний пробег ^7Li (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.



Выполнить крупномасштабное сканирование ЯЭ предложено на микроскопе HSP-1000 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 представлено ниже.

Калибровка α -частицами

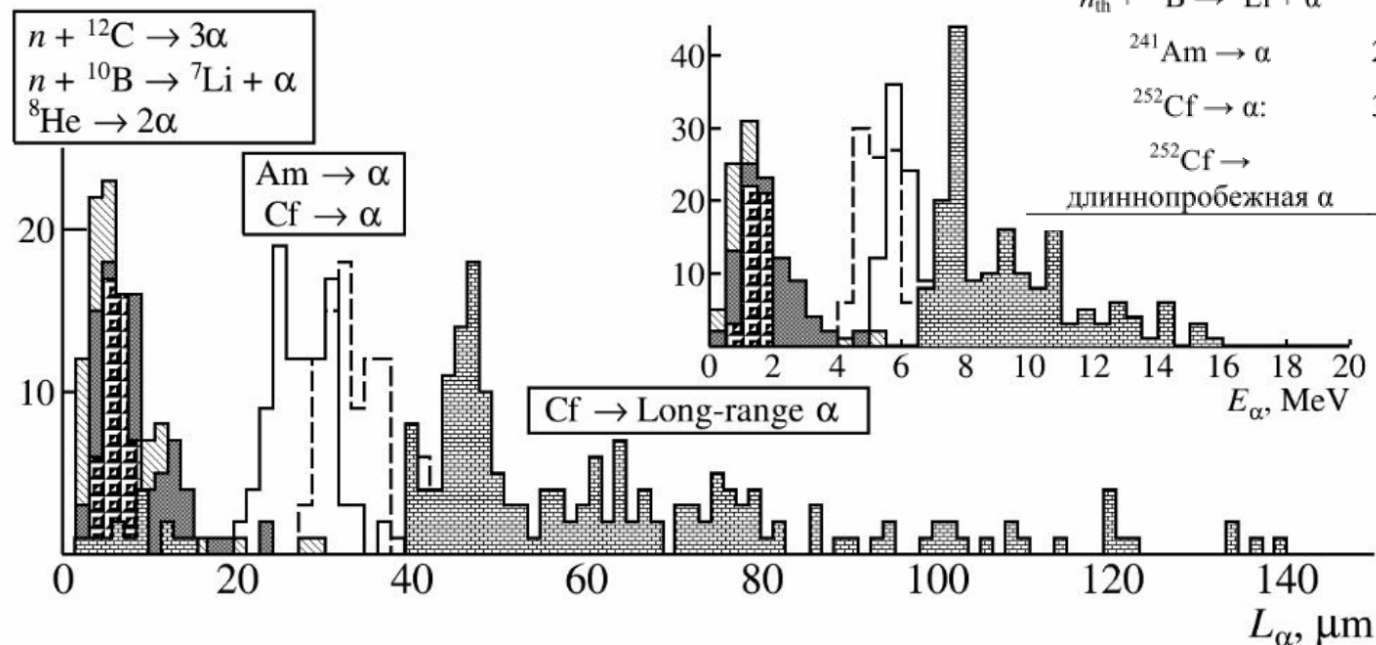


Таблица 1. Средние значения пробегов и энергии α -частиц в изучавшихся реакциях и распадах; в скобках значения RMS.

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

Поверхностные облучения образцов ЯЭ в ОРД выполнялись ручным перемещением источника

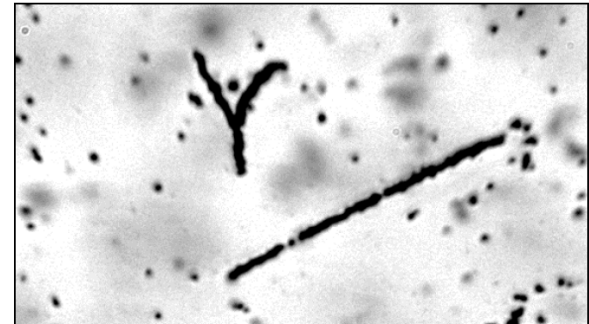
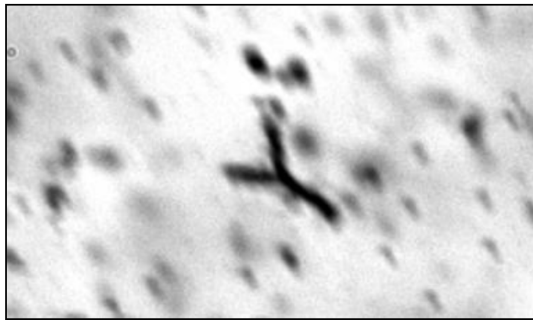
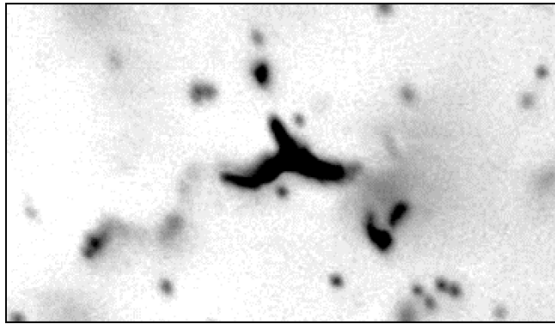
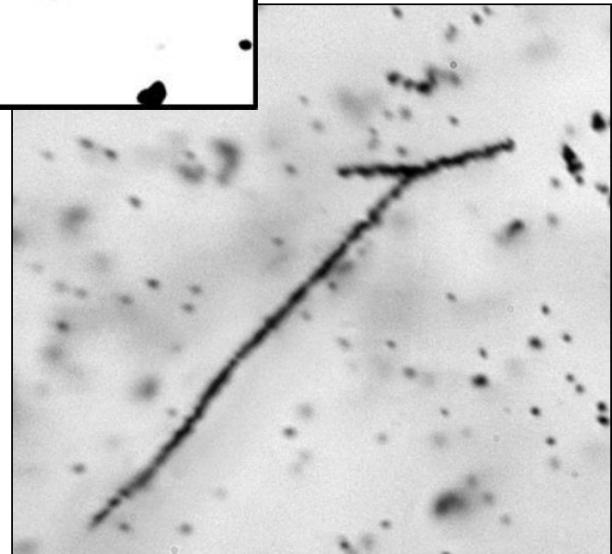
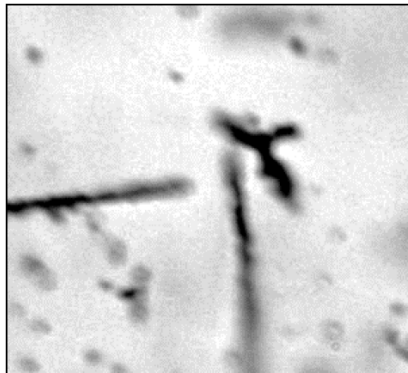
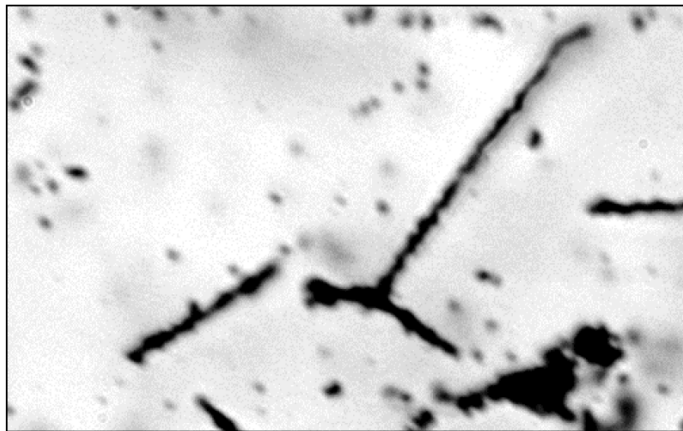
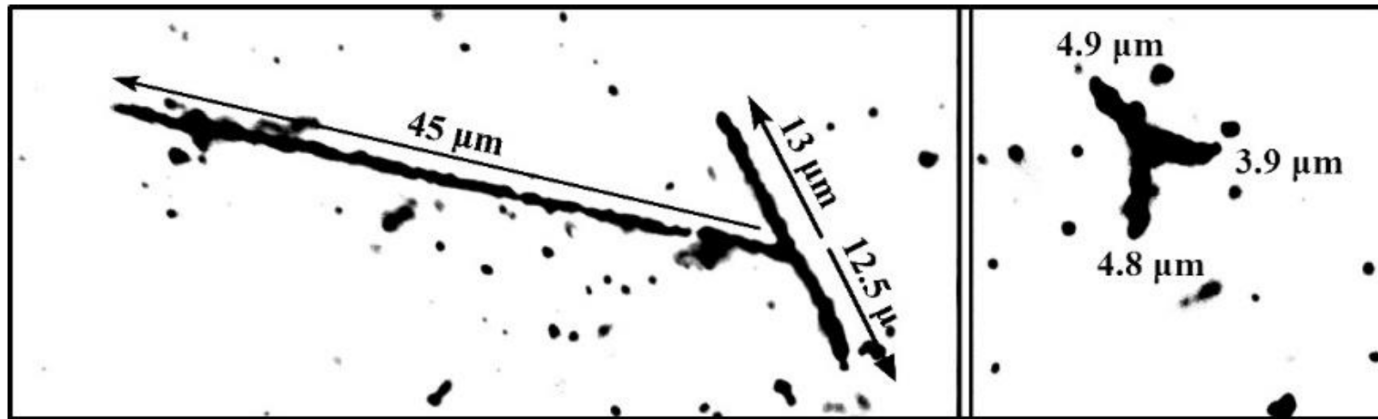
²⁵²

²⁵²

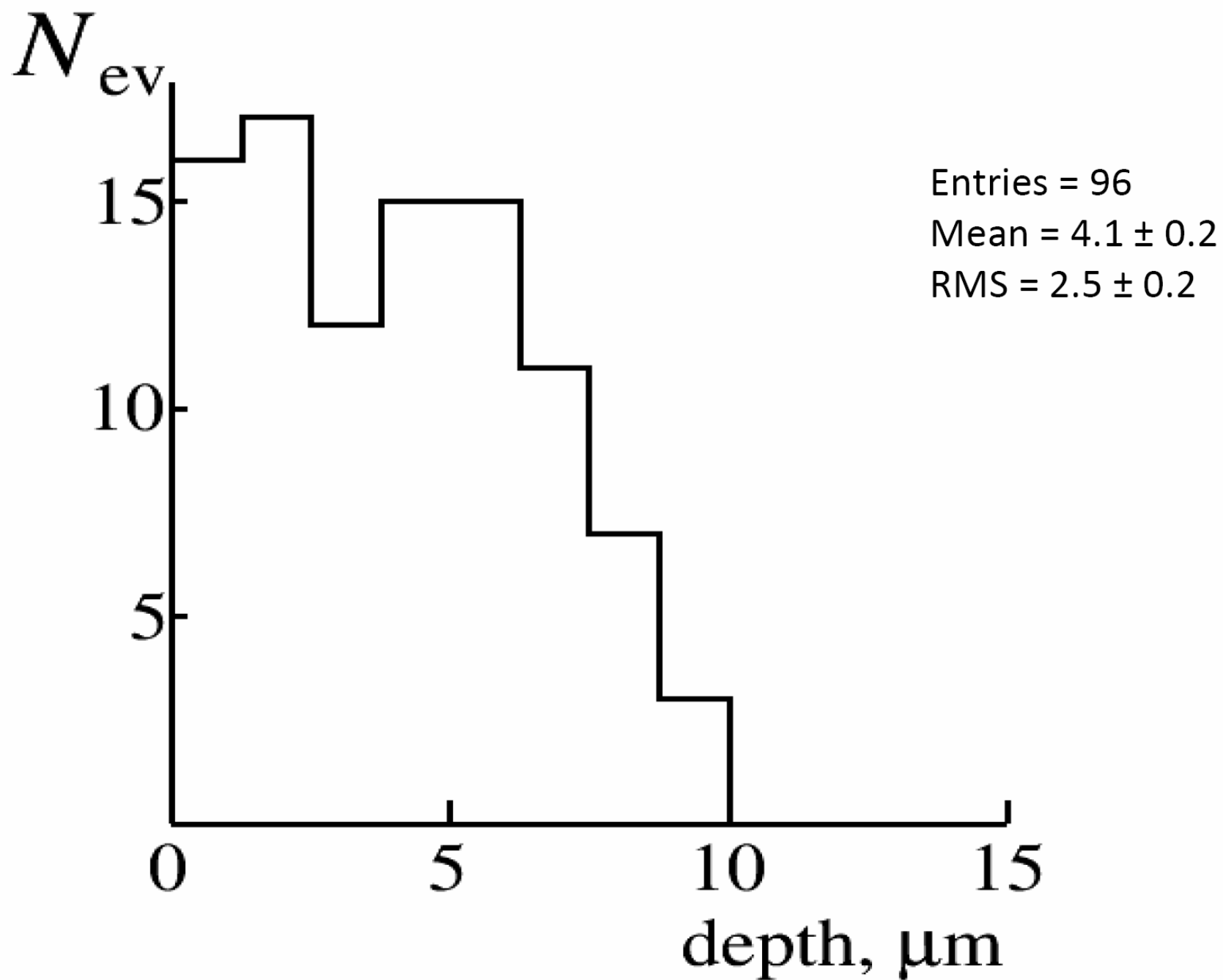
²⁵²Cf. Наиболее вероятным образом изотоп ²⁵²Cf распадается излучением α -частиц с энергией 5-6 МэВ, следы которых в основном заполняют облучаемый образец. Этот изотоп также испытывает спонтанное деление на пару или даже тройку осколков с вероятностью 3% и 0.1%, соответственно.

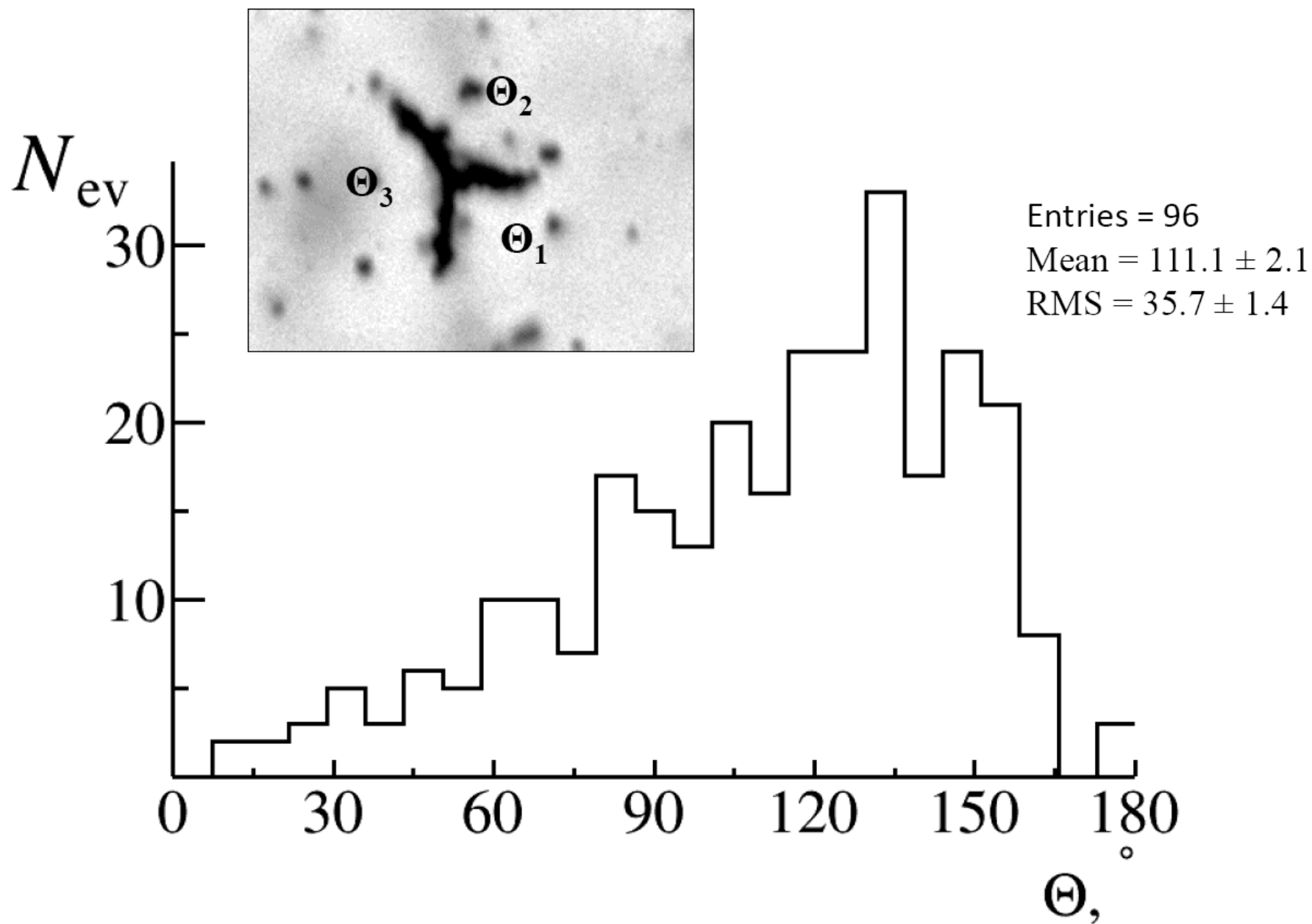
²⁴¹

Для сравнения образец ЯЭ облучался источником ²⁴¹Am, 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.



Обнаружены планарные тройки, состоящие из пар фрагментов и длиннопробежных α -частиц, а также троек осколков. 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.





Tank

Chamber

IC-100

cross-section

Beam line

Irradiation Chamber

Switchyard

1m

NTE is exposed to ions $^{86}\text{Kr}^{+17}$ and $^{124}\text{Xe}^{+26}$ accelerated to energy of about 1.24 MeV at the cyclotron IC-100 of the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR. Since energy of these ions is small the exposure of NTE is performed without a light protective paper. Therefore, fixing of the NTE plates in the irradiation chamber was performed at lighting which is ordinary for a photographic laboratory. For 5 seconds of exposure the track density amounted to about $10^5 - 10^6 \text{ cm}^{-2}$.

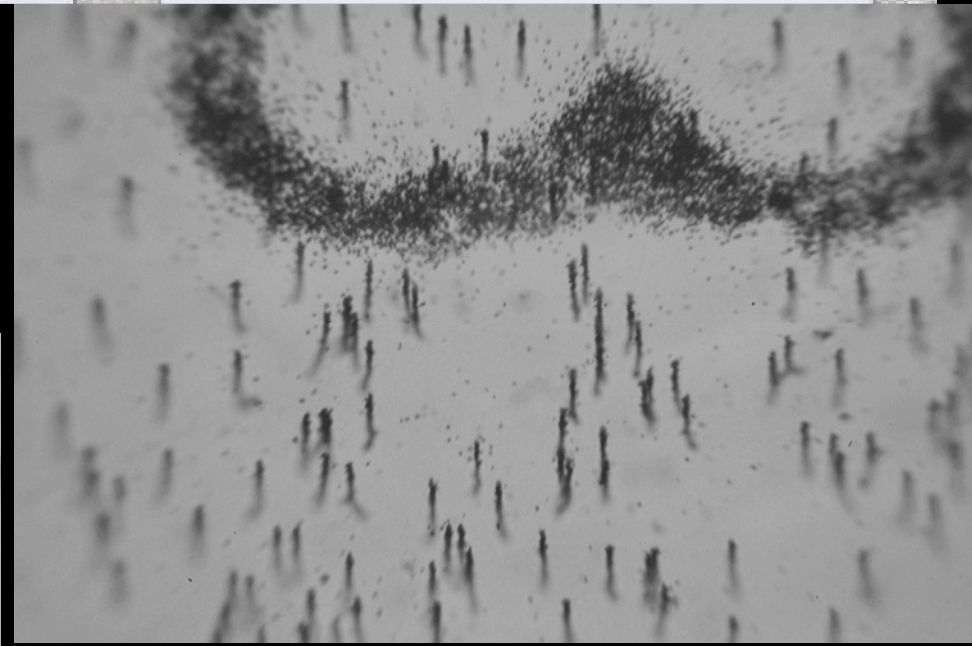
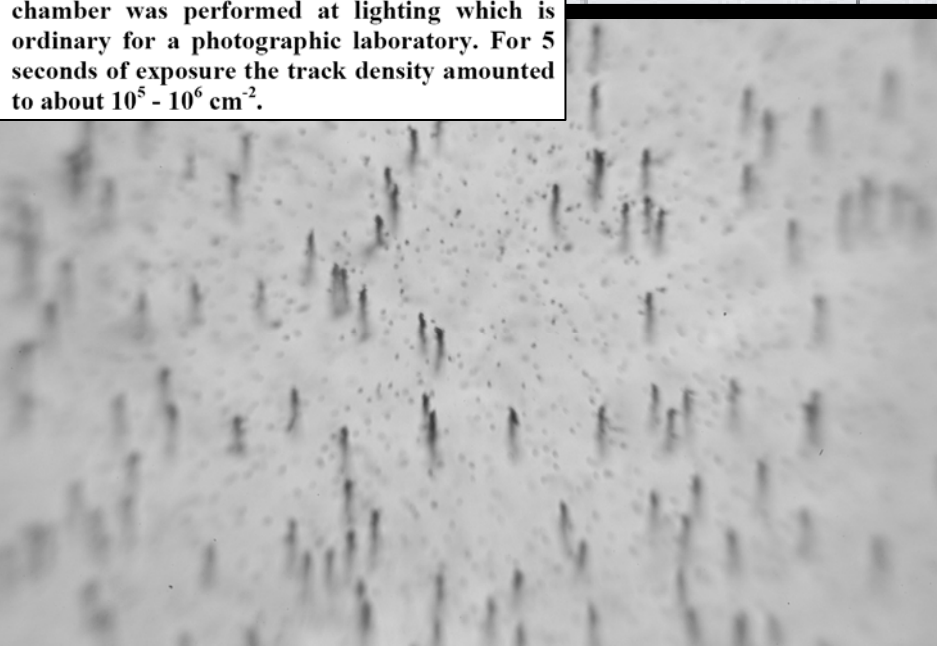


Таблица 2. Средние значения пробегов ионов (μm);
в скобках значения RMS

Калибровки тяжелыми ионами

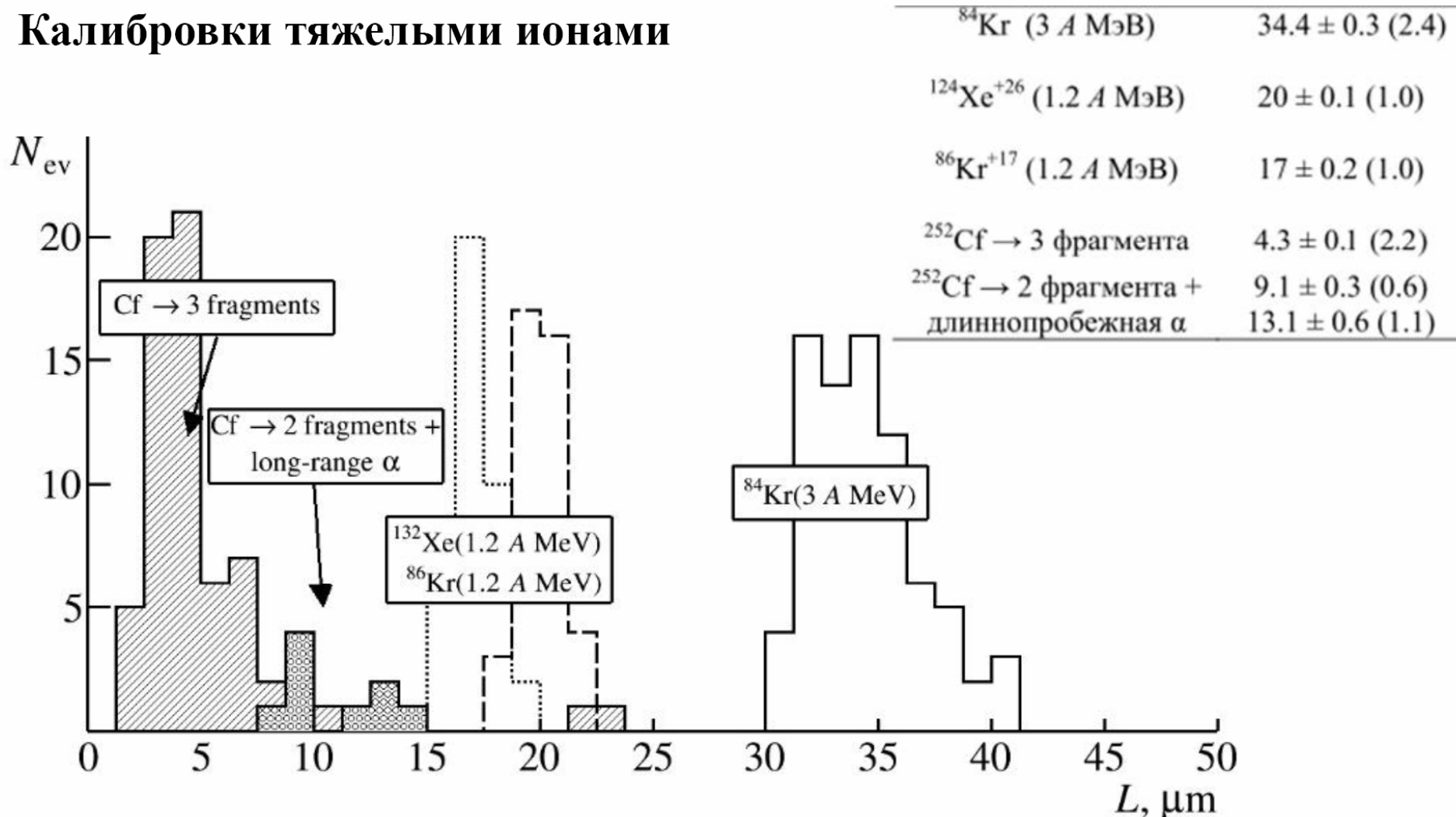


Рис. 2. Распределения пробегов ионов ^{84}Kr , ^{132}Xe , ^{86}Kr и в распадах $\text{Cf} \rightarrow 3$ осколка и $\text{Cf} \rightarrow 2$ осколка + длиннопробежная α .

^{84}Kr (3 A МэВ)	34.4 ± 0.3 (2.4)
$^{124}\text{Xe}^{+26}$ (1.2 A МэВ)	20 ± 0.1 (1.0)
$^{86}\text{Kr}^{+17}$ (1.2 A МэВ)	17 ± 0.2 (1.0)
$^{252}\text{Cf} \rightarrow 3$ фрагмента	4.3 ± 0.1 (2.2)
$^{252}\text{Cf} \rightarrow 2$ фрагмента + длиннопробежная α	9.1 ± 0.3 (0.6) 13.1 ± 0.6 (1.1)

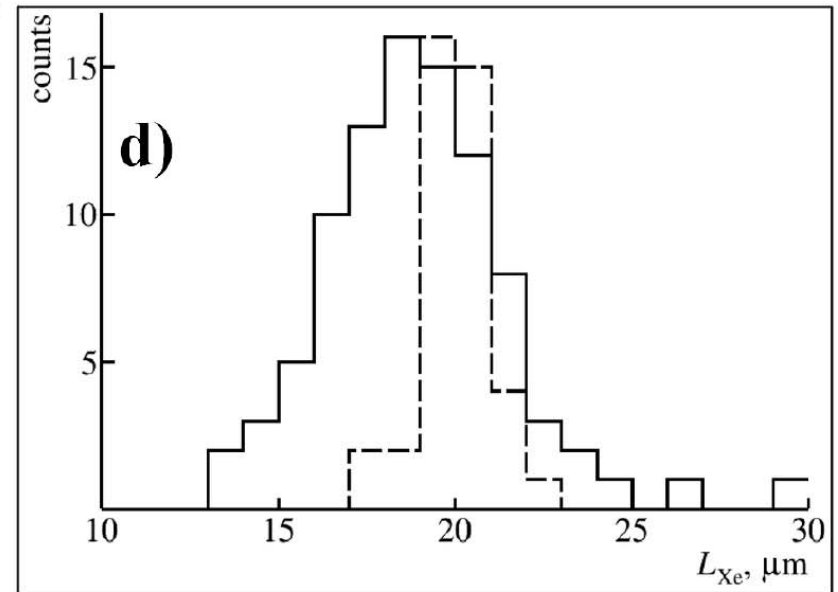
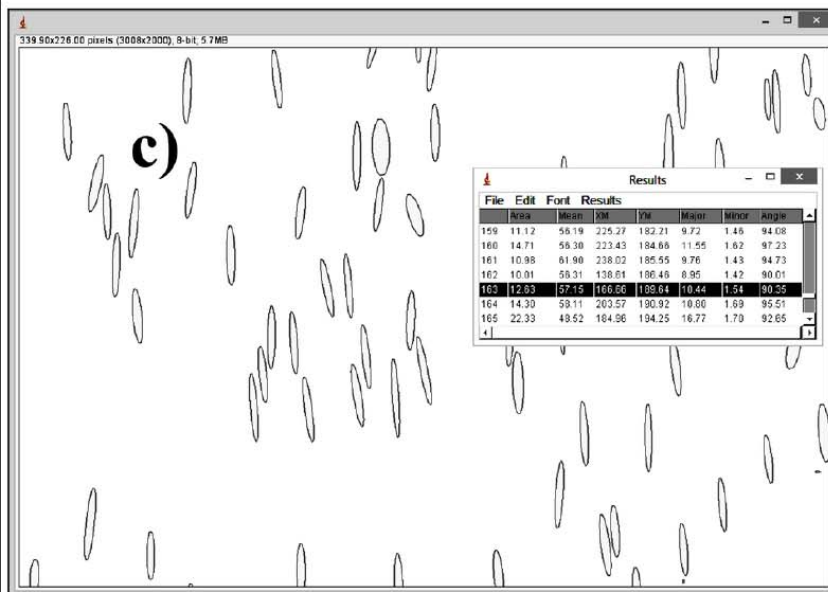
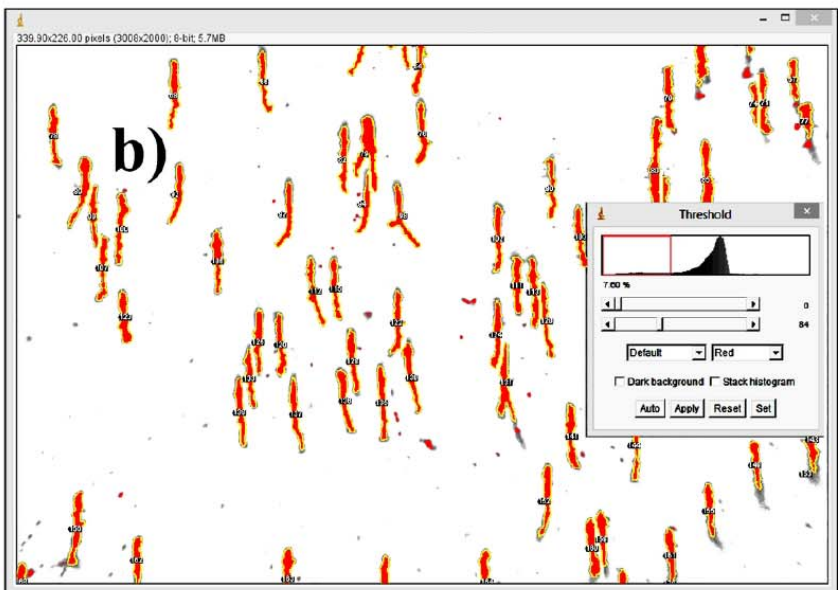
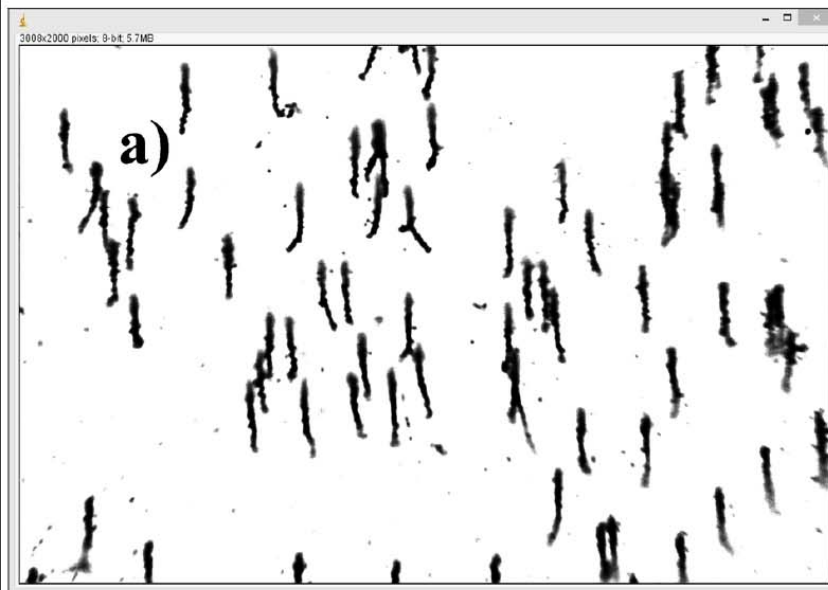


Fig. 5. Stages of computer analysis: (a) initial close-up, (b) finding of track images, (c) description of them as ellipses and (d) ion range distribution in computer (solid line) and manual (dashed line) analysis.

Dear Dr. Zarubin,

We are pleased to present to you as a corresponding author, an overview of the

performance of your article in Physics Procedia. With Article Usage Alerts, a free service,

you are able to measure the impact of your article via its usage on ScienceDirect.

**Your article has been downloaded or
viewed 61 times since publication.**

For more details, please check here for your Article Usage Dashboard:

[View Dashboard](#)

For best results use Google Chrome or Firefox.

This information is generated especially for you, however if you would like to share your results and/or

article with peers, feel free to send it through via email or the social media buttons in the Dashboard.

If you have any questions about this service, please consult our [Support site](#).

You receive this email as a service, however if you would like to stop receiving alerts, please use the unsubscribe option below.

You will receive quarterly Article Usage Alerts in the first year after publication of your article.

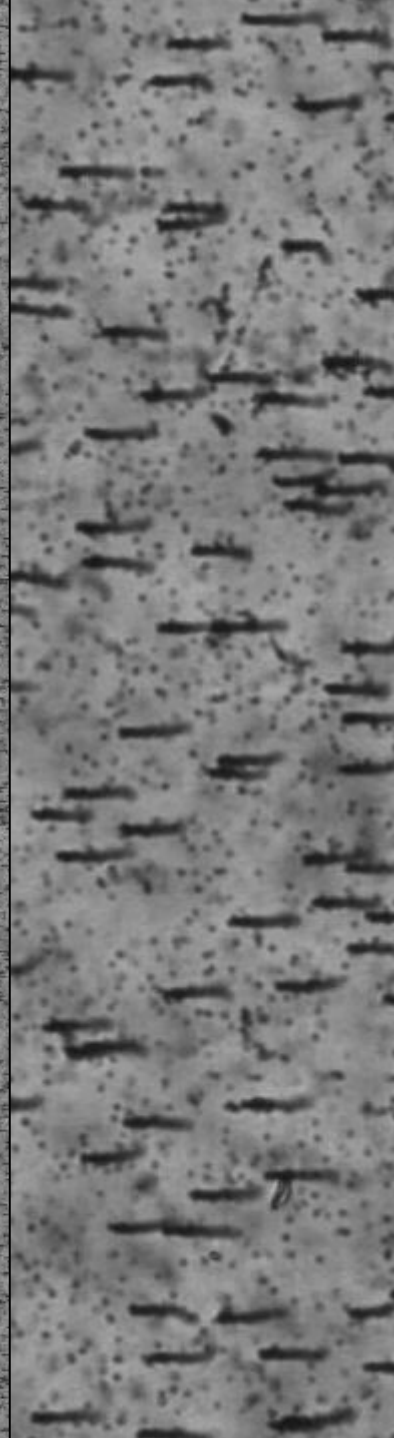
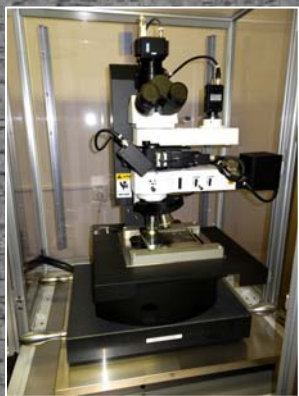
If you would like to check your article more often, the information on the dashboard will be updated monthly.

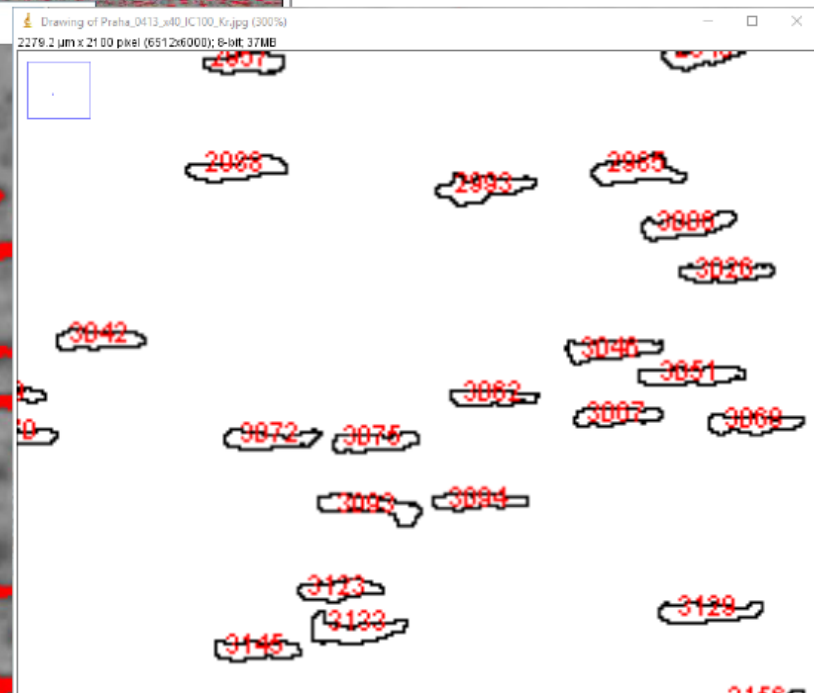
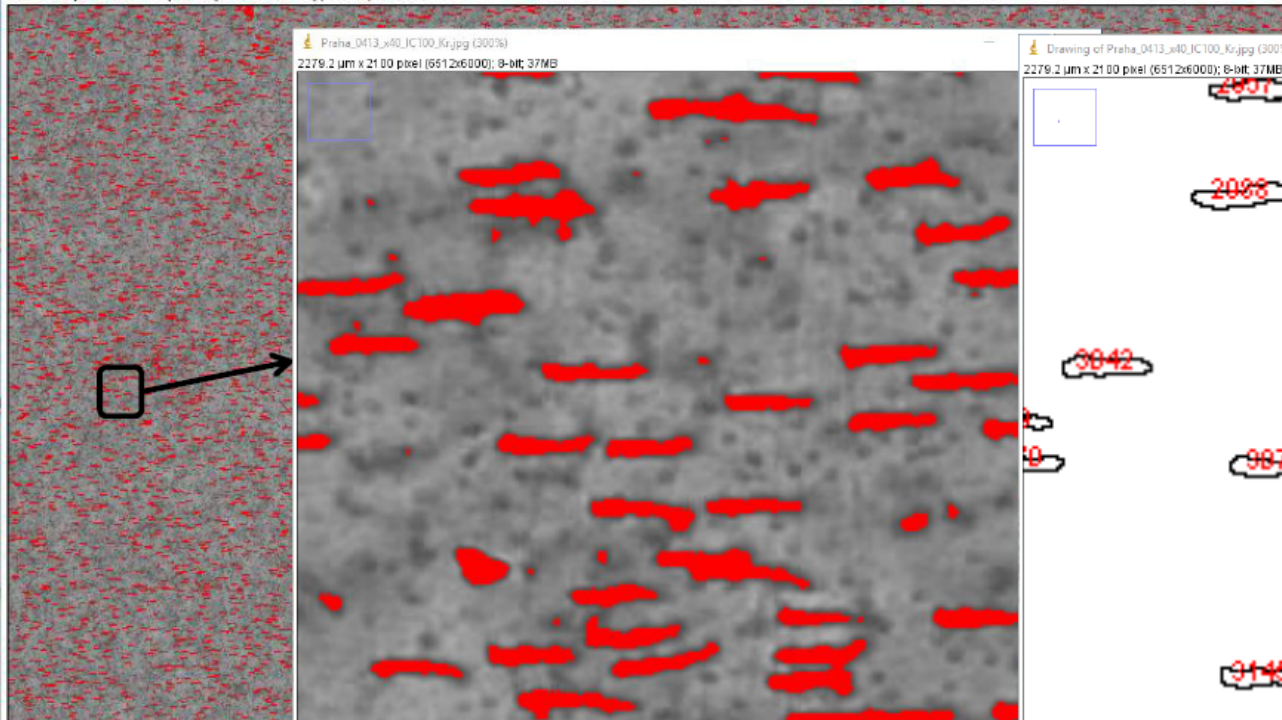
We suggest you bookmark the page and refer back to it.

Thank you for your interest.

Best wishes,

Elsevier

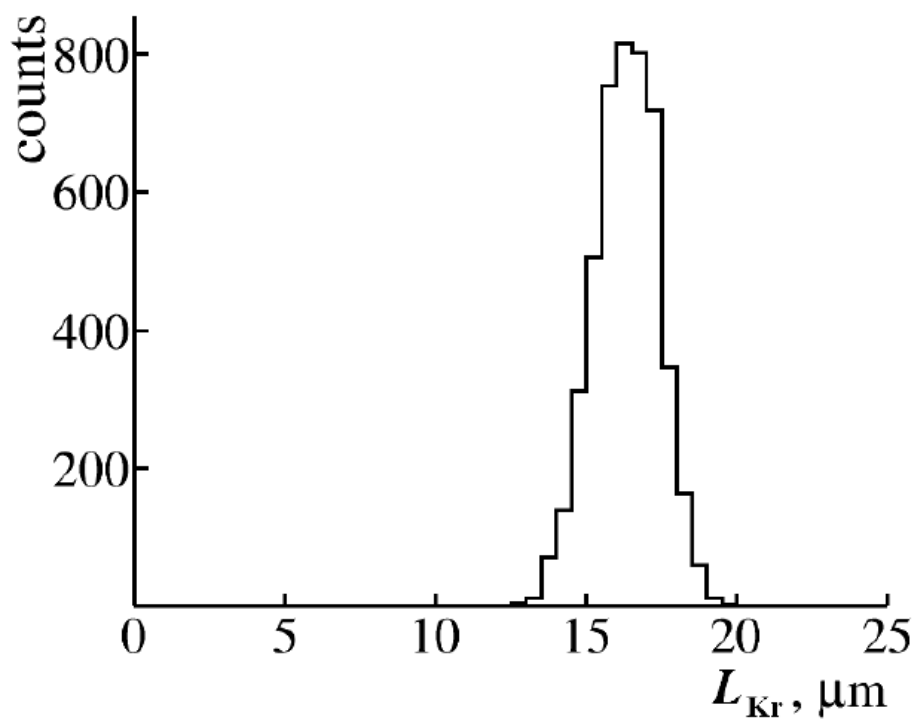




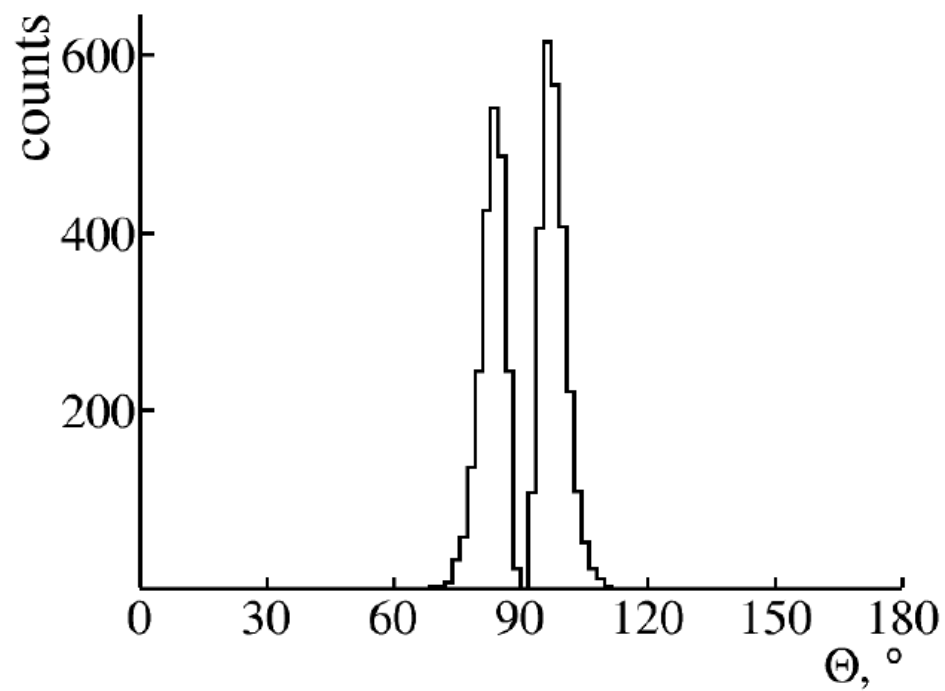
Results

File Edit Font Results

	Area	X	Y	Perim.	Major	Minor	Angle	Circ.	Feret	FeretX	FeretY	FeretAngle	MinFeret	AR	Round
3182	15.312	548.773	1314.083	23.730	11.515	1.693	4.694	0.342	10.990	543.550	1314.950	9.162	1.907	6.801	0.147
3183	25.602	208.164	1315.026	30.044	10.302	3.164	2.184	0.356	11.336	202.650	1315.650	8.881	4.729	3.256	0.307
3184	22.662	748.806	1314.813	27.364	11.655	2.476	176.318	0.380	11.465	743.400	1313.550	167.661	3.121	4.708	0.212
3185	16.292	623.072	1314.512	23.730	11.391	1.821	0.947	0.364	10.901	617.750	1314.950	5.528	2.098	6.255	0.160
3186	16.905	1175.295	1315.224	23.984	10.918	1.971	4.026	0.369	10.523	1170.050	1314.950	176.186	2.591	5.538	0.181
3187	21.560	1502.451	1315.145	22.584	9.231	2.974	0.784	0.531	9.267	1498.000	1314.600	169.114	3.500	3.104	0.322
3188	23.397	943.595	1315.473	25.420	11.721	2.542	3.319	0.455	11.336	938.000	1316.350	8.881	2.800	4.612	0.217
3189	22.417	2158.895	1315.555	25.589	10.935	2.610	2.810	0.430	10.365	2153.550	1316.000	11.689	3.150	4.189	0.239

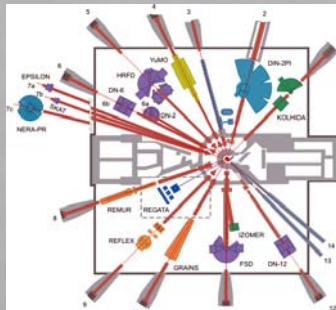


Mean = 16.4 ± 0.01 (1.1)

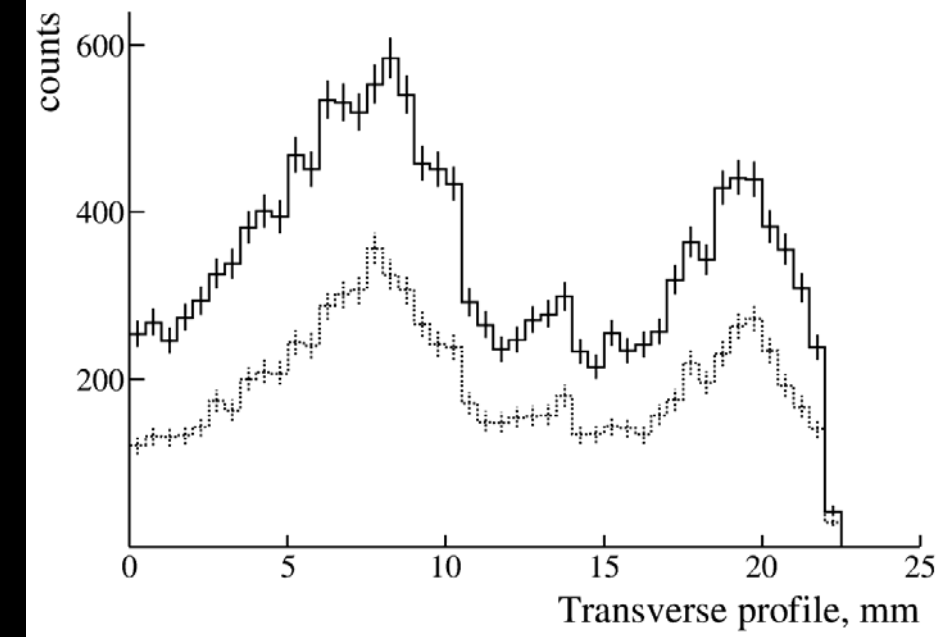
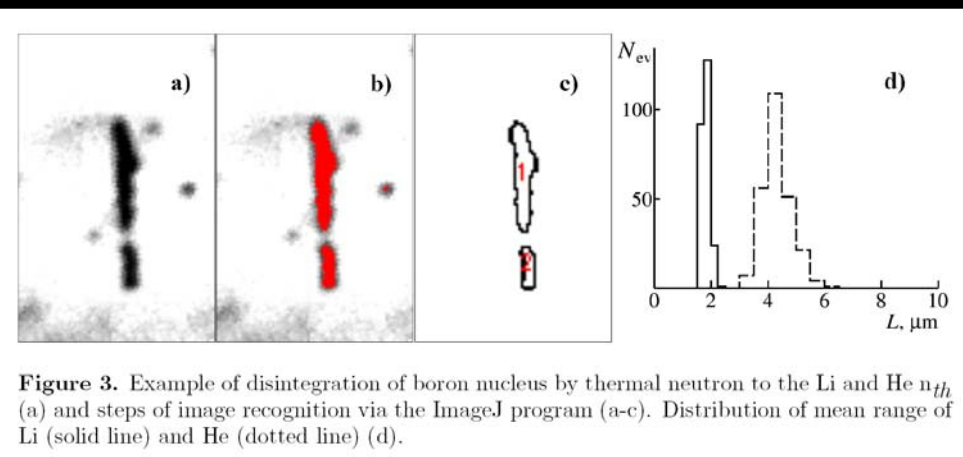
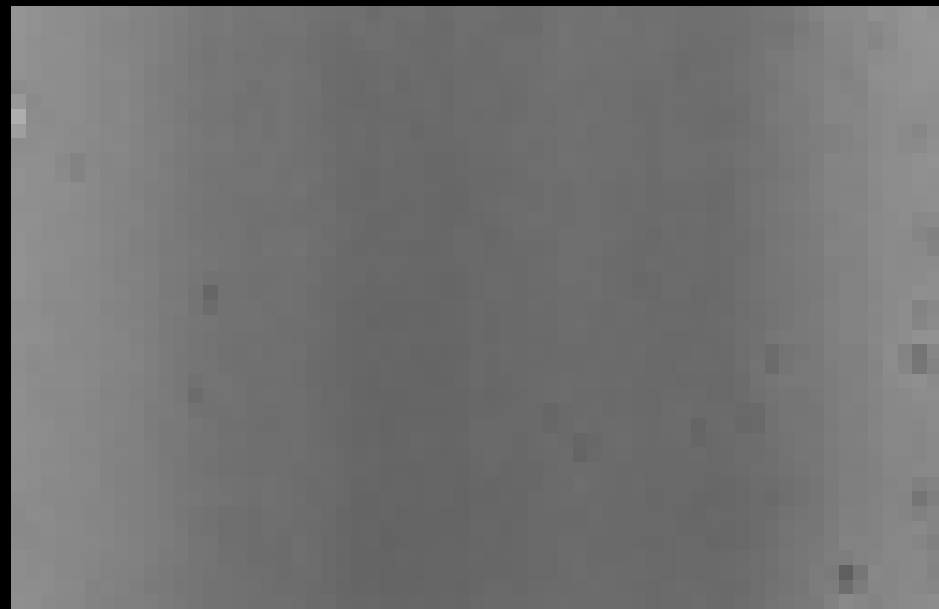
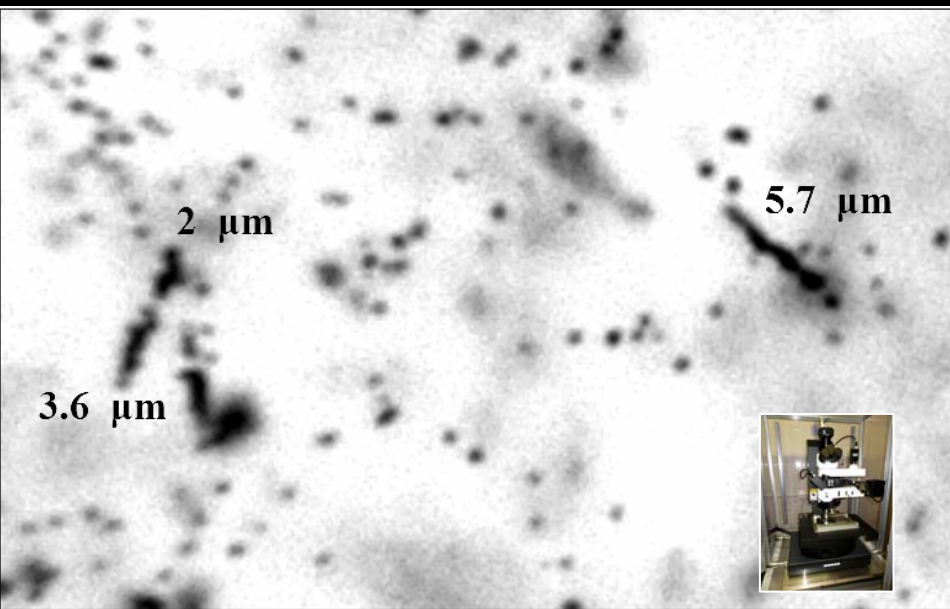


Mean = 83.1 ± 0.1 (3.1)

Mean = 98.1 ± 0.1 (3.1)



26CB-213



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 $\mu\text{м}$. 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 трансфермиевых 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.

