



Секция ядерной физики ОФН РАН
Объединённый институт ядерных исследований

**Облучение трековых детекторов в
пучках ионов ксенона на
ускорительном комплексе
Нуклотрон/NICA**

***Зайцев Андрей
ЛФВЭ ОИЯИ***

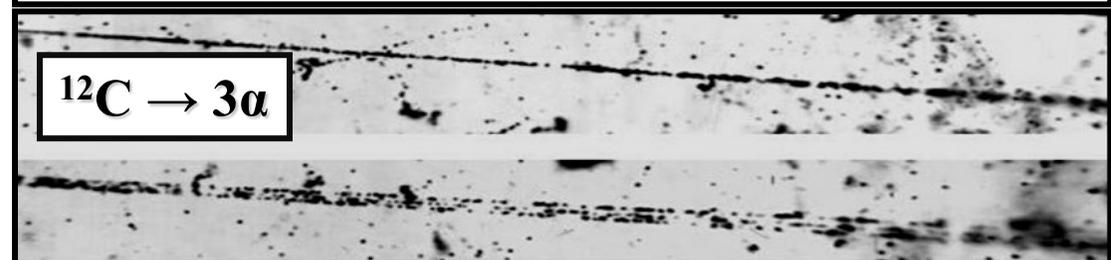
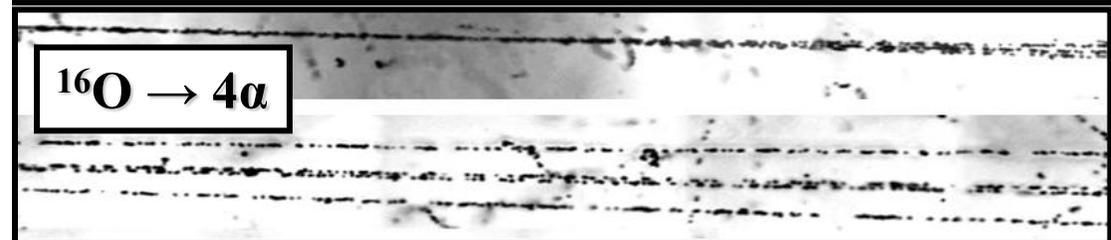
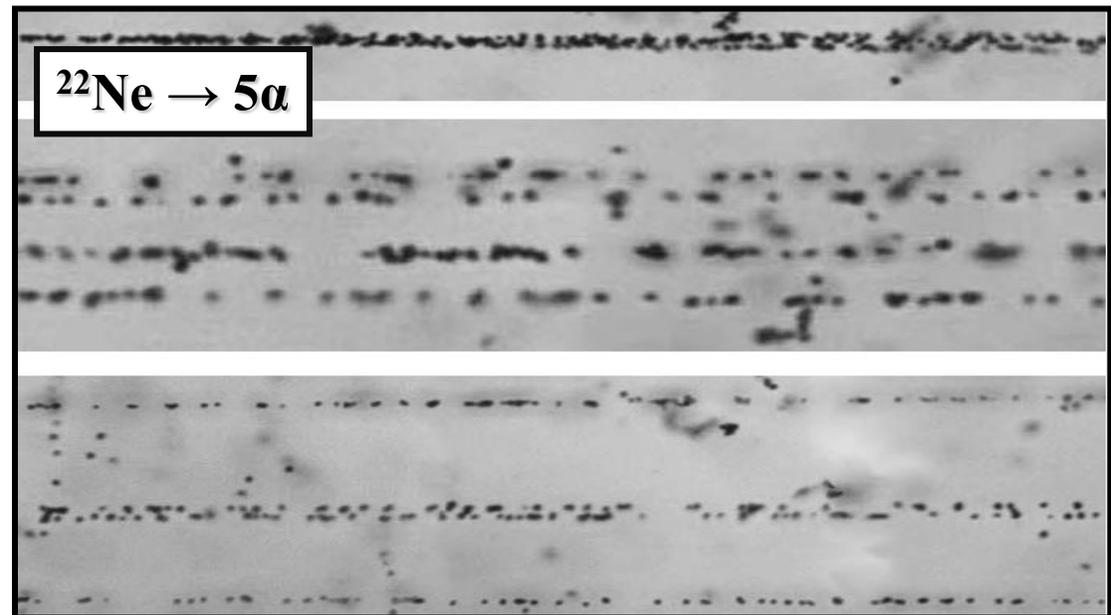


Мотивация

- **Фильмовая регистрация треков ускоренных ядер Хе**
 - **Исследование множественной фрагментации тяжелых ядер**
 - **Изучение образования нестабильных ядерных состояний в процессах релятивистской фрагментации**
 - **Изотопический анализ состава фрагментов налетающего ядра**
 - **Профилометрия пучков ионов Хе методом ТТД**
-



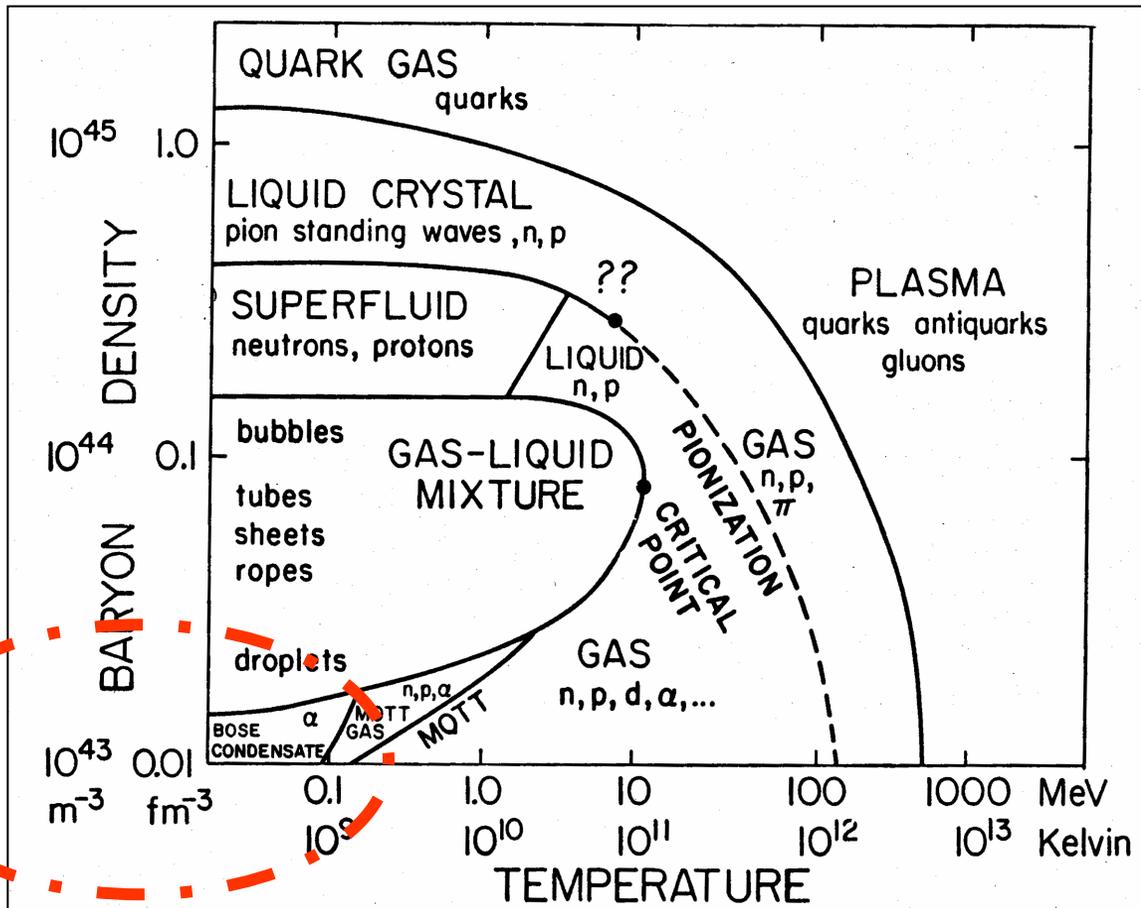
События периферической диссоциации, отражающие индивидуальные особенности налетающих ядер, наблюдаются в ЯЭ также часто и полно, как и центральные соударения. Они указывают на принципиальную возможность изучения ядерной структуры в конусе релятивистской фрагментации. Однако в таком аспекте применение традиционных магнитных спектрометров с координатными и сцинтилляционными детекторами оказалось весьма ограниченным. Возникшие сложности обусловлены драматической разницей в ионизации ядер пучка и релятивистских фрагментов при их крайне малой угловой расходимости, и, зачастую, примерным совпадением по магнитной жесткости. По этим причинам осуществлялась постановка измерений с регистрацией релятивистских фрагментов максимально близких по заряду к изучаемому ядру.



Alpha-Clusters in Nuclear Systems

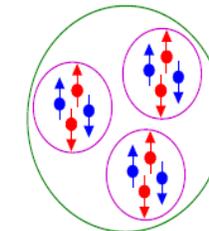
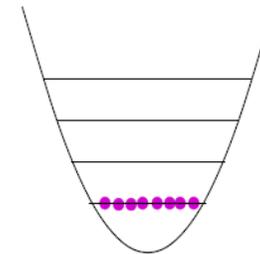
P. Schuck

Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Röpke,
A. Tohsaki, W. von Oertzen and T. Yamada

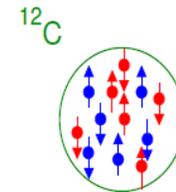


Bosons

Back to nuclei

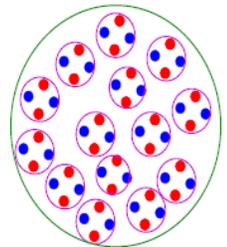


0_2^+ 7,65 MeV



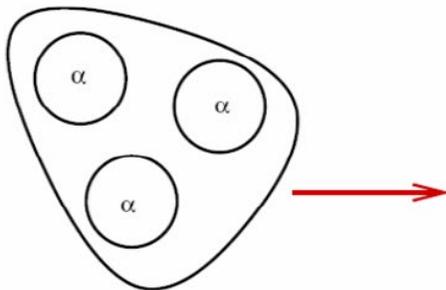
0_1^+

many α 's
→ condensate



strong cluster phenomena in lighter nuclei

If O_2^+ in ^{12}C dilute α -state

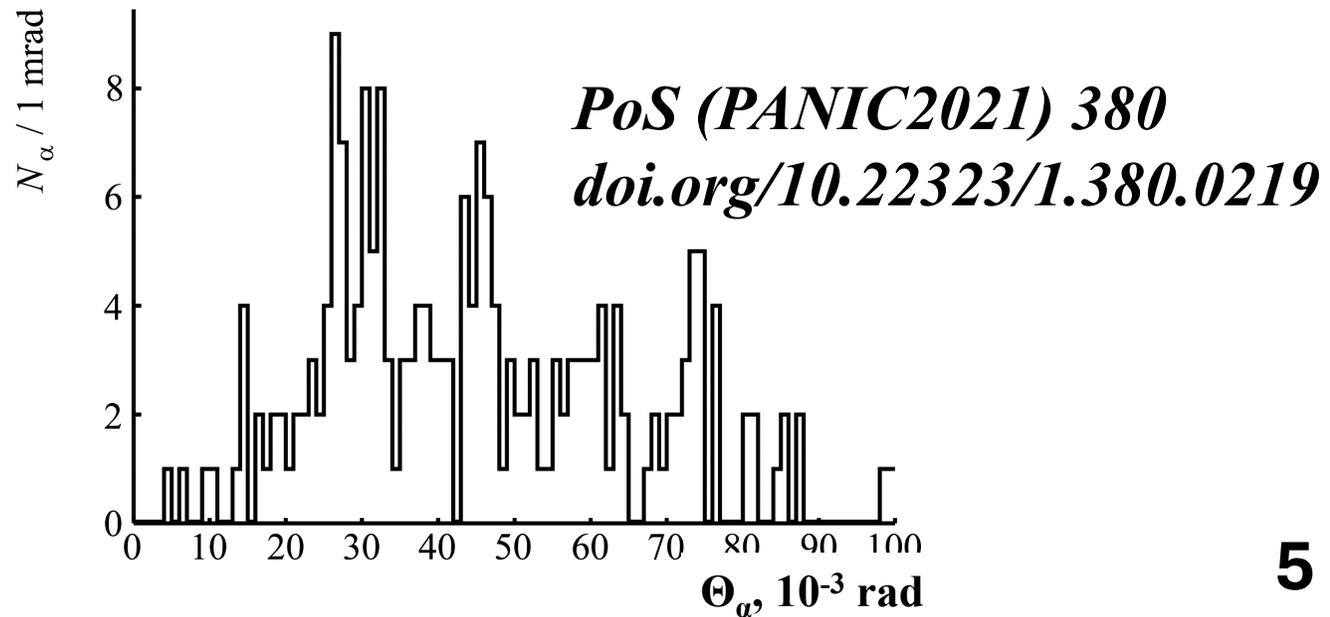
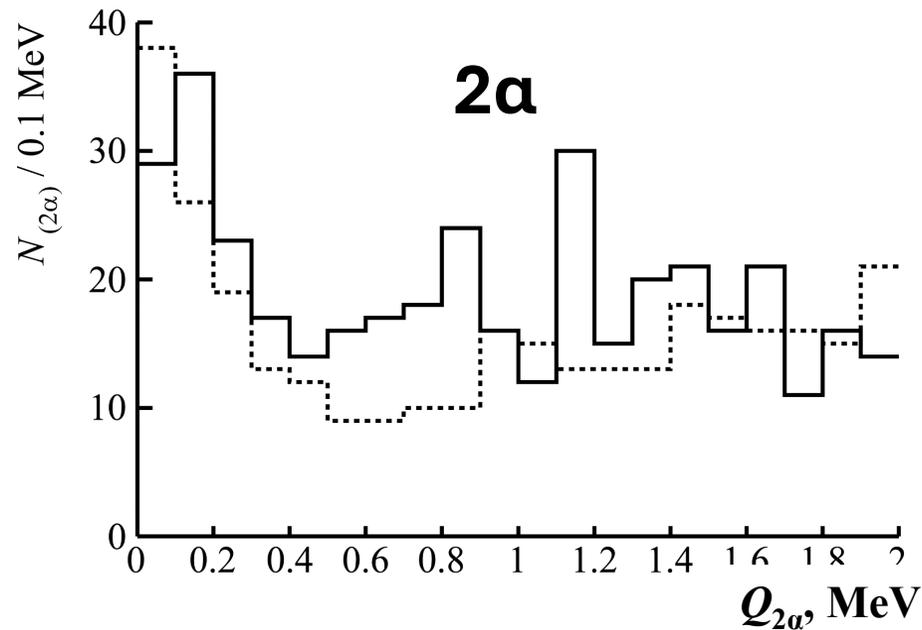
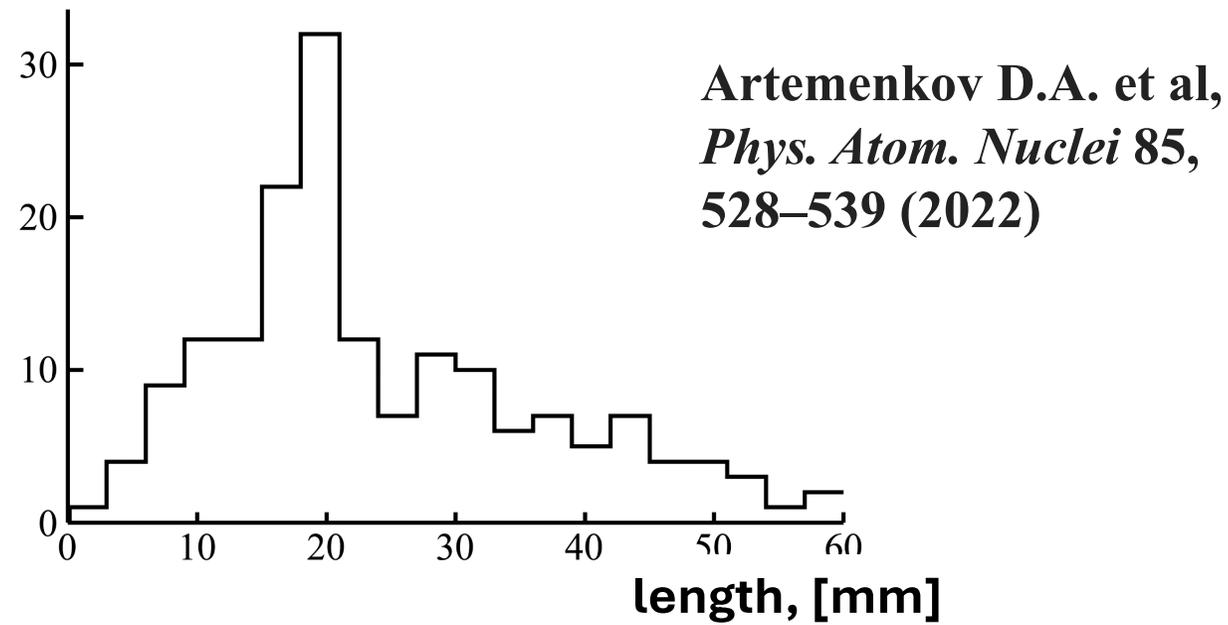
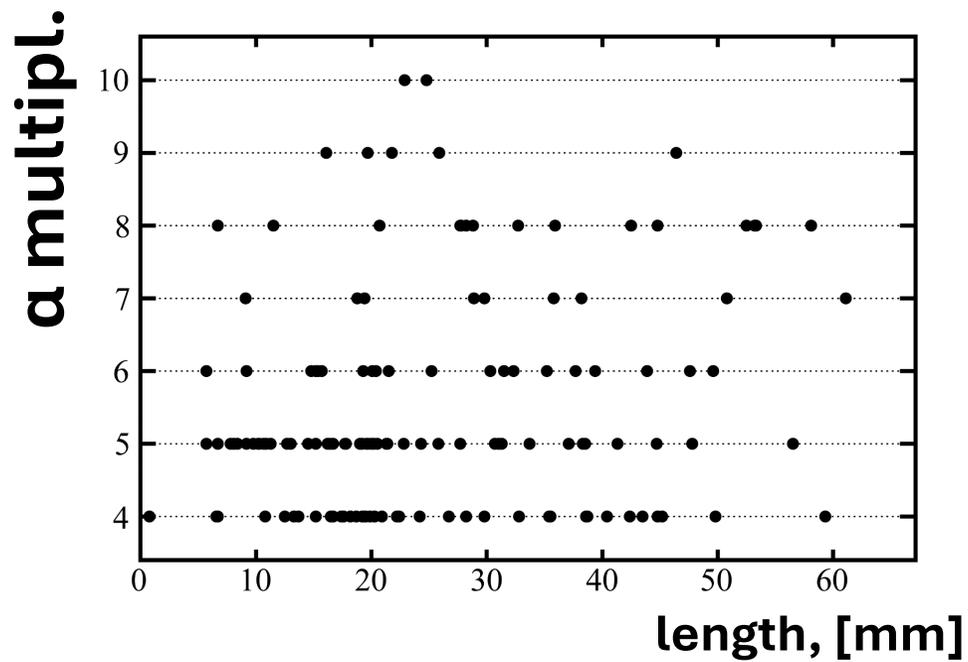


then α -condensate

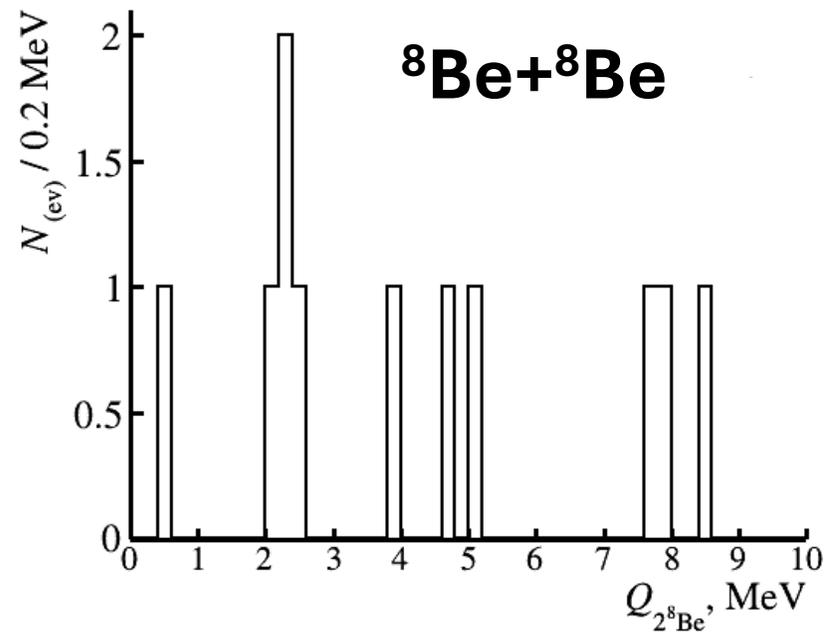
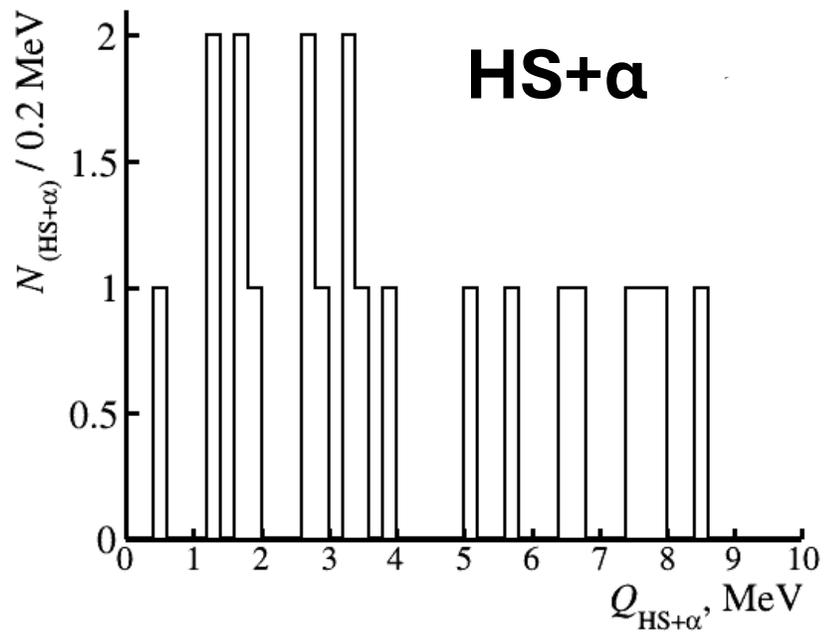
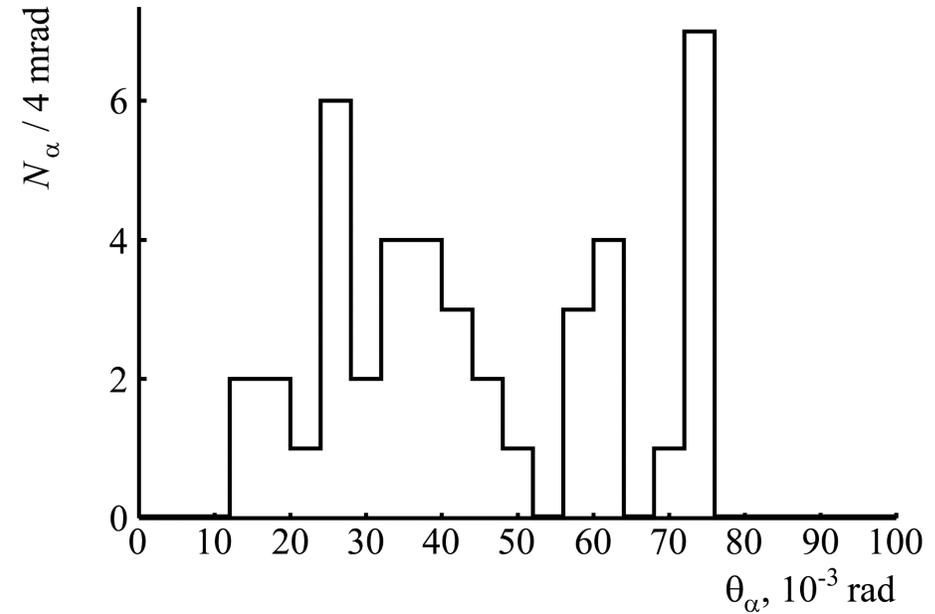
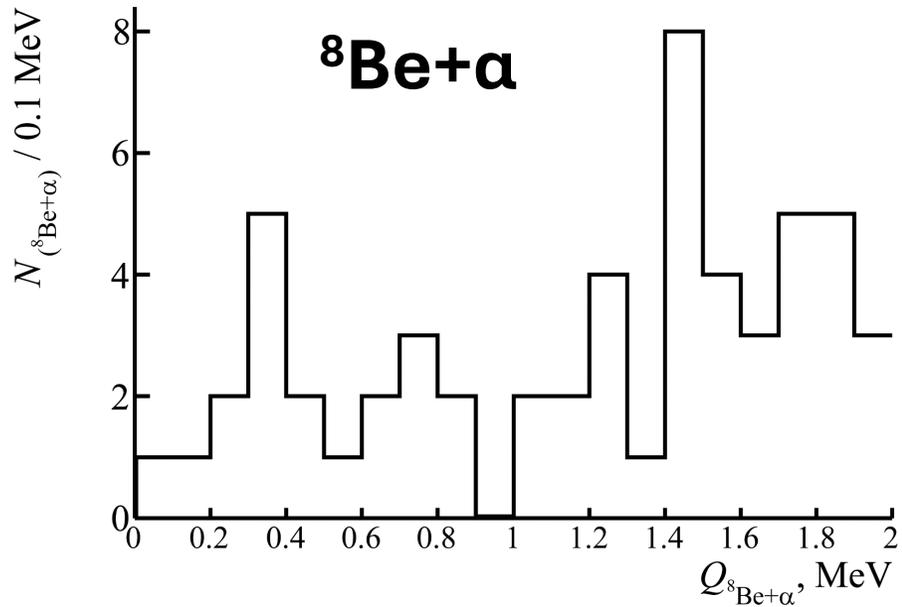
infinite matter $\rho_{\text{crit}} \sim \frac{\rho_0}{3}$

● proton
● neutron
○ alpha

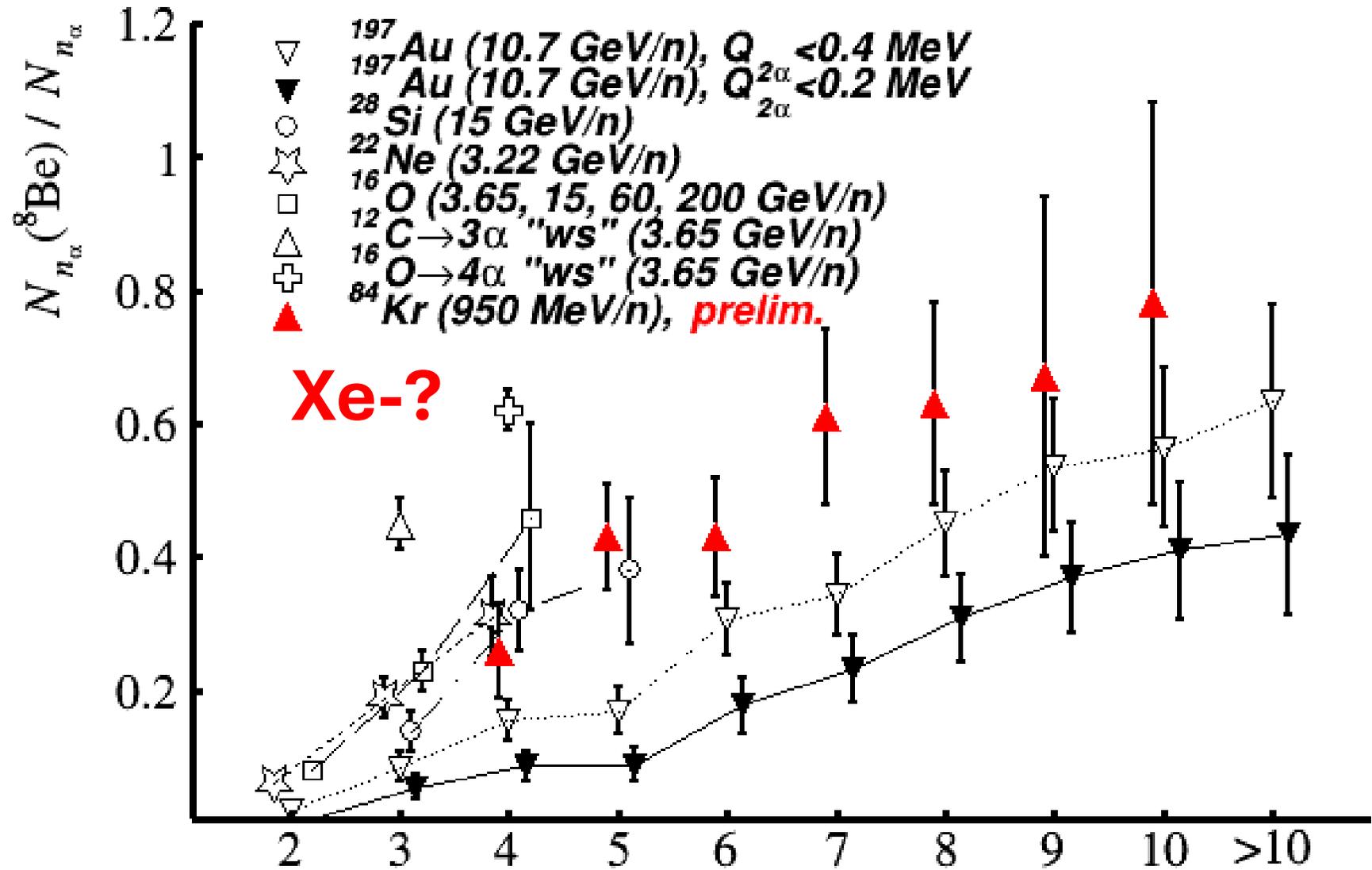
Поиск $N\alpha$ состояний в диссоциации ^{84}Kr (950 А МэВ)



Поиск Na состояний в диссоциации ^{84}Kr



Корреляция образования ядра ${}^8\text{Be}$ и множественности α -частиц

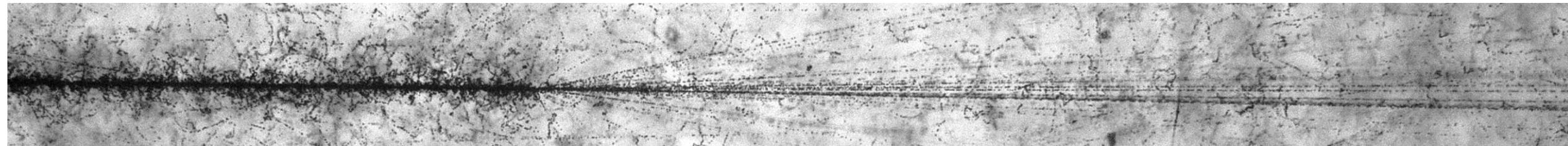
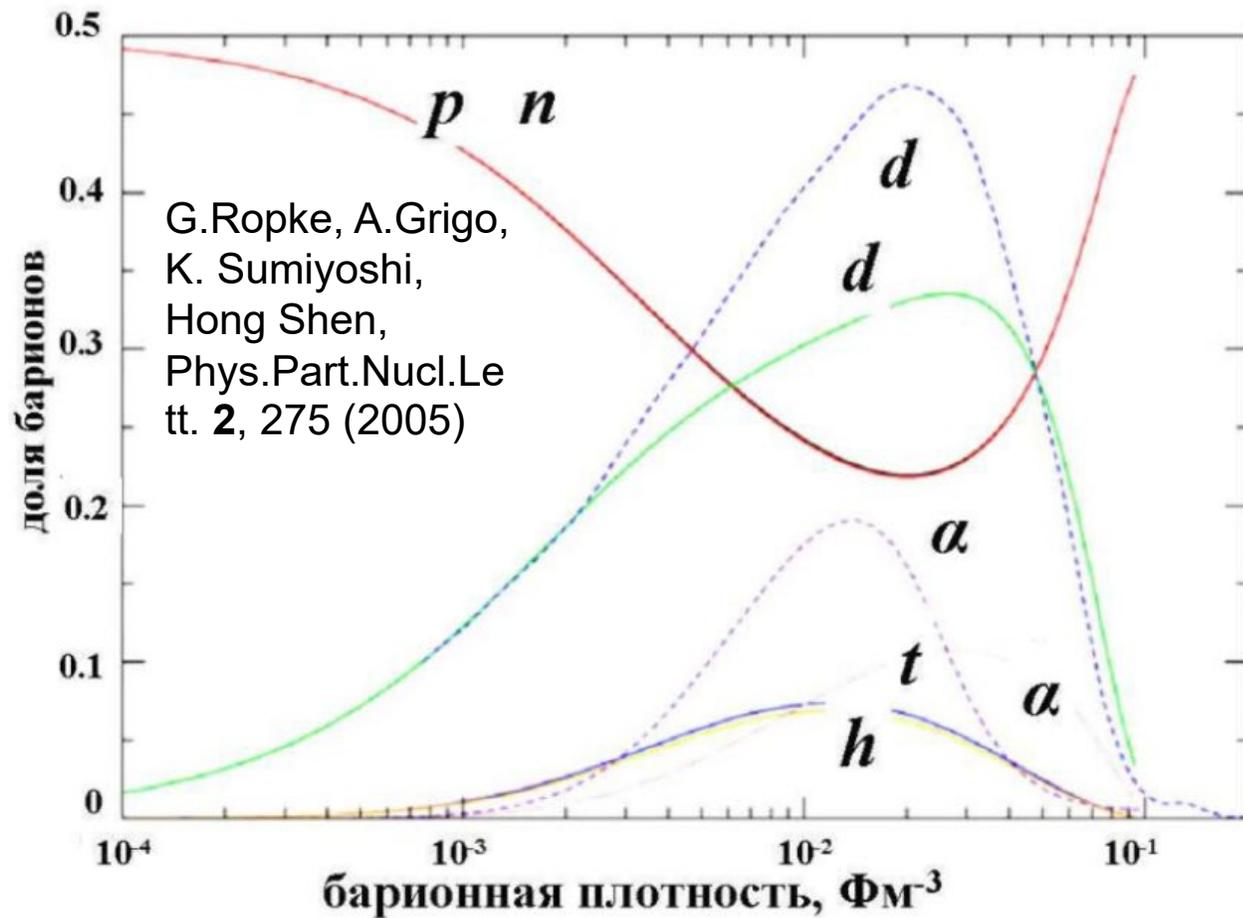
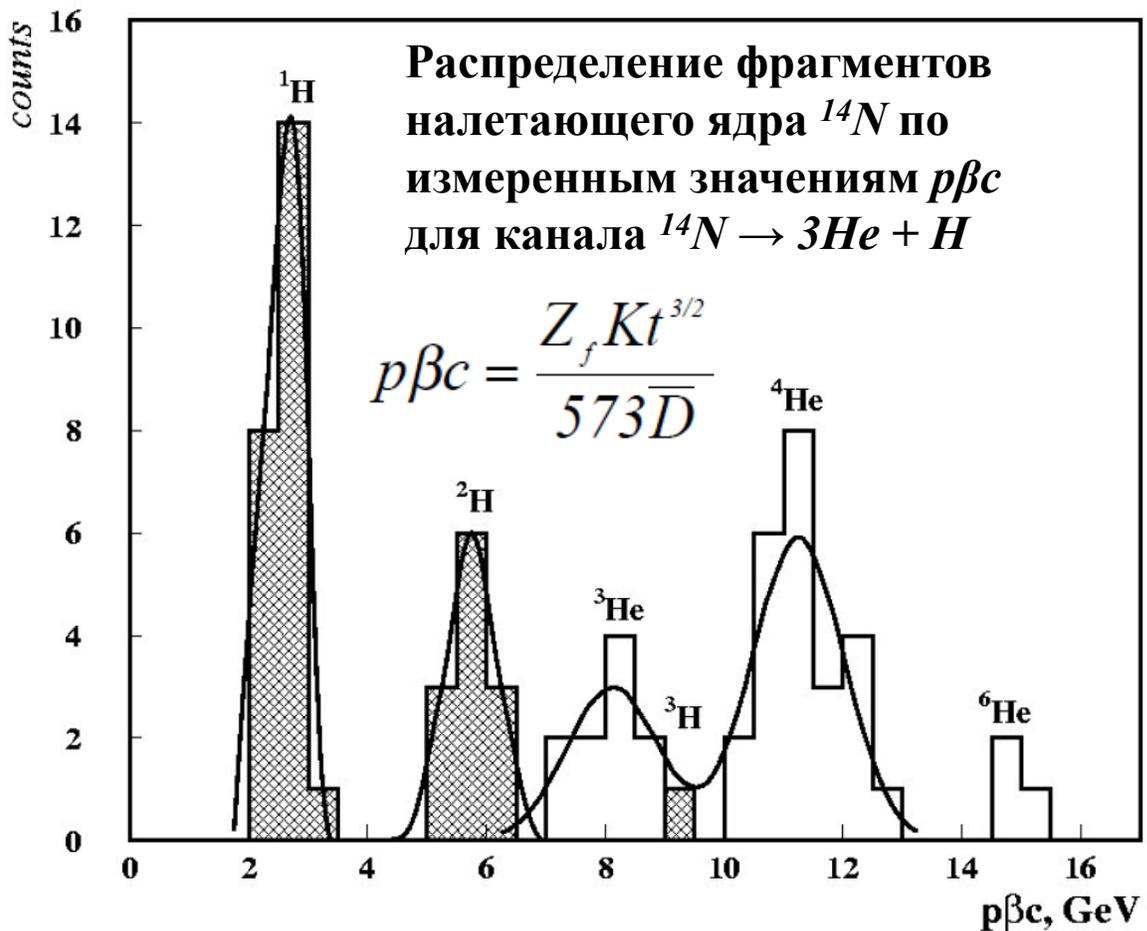


A.A. Zaitsev et al.

Phys. Let. B 820, 136460 (2021)

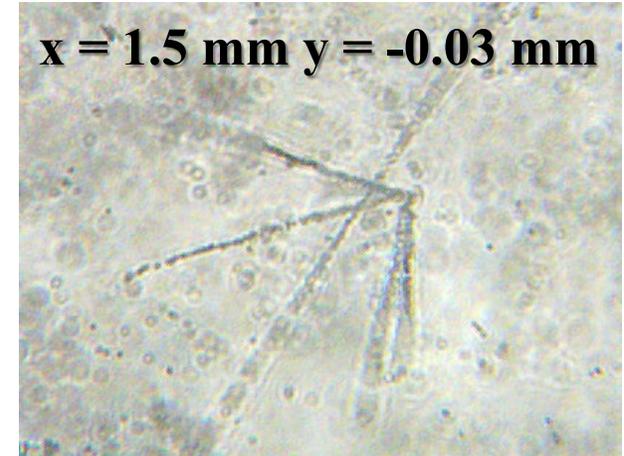
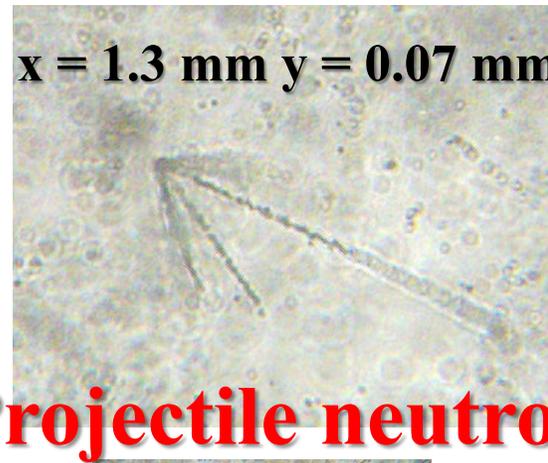
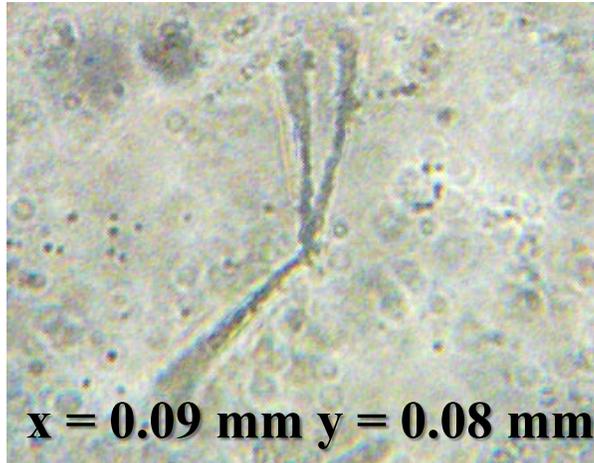
n_α

Изотопический состав сопровождающей фрагментации ядер

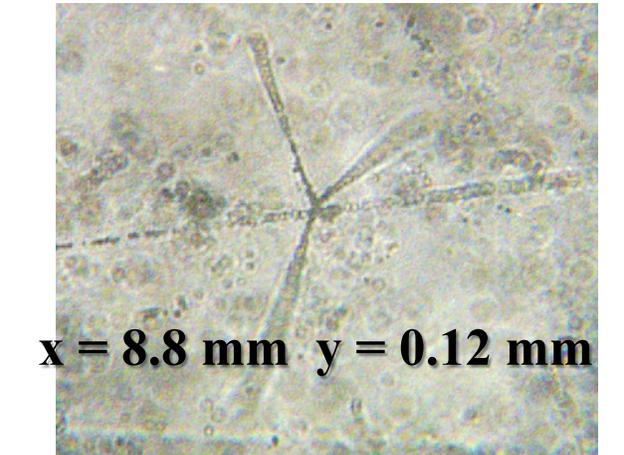
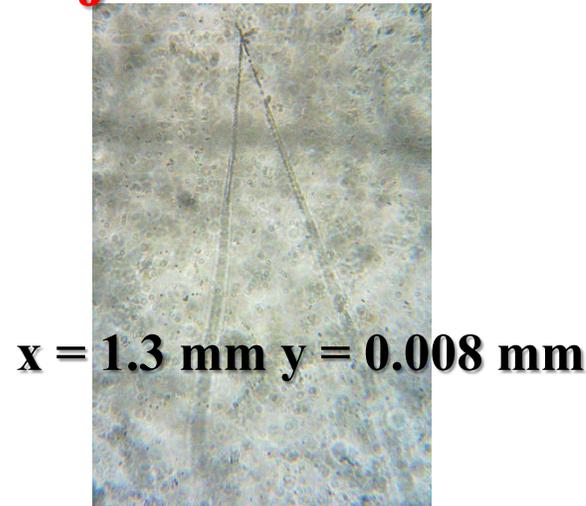
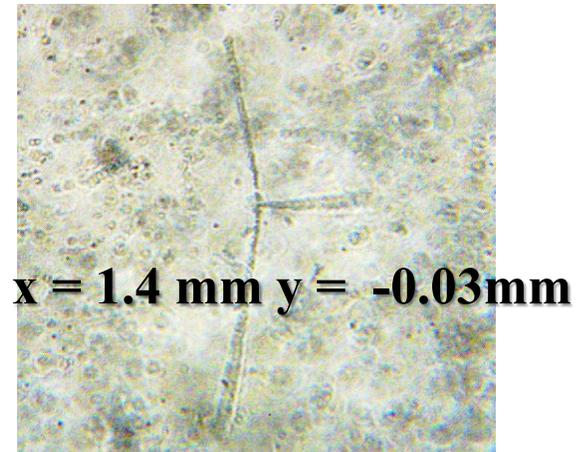


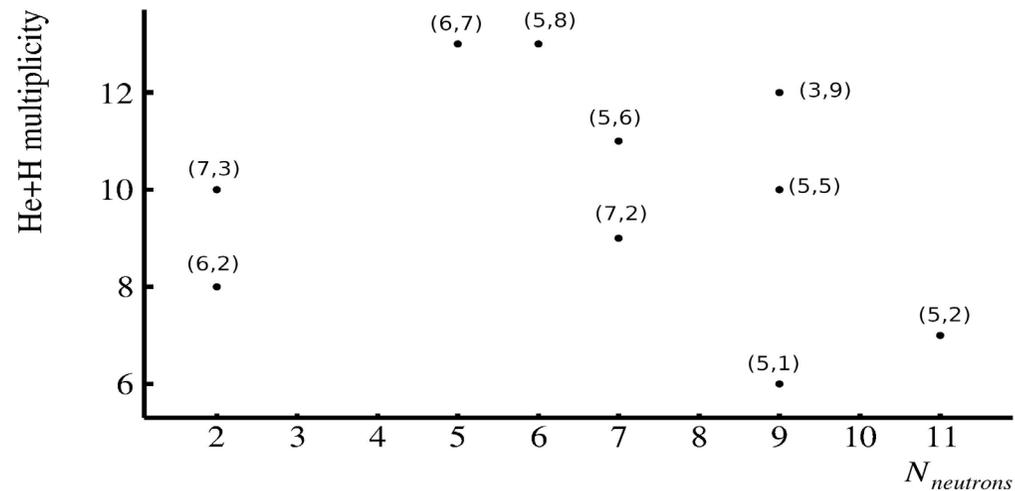
Kr 800 A MeV #7012 (17.6 mm) x60

Target Fragments: 3 Mesons: 5 Projectile Fragment Charge > 23 (He - 7, H - 9)

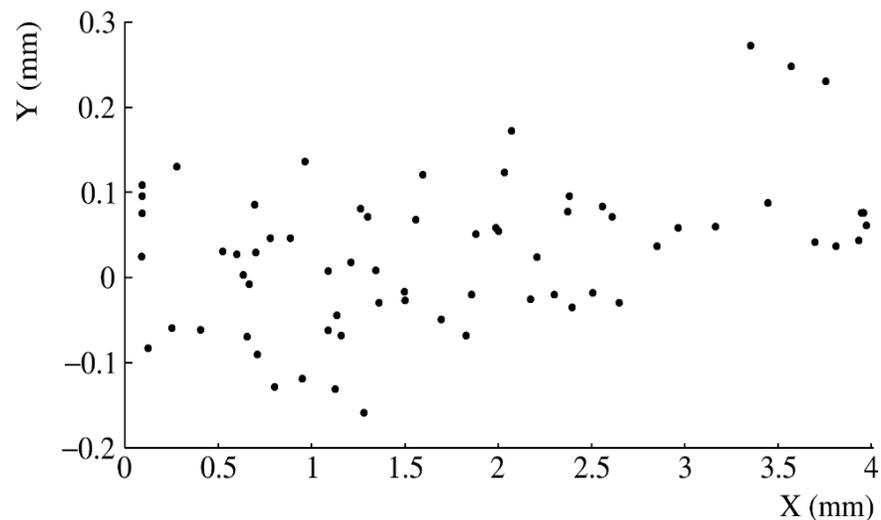


Projectile neutrons?

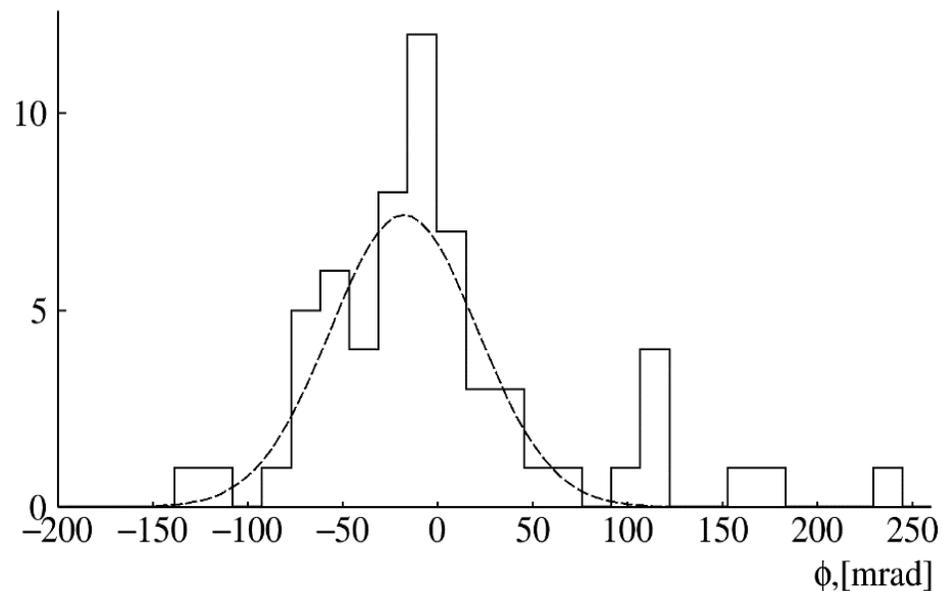




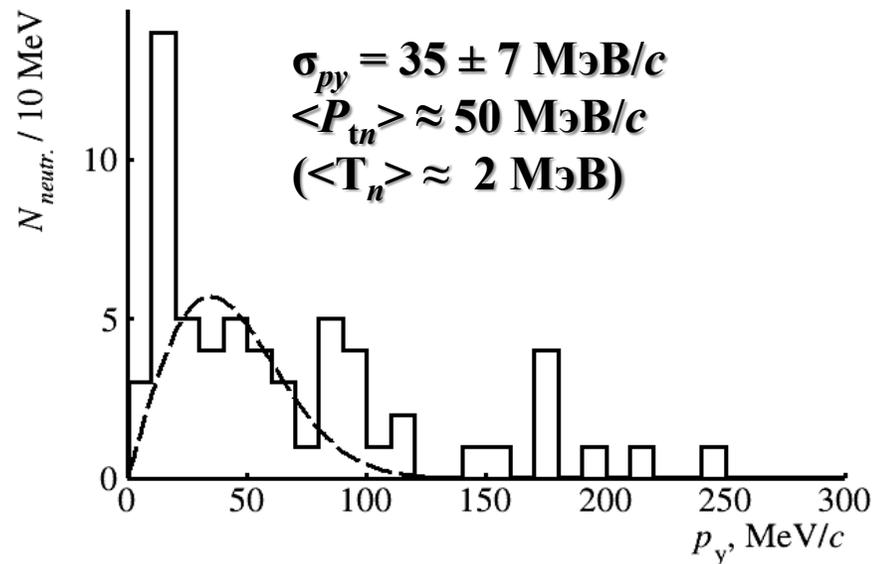
Число SNS и множественность (He,H).



Координаты SNS в фокальной плоскости относительно первичных вершин

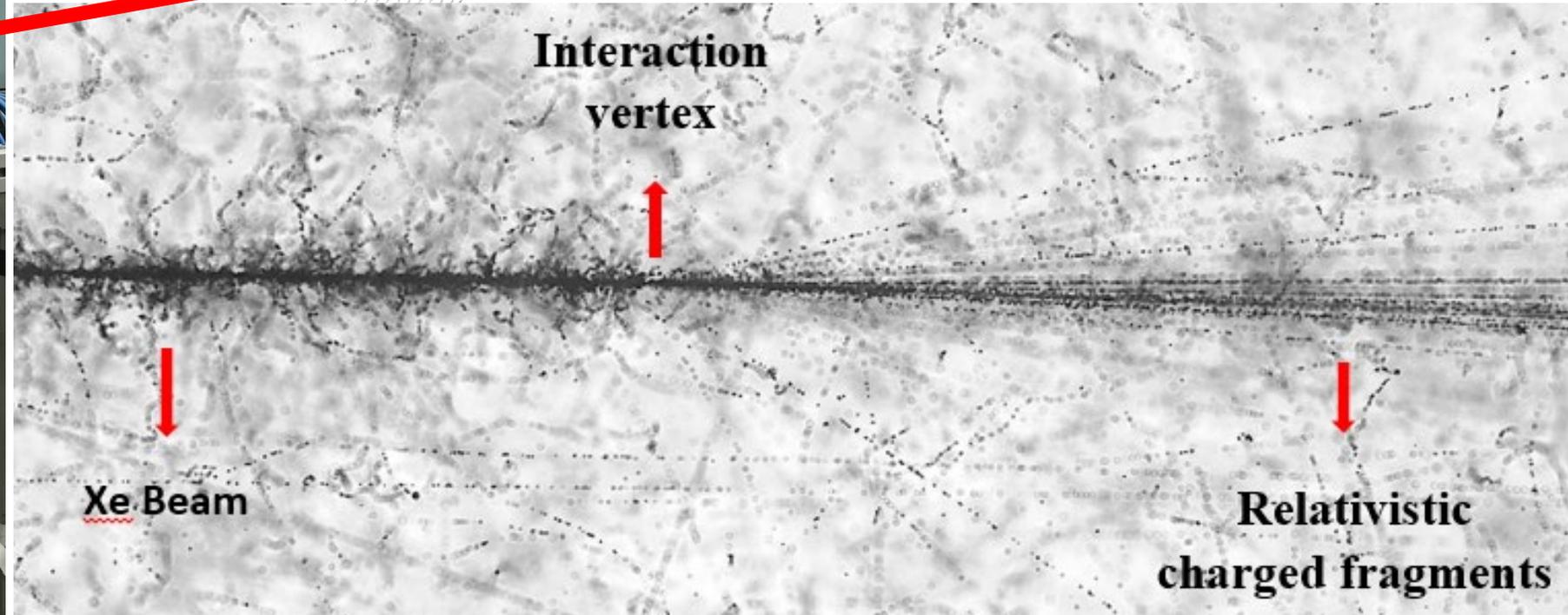
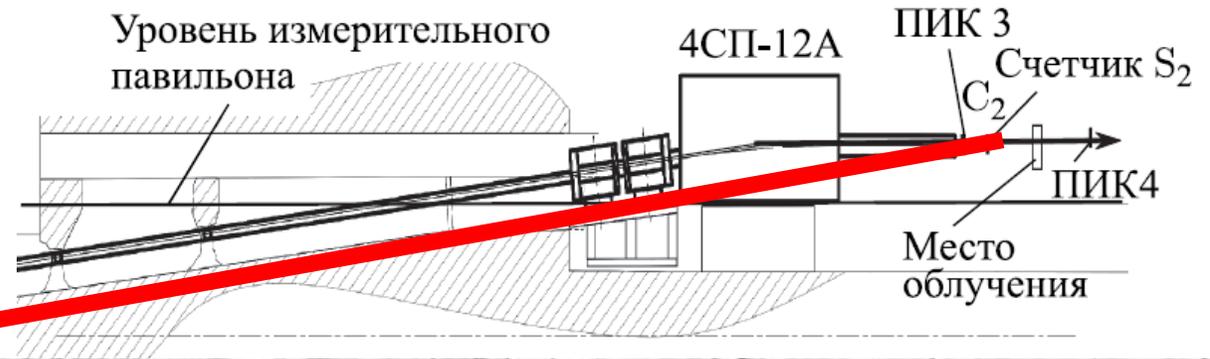
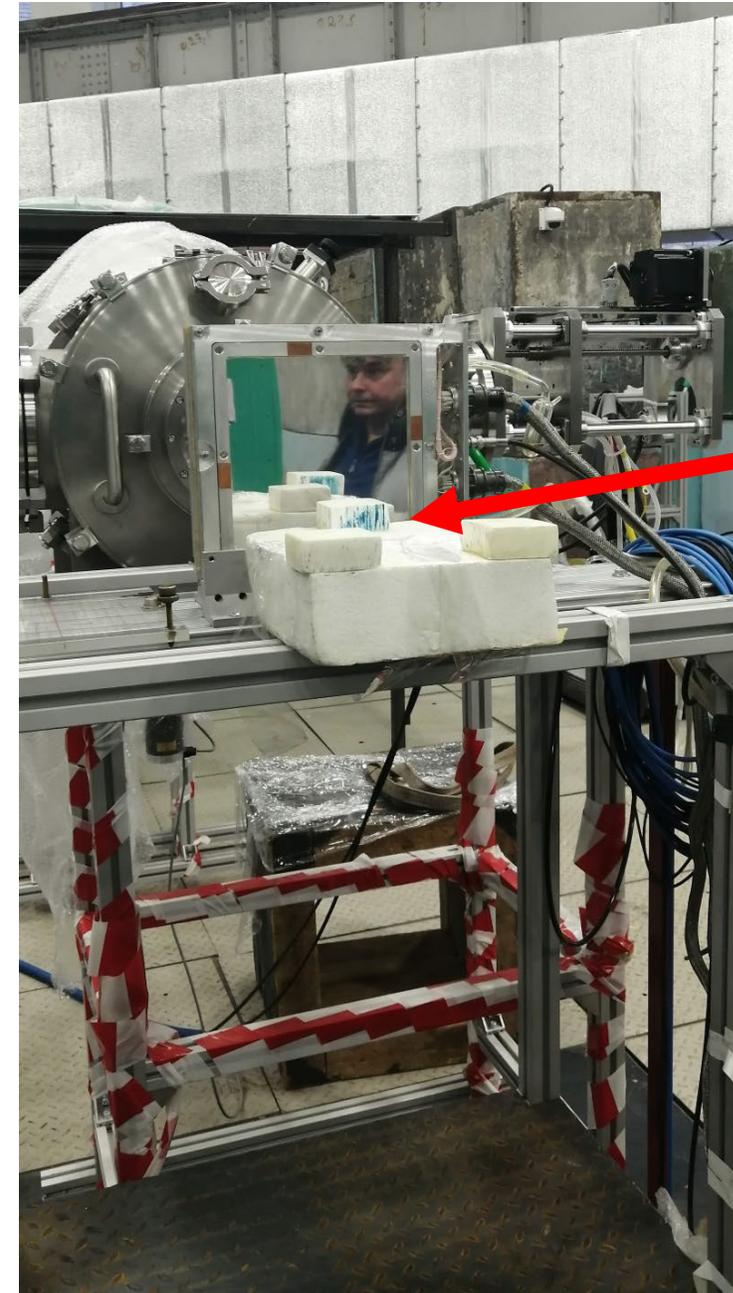


Распределение SNS по плоскому углу ϕ относительно первичных следов



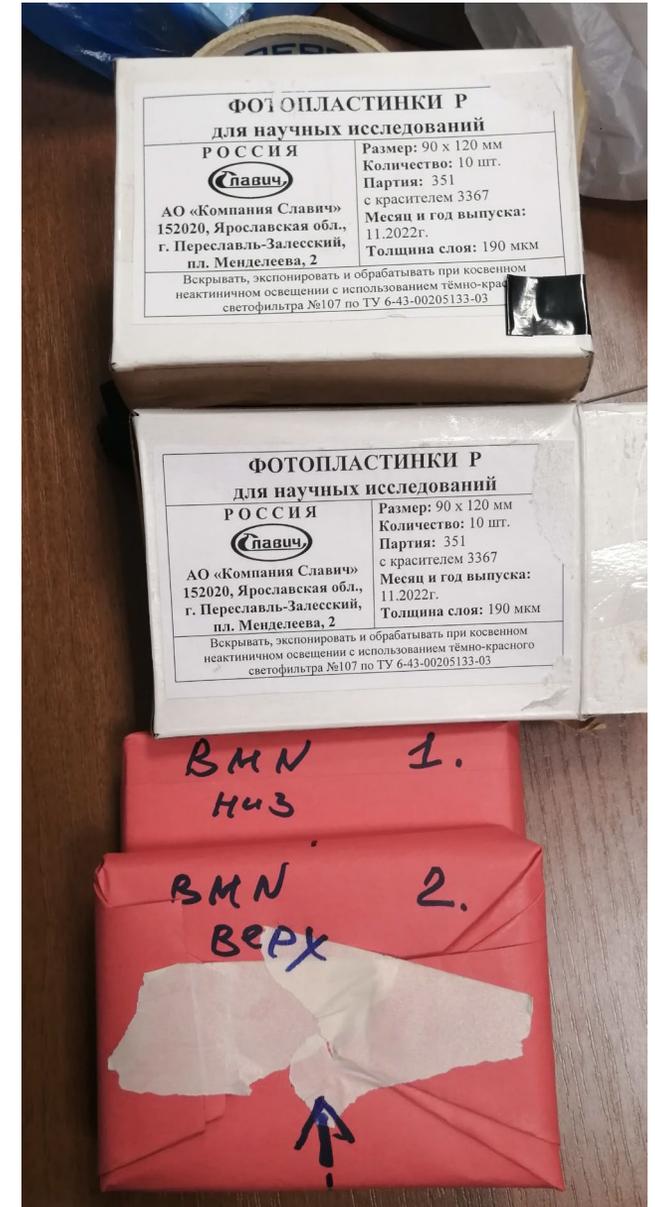
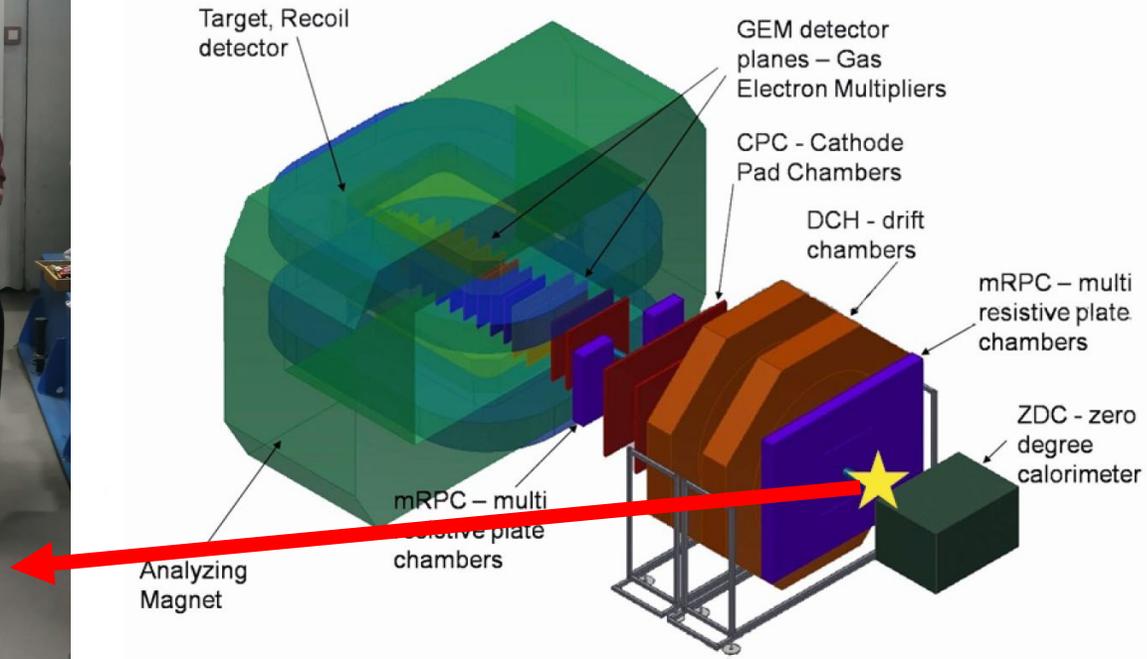
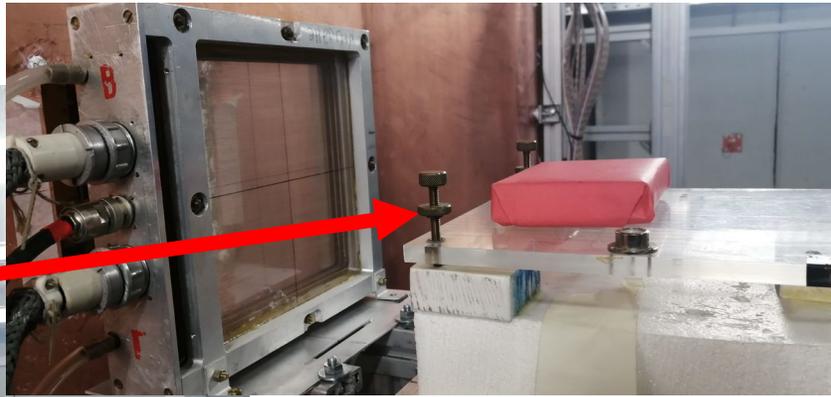
Распределение нейтронов по планарной компоненте поперечного импульса

Облучение ядерной эмульсии ядрами $\text{Xe } 3.85 \text{ A GeV}$ на выведенном канале Нуклотрона в точке F3 (2022г.)

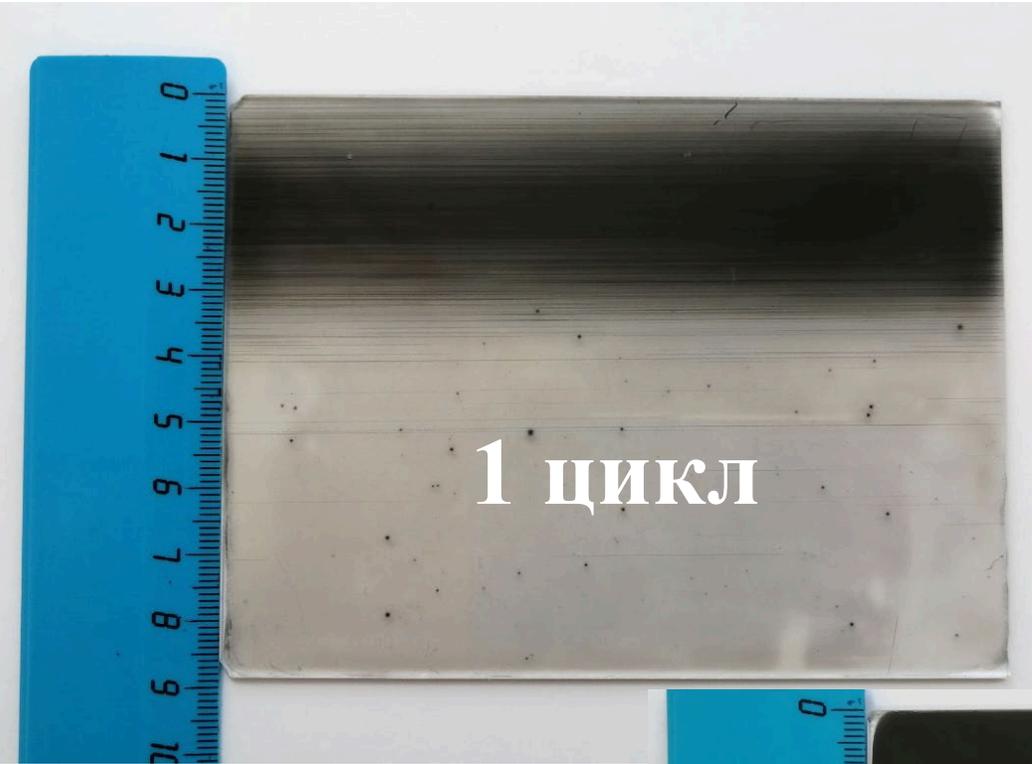


Olympus BX63, объектив 40x.

Облучение ядерной эмульсии на установке ВМ@N



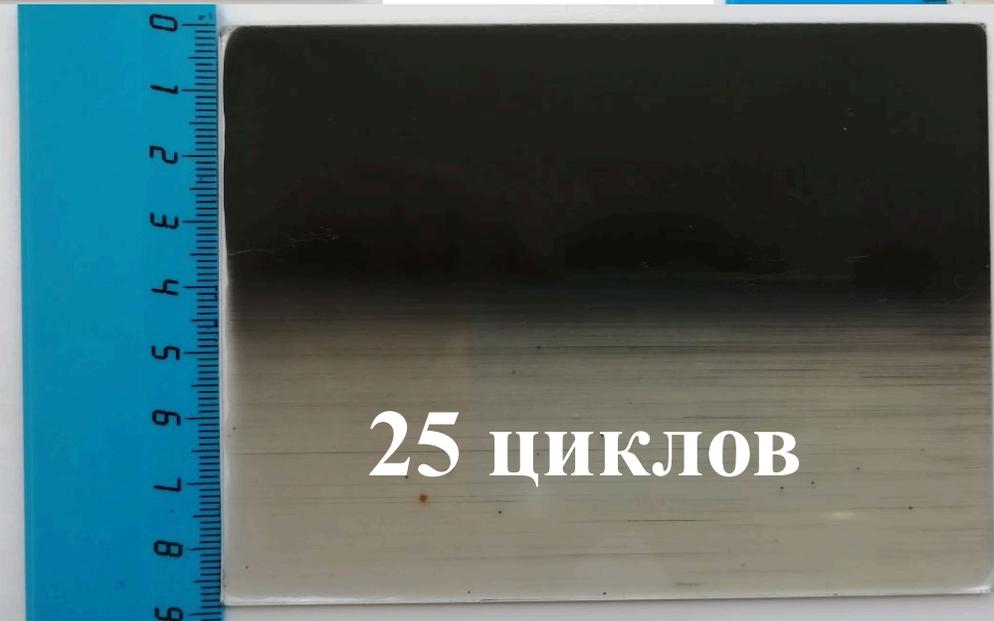
Облучение ядерной эмульсии ядрами ксенона F3 (2022 г.)



1 цикл

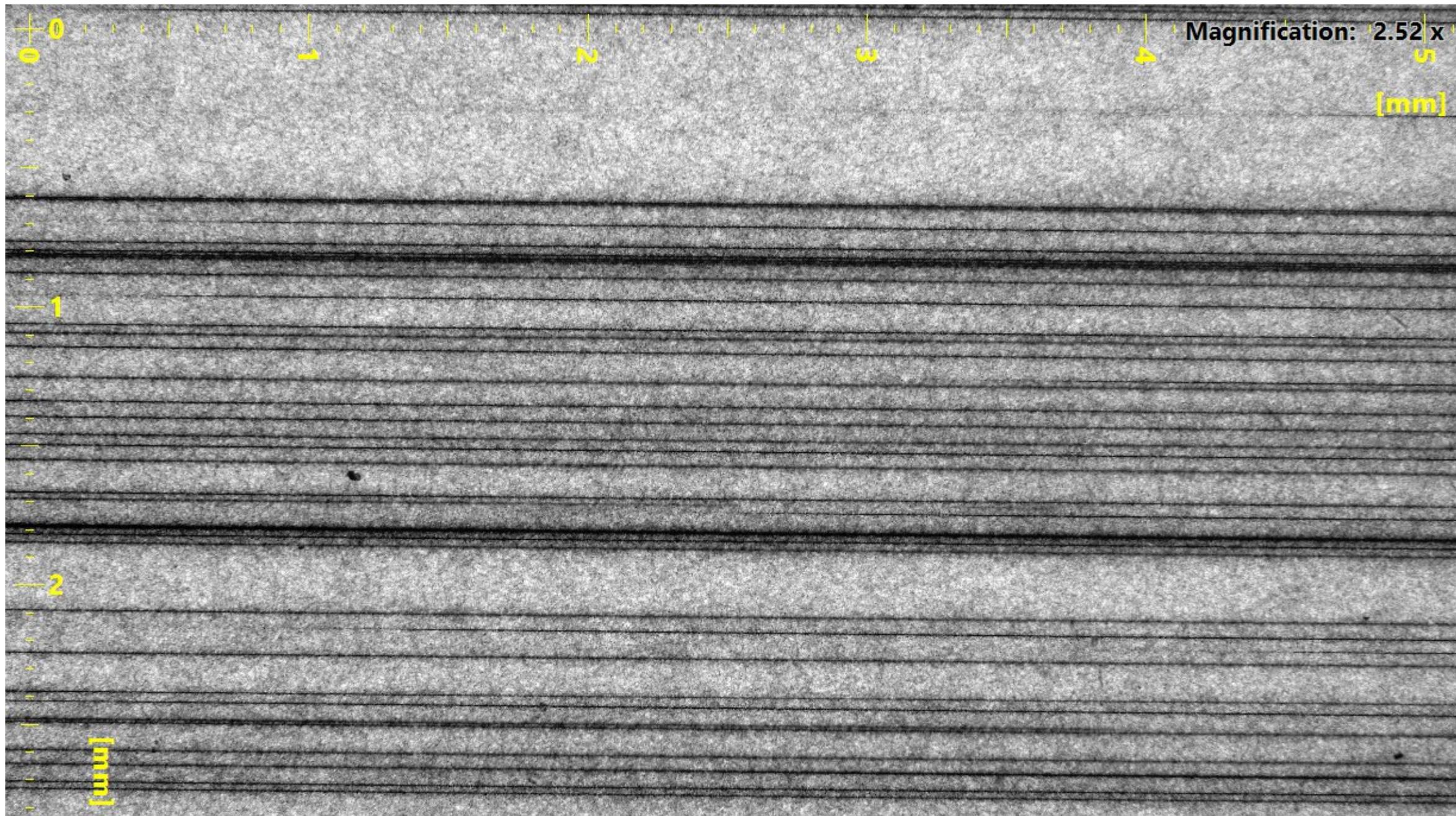


5 циклов

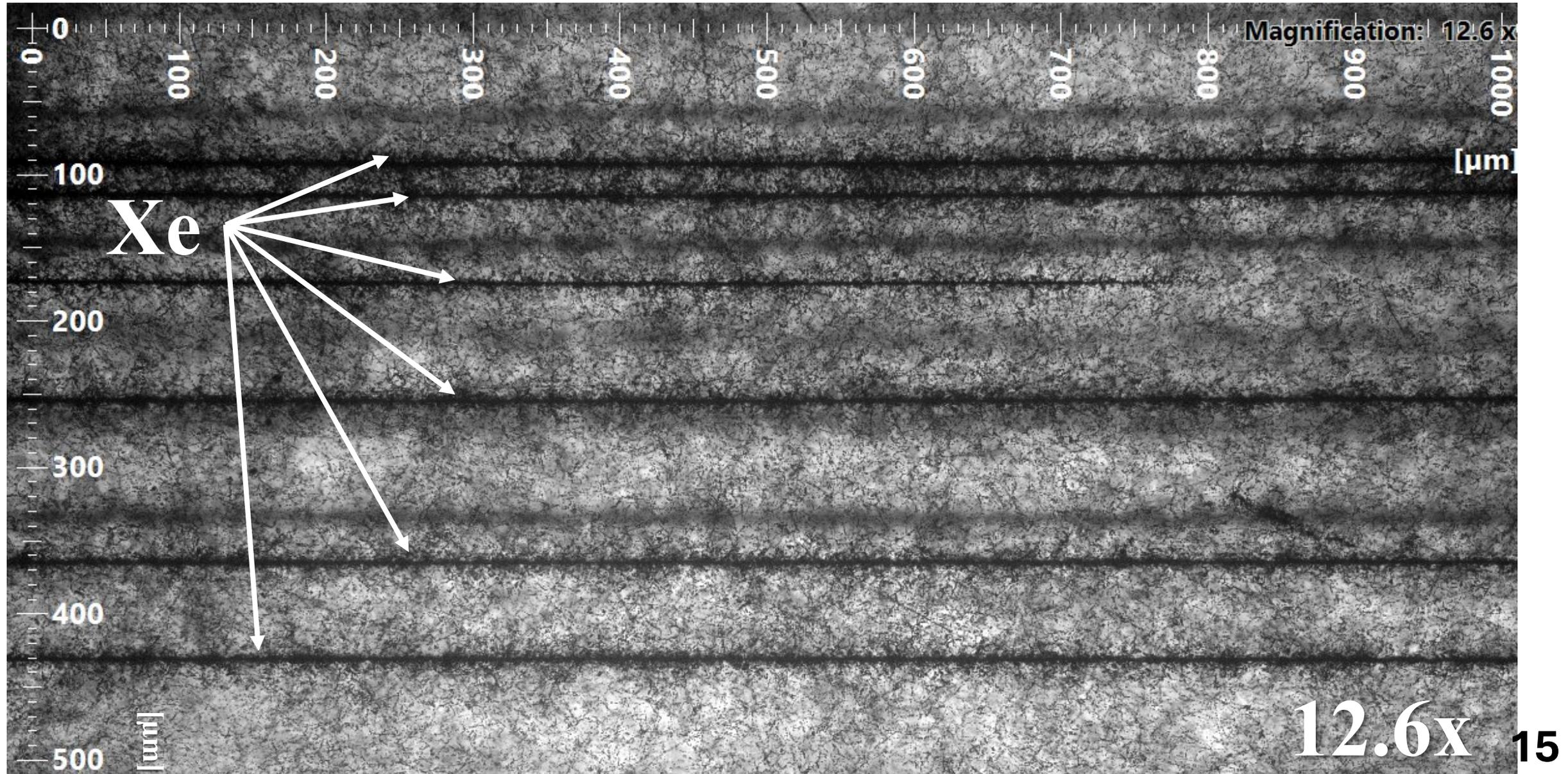


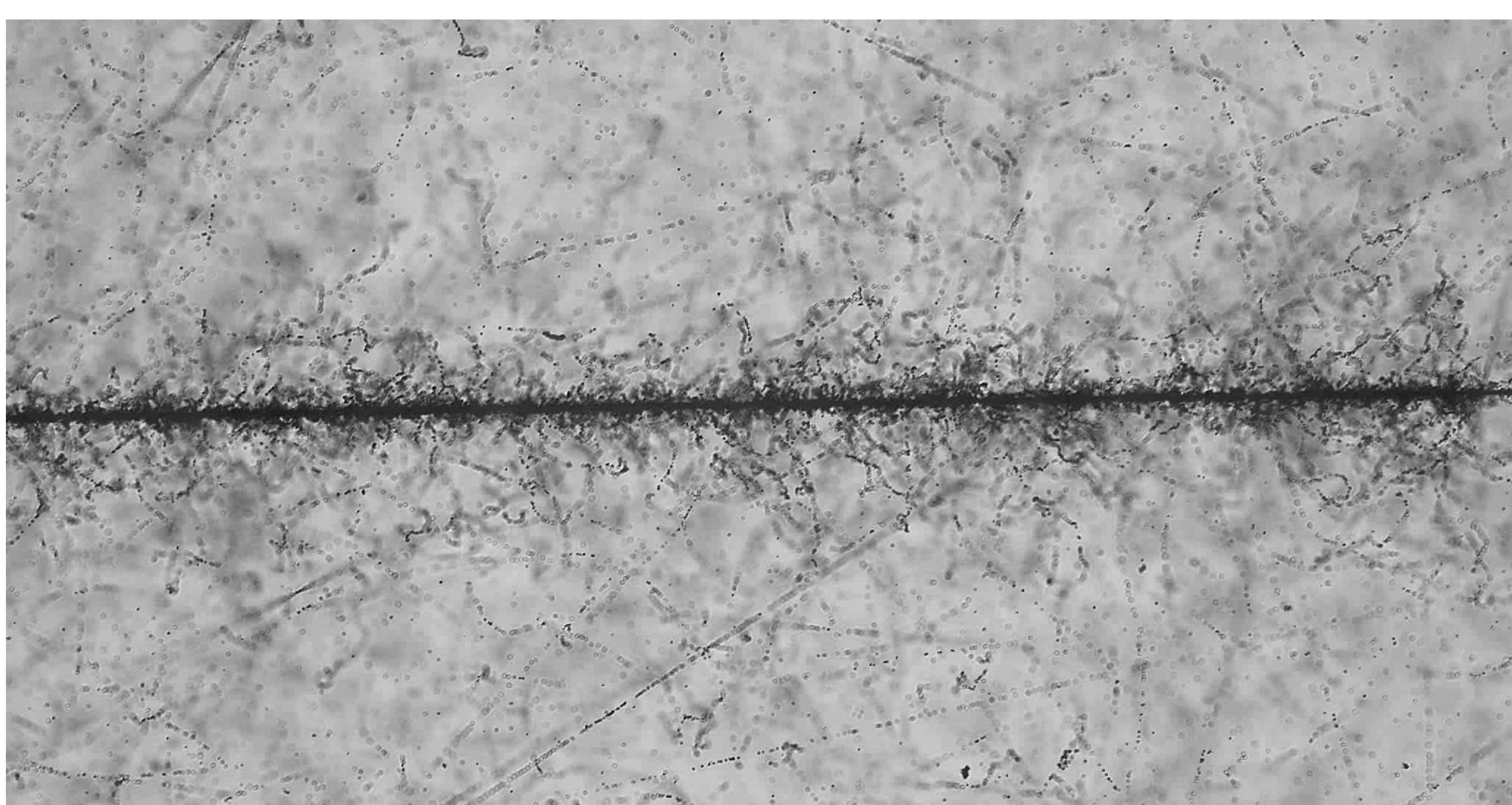
25 циклов

Облучение ядерной эмульсии ядрами ксенона F3 (2022 г.)

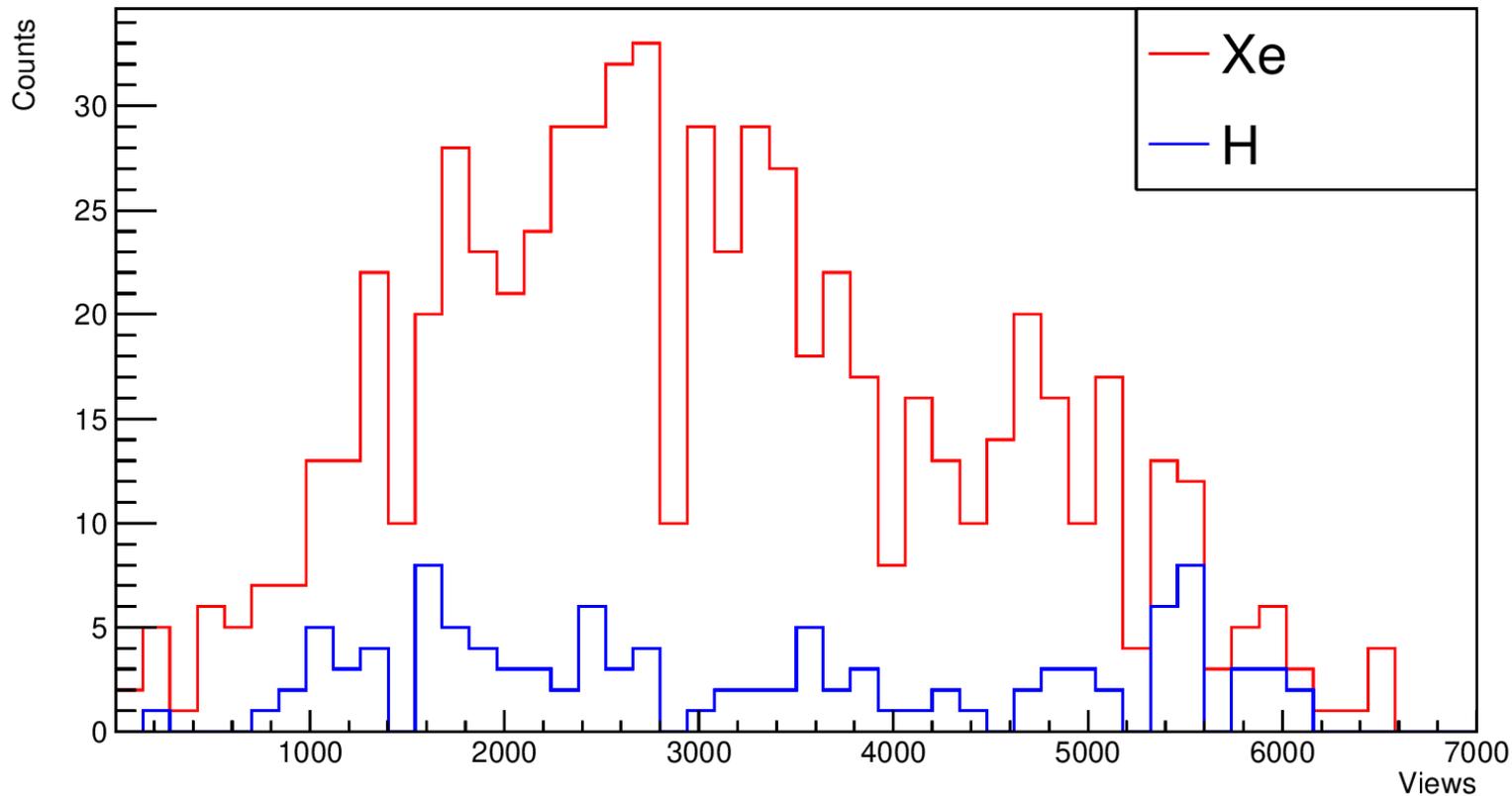


Увеличенное изображение ядерной эмульсии, облученной в пучке ядер Хе на выведенном канале в точке F3 (2022 г.)





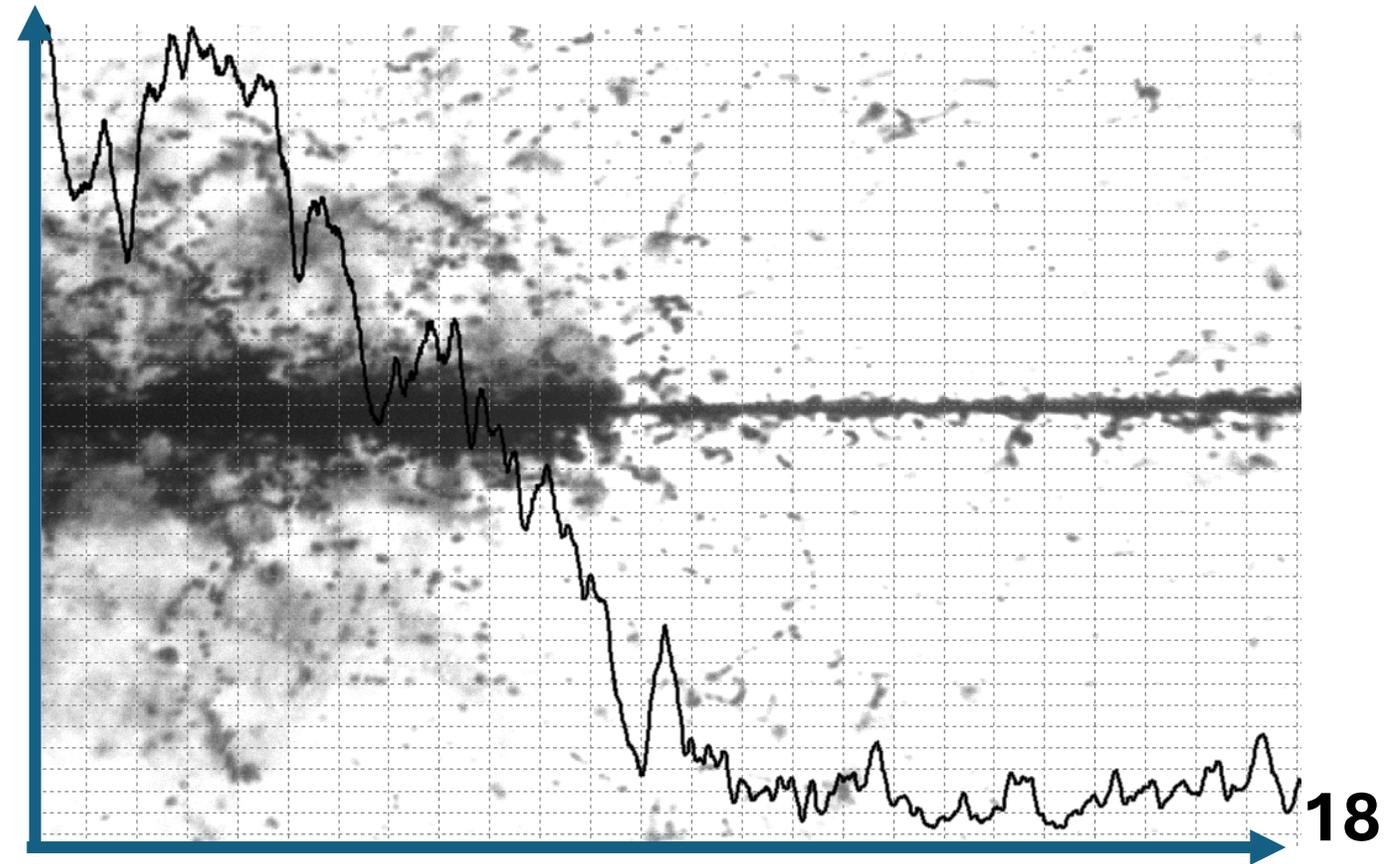
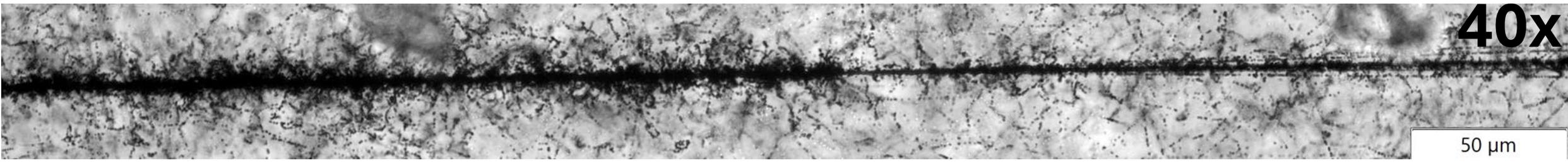
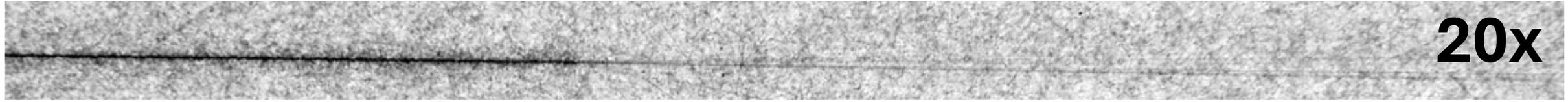
Облучение ядерной эмульсии ядрами ксенона (2022 г.)



Z=54 ~ 85%

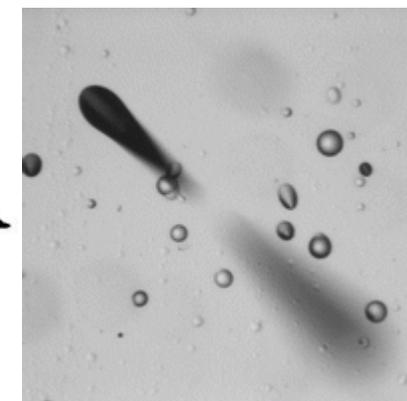
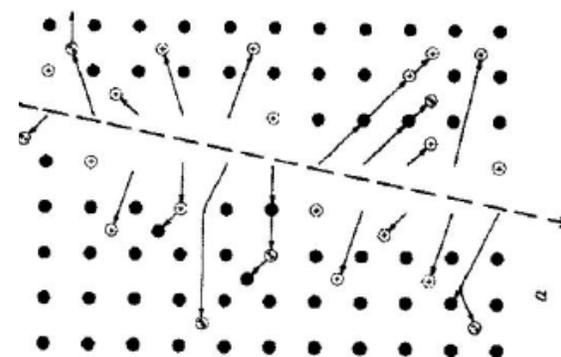
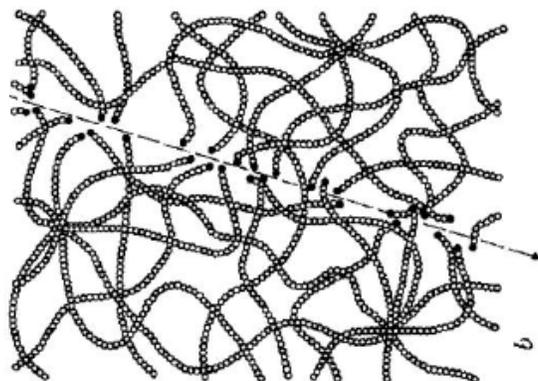
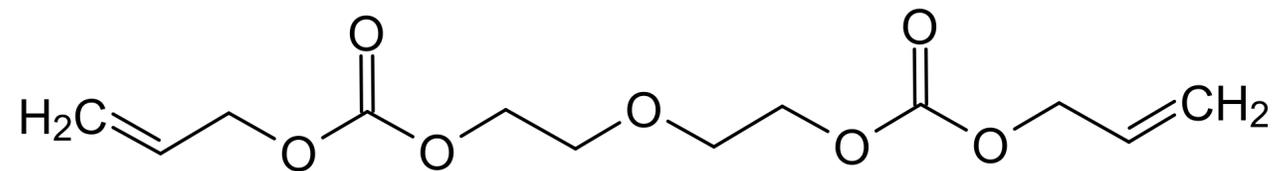
Z=1 ~ 15%

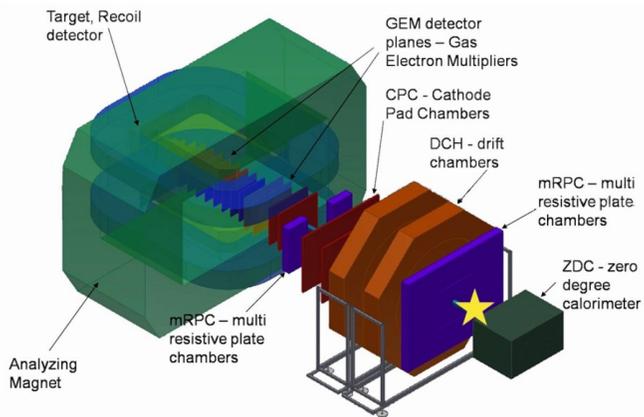
Автоматизированный поиск ядерных взаимодействий



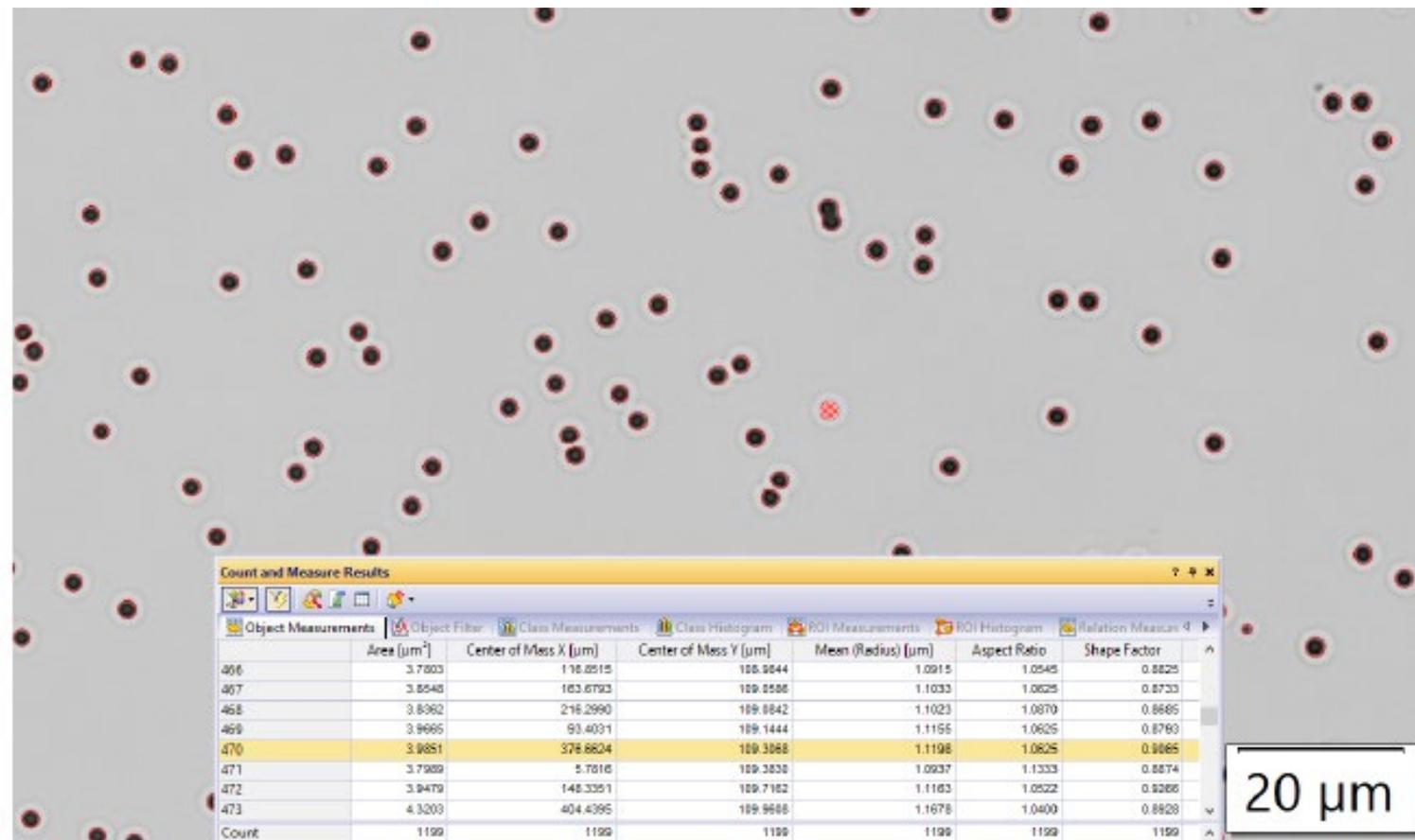
Метод твердотельных трековых детекторов

Аллилдигликолькарбонат (АДК)
«Columbia Resin» №39





Увеличенное изображение облученного образца CR39, полученное с помощью микроскопа Olympus BX63. Представлена процедура автоматического анализа и счета входящих треков («дыроч») ядер Хе в плоскость детектора CR39, реализованного в фирменном программном обеспечении CellSens Olympus (демонстрационная версия).



20 μm

Фотография образца CR39, облученного в пучке ядер Хе на установке VM@N в 2023 г. Красным выделена область прохождения пучка.

Сканирование ТТД CR39

OLYMPUS cellSens Dimension

File Edit View Acquire Image Process Measure Tools Window Help

Acquisition Processing **Count and Measure** Reporting Simple Layout

400 %

Select digital reticle...

Count and Measure...

Digital Reticle

Start Page Live (active) Image_270*

0.445 0.45 0.455 0.46 0.465 0.47 0.475 0.48 0.485 0.49 0.495 0.5 0.505 0.51 0.515 0.52 0.525 mm

130 135 140 145 150 155 μm

Color: [Yellow]

Opacity: [Slider]

Font: Segoe UI Size: 24 Bold

Scale

Layers

- Detected Objects
- Layer 1

Dimension Selector

- Gray

20 μm

Count and Measure Results

Object Measurements Object Filter Class Measurements Class Histogram ROI Measurements ROI Histogram Relation Measurements

Object ID	Object Class	Area [μm^2]	Center of Mass X [μm]	Center of Mass Y [μm]	Mean (Radius) [μm]	Aspect Ratio	Shape Factor	Perimeter [μm]	Mean (Gray Intensity Value)	Std Dev (Gray Intensity Value)	Mean (Color Intensity Value)	Convexity
1471	1	3.9399	480.5583	143.8894	1.1178	1.0626	0.8803	6.6138	548.2963	50.5659	-	0.9818
1472	1	3.0643	576.1028	143.8408	0.9608	1.1429	0.8852	5.7571	559.8333	46.3650	-	0.9767
1473	1	3.5021	598.2294	143.8344	1.0247	1.1429	0.9196	6.0735	544.2083	50.3078	-	1.0000
1474	1	3.7210	714.7018	143.9138	1.0754	1.0833	0.8690	6.4555	551.8039	51.2457	-	0.9808
1475	1	3.5751	844.7516	143.8454	1.0542	1.1250	0.8193	6.5211	543.4898	61.7312	-	0.9423
1476	1	4.0128	903.8446	143.9424	1.1293	1.1250	0.8940	6.6793	545.0545	65.6712	-	0.9821
1477	1	5.9098	609.7833	144.6614	1.3088	1.5000	0.8326	8.5893	538.2716	58.7182	-	0.9759
1478	1	11.3088	213.6015	144.7545	1.7245	2.0000	0.4209	16.6655	535.1032	59.6994	-	0.8031
1479	1	3.9399	254.6201	144.5096	1.1013	1.1615	0.8237	6.8375	545.8889	58.0401	-	0.9474
1480	1	3.5751	542.3260	144.5124	1.0465	1.0772	0.8786	6.2973	540.6327	48.0619	-	0.!
Count	-	5803	5803	5803	5803	5803	5803	5803	5803	5803	0	!
Count in filter ranges	-	5803	5803	5803	5803	5803	5803	5803	5803	5803	0	!
Mean	-	4.1059	573.9250	283.8555	1.0998	1.2537	0.7739	7.6998	561.3611	51.9048	-	0.!
Standard Deviation	-	1.7908	321.0697	165.1803	0.2066	0.4723	0.2221	4.4597	30.7914	17.3440	-	0.!

Анализ облученного ТТТД CR39 ядрами Хе на установке ВМ@N

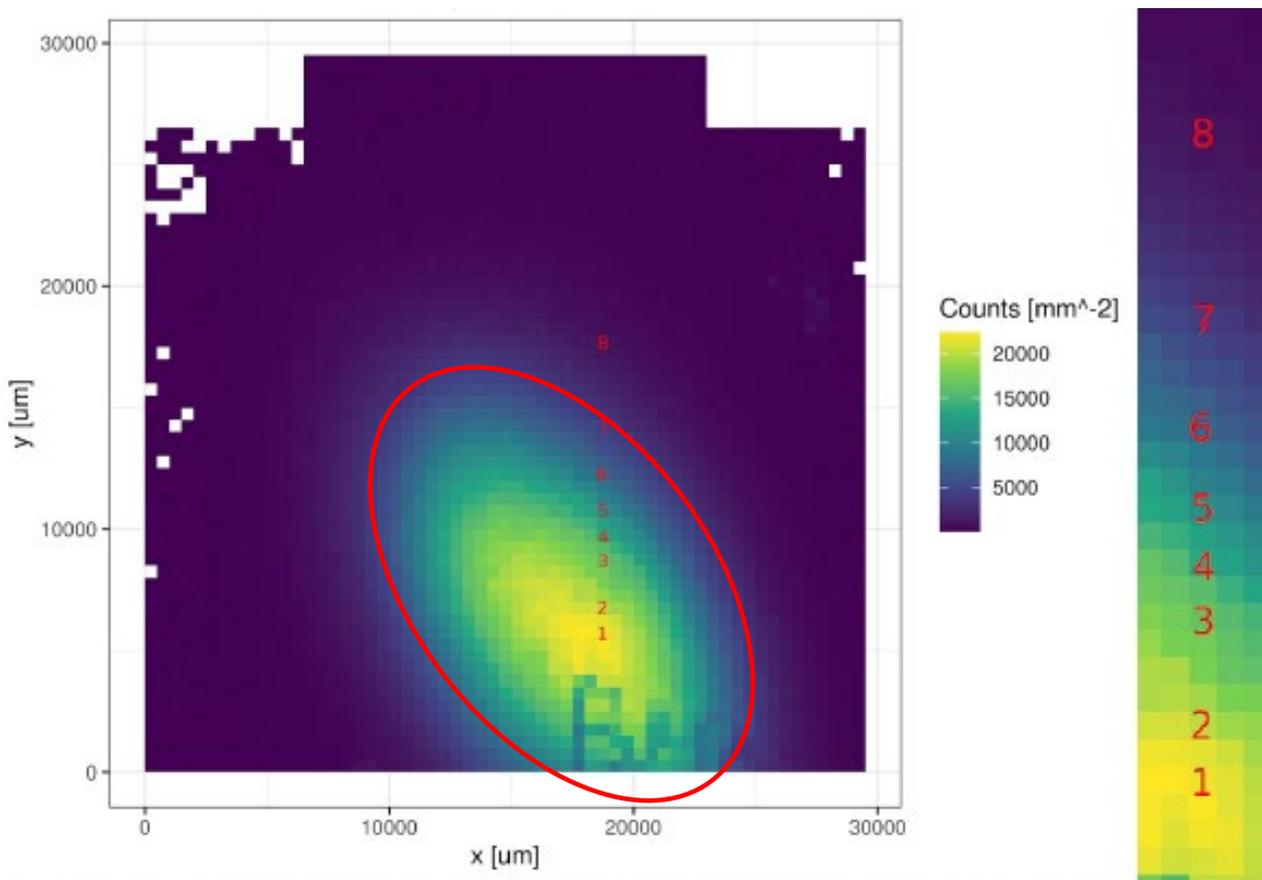


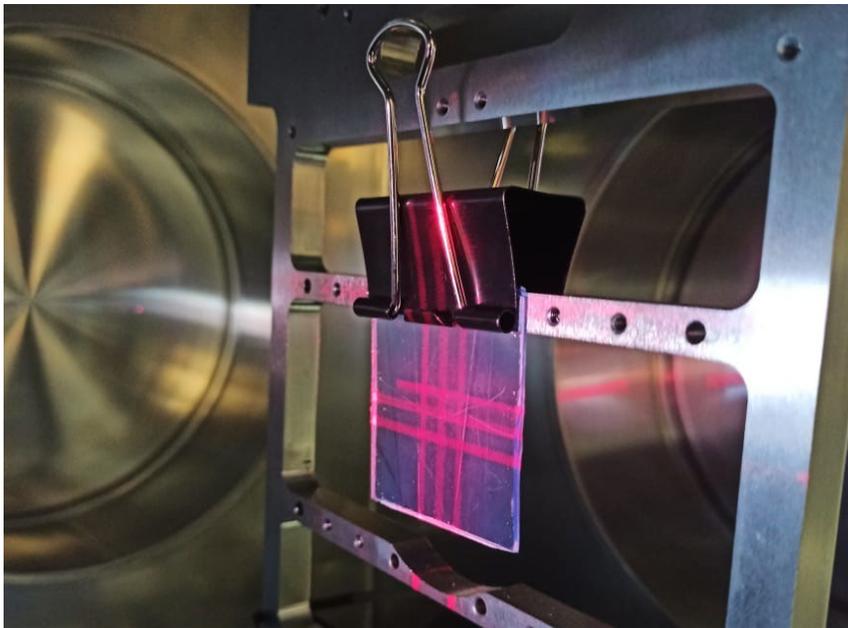
Figure 14: Spatial distribution of dip over the area of the CR-39 SSNTD. The bin width is 0.5 mm. On the right there are the centres of the analysed squares.

Table 3. Estimation of track density by the visual method.

No. Square	Square side [mm]	Total number of dips	Number of tracks	ratio of tracks to dips	Fluence [mm ⁻²]
1	0.25	1370	1601	1.16862	25616
2	0.25	1288	1487	1.15450	23792
3	0.25	1110	1250	1.12613	20000
4	0.25	982	1077	1.09674	17232
5	0.25	744	776	1.04301	12416
6	0.25	502	528	1.05179	8448
7	0.5	980	991	1.01122	3964
8	1	772	772	1.00000	772

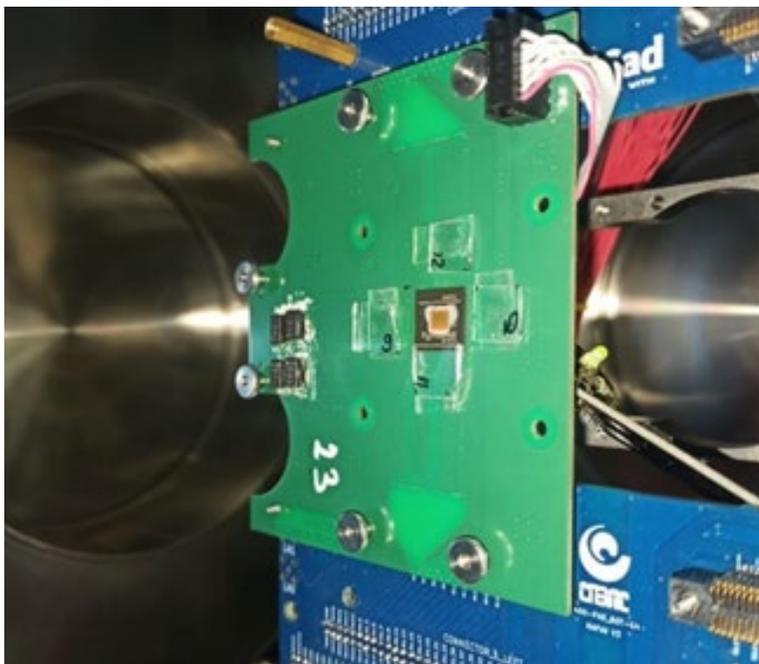
Пучок имеет эллиптическую форму с наклоном эллипса около 45°. Эллипс пучка, внутри которого плотность «дырок» превышает 10³ мм⁻², имеет размеры большой и малой полуосей порядка 16 и 8 мм **СООТВЕТСТВЕННО.**

Облучение ТТД на станции СОЧИ

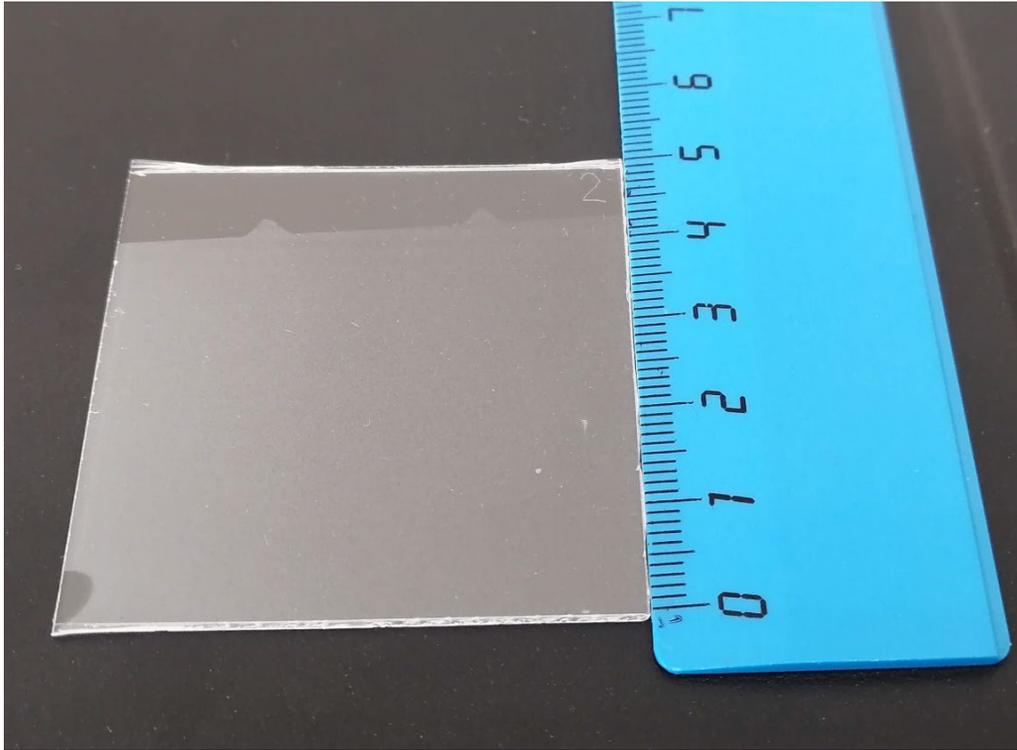


Режимы облучения:

1. CR39. Расфокусированный пучок с флюенсом $1,8 \cdot 10^3$ частиц/ $_{\text{см}^2}$ за сброс. Набрано 3 сброса.
2. CR39. Расфокусированный пучок с флюенсом $2,8 \cdot 10^4$ частиц/ $_{\text{см}^2}$ за сброс. Набрано 4 сброса.
3. ПЭТФ (Майлар). Расфокусированный пучок с флюенсом $2,8 \cdot 10^4$ частиц/ $_{\text{см}^2}$ за сброс. Набрано 36 сбросов.
4. CR39. Сфокусированный пучок с флюенсом $\approx 10^6 - 10^7$ частиц/ $_{\text{см}^2}$ за сброс. Набран 1 сброс.

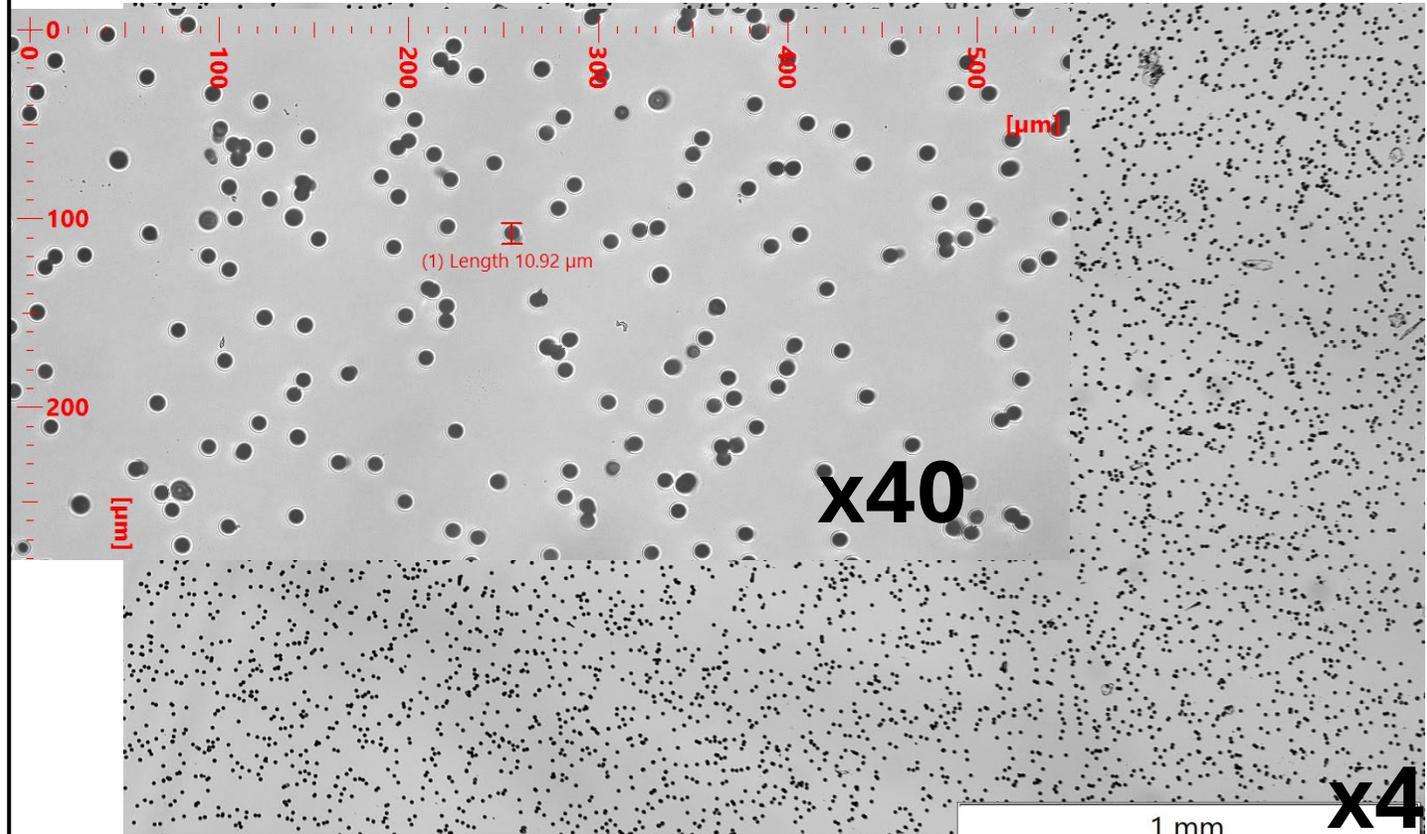


Облучение детекторов CR39 в расфокусированном пучке ионов Xe^{+28} 3.2A MeV на станции СОЧИ (2023 г.)

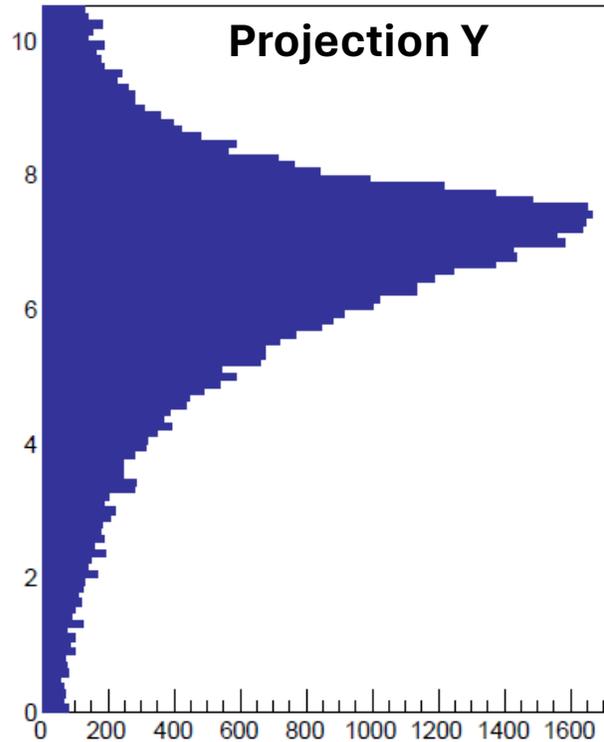
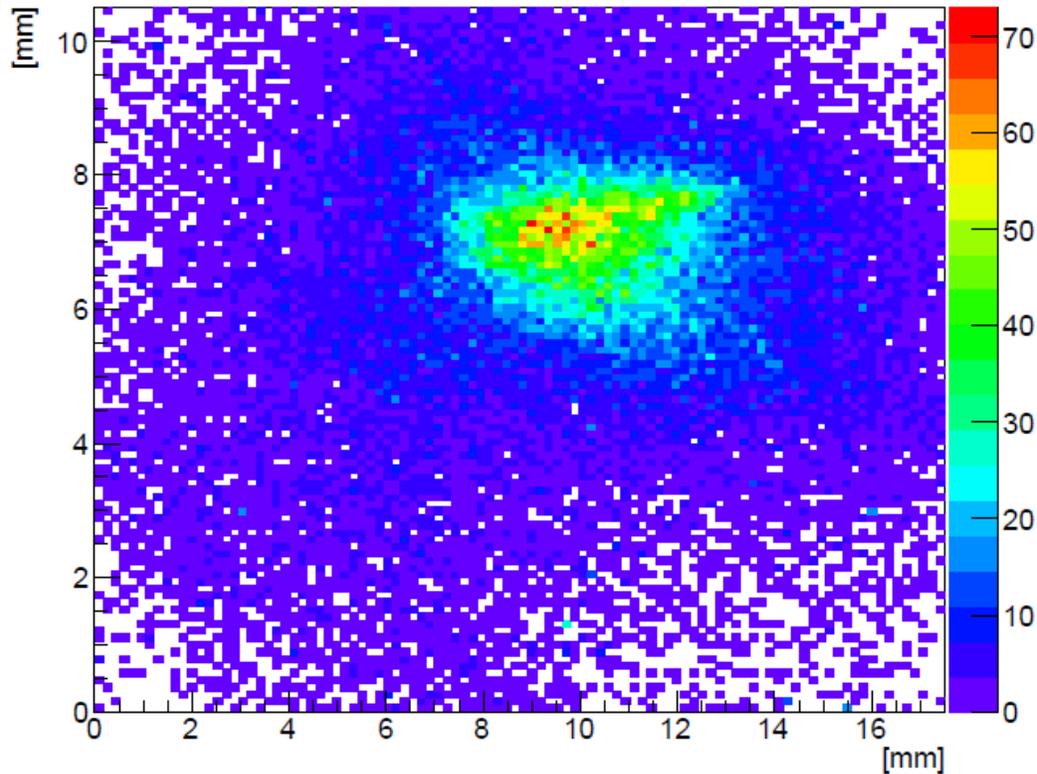
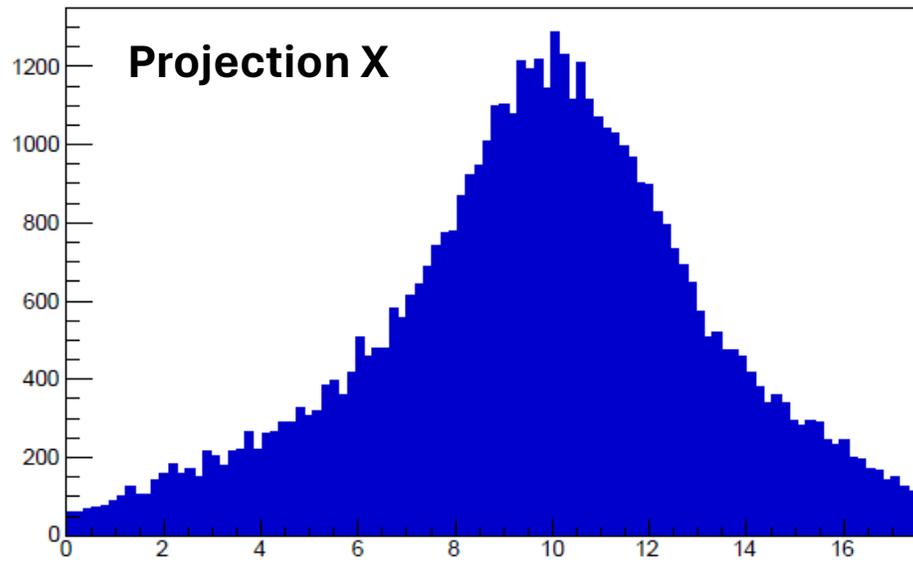


Облученный образец CR39.

Увеличенные изображения облученного образца CR39 с использованием объективов x4 и x40 крат. Черные окружности представляют собой отдельные следы прошедших ионов Хе через детектор CR39.



Анализ образца CR39, облученного в сфокусированном пучке ионов $^{124}\text{Xe}^{+28}$ на станции SOChI



Xe^{+28} SOCHI Focused
Two projections X and Y axes.
Bin $0.175 \times 0.105 \text{ mm}^2$
Total number of ions - 50776

Заключение

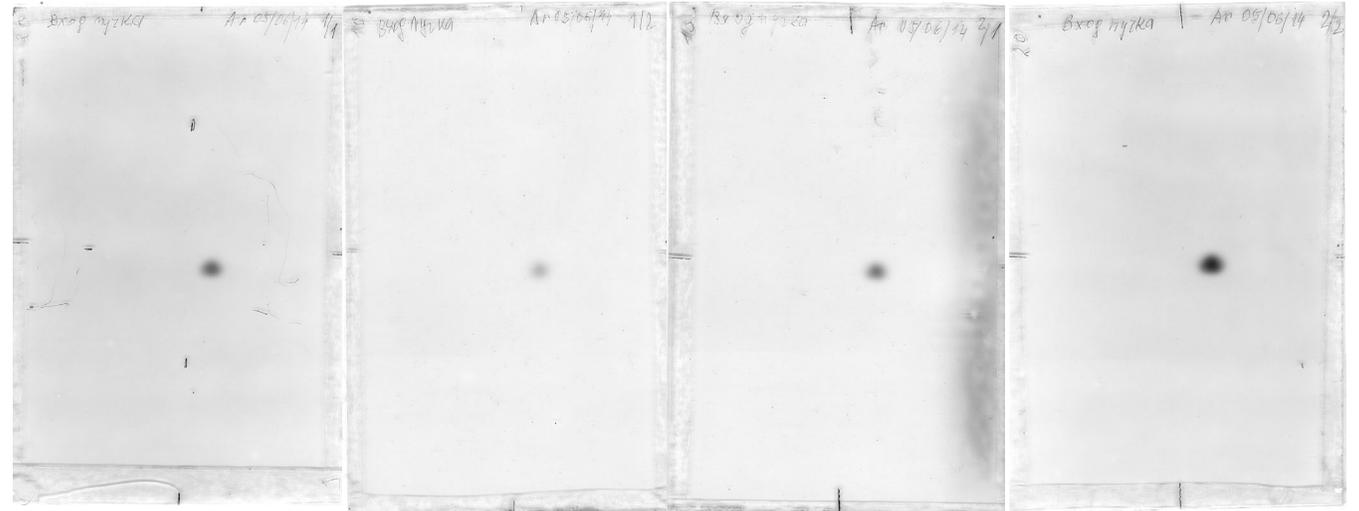
- Выполнены успешные облучения опытных образцов ядерной эмульсии ядрами ^{124}Xe с энергией 3.9 ГэВ на нуклон.
- Получен уникальный материал для анализа множественных состояний α -частиц и нуклонов при оптимальной энергии налетающего ядра.
- Проведен анализ состава пучка ядер, полученного во время 4-го физического сеанса работы ускорителя Нуклотрон/NICA.
- Применение метода ТТД CR-39 позволило полностью реконструировать профиль и интенсивность пучка ядер и ионов Хе при энергиях 3.8 ГэВ/н и 3.2 МэВ/н.

Спасибо за внимание!

Облучение ядерной эмульсии ядрами аргона (2014 г.)



Ar 1.2 А ГэВ при интенсивности 10^5



Z=18 (38%)

Z < 18 (14%)

Z = 2 (5%)

Z = 1 (43%)

треков	I область	II область	III область	Все
просмотренных квадратов	13	15	15	43
черных (Z=18)	63	65	96	224
черных (Z<18)	16	35	33	84
серых (Z=2)	10	8	11	29
релят. (Z=1)	64	93	92	249

Метод твердотельных трековых детекторов

