



BECQUEREL
PROJECT

Проект
БЕККЕРЕЛЬ

Beryllium (Boron)

Clustering

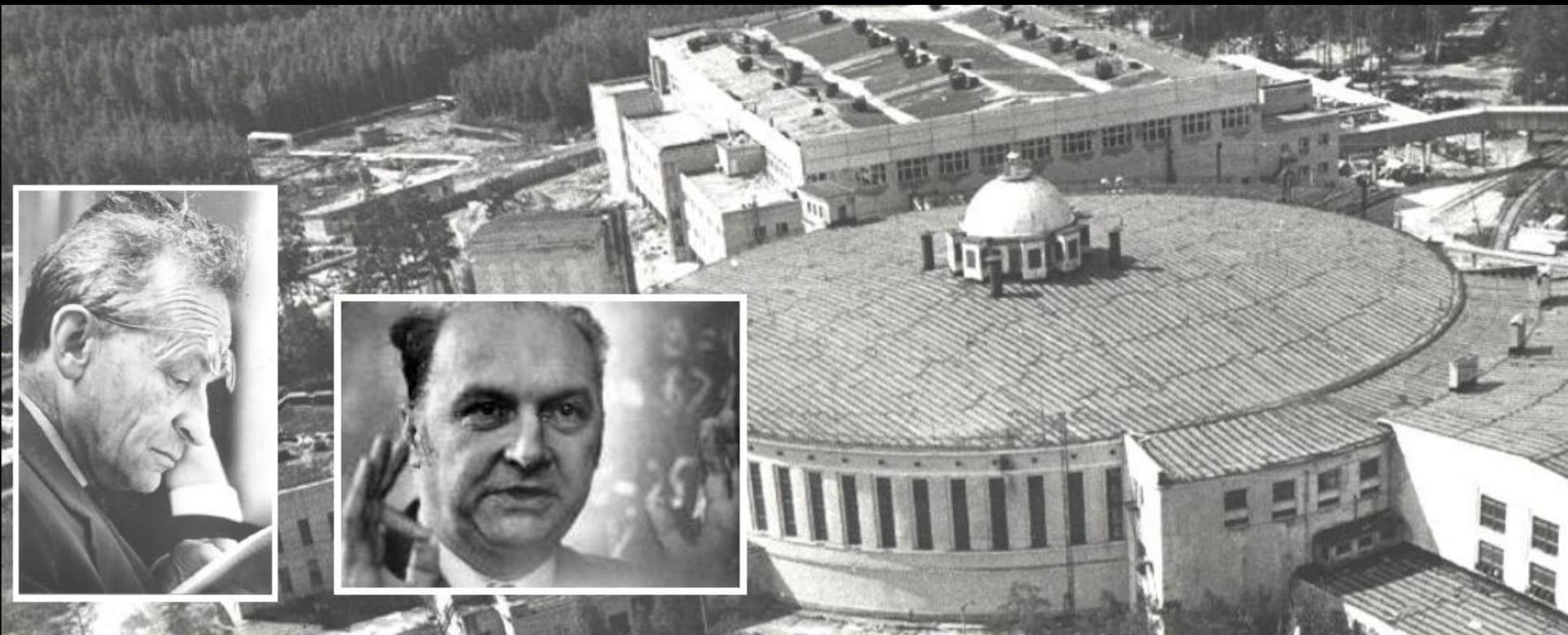
Quest in

Relativistic Multifragmentation

<http://becquerel.jinr.ru>

Ядерная фотография: из XIX века в XXI-й

Павел Зарубин



*Лаборатория физики высоких энергий имени В.И. Векслера и А.М. Балдина
Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна*



Hair - $60 \mu\text{m}$
AgBr Crystal - $0.2 \mu\text{m}$

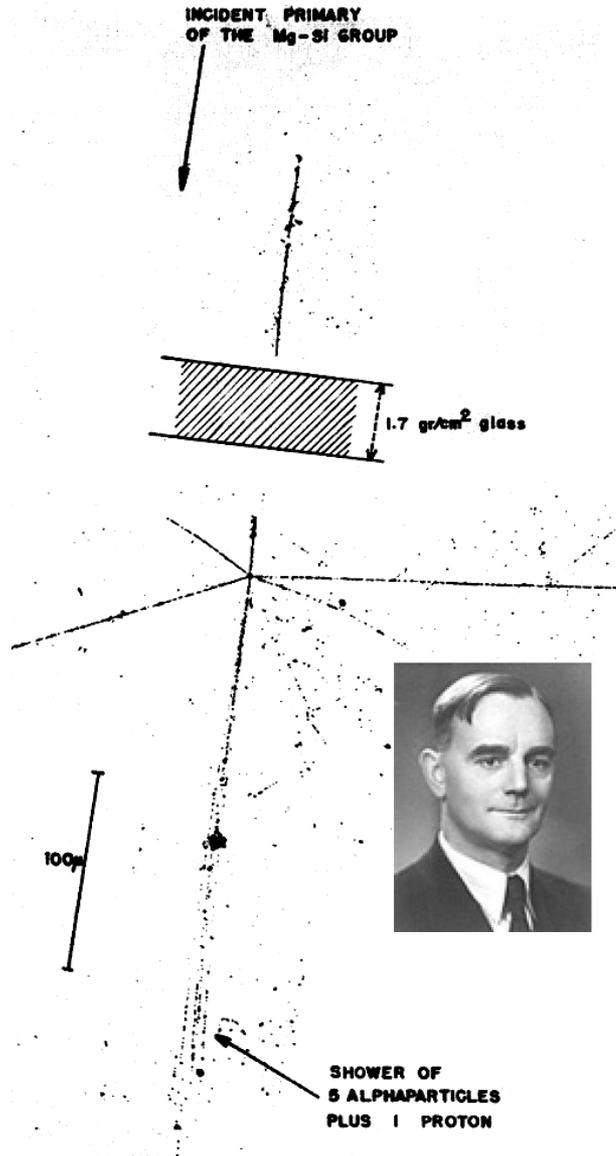
Atom - $10^{-4} \mu\text{m}$

Proton - $10^{-9} \mu\text{m}$



The Heavy Nuclei of the Primary Cosmic Radiation

H. L. BRADT AND B. PETERS
 University of Rochester, Rochester, New York
 (Received September 9, 1949)



The Study of Elementary Particles by the Photographic Method

*An account of
 The Principal Techniques and Discoveries
 illustrated by
 An Atlas of Photomicrographs*

BY
 C. F. POWELL
 P. H. FOWLER and D. H. PERKINS

H. H. WILLS PHYSICAL LABORATORY
 UNIVERSITY OF BRISTOL

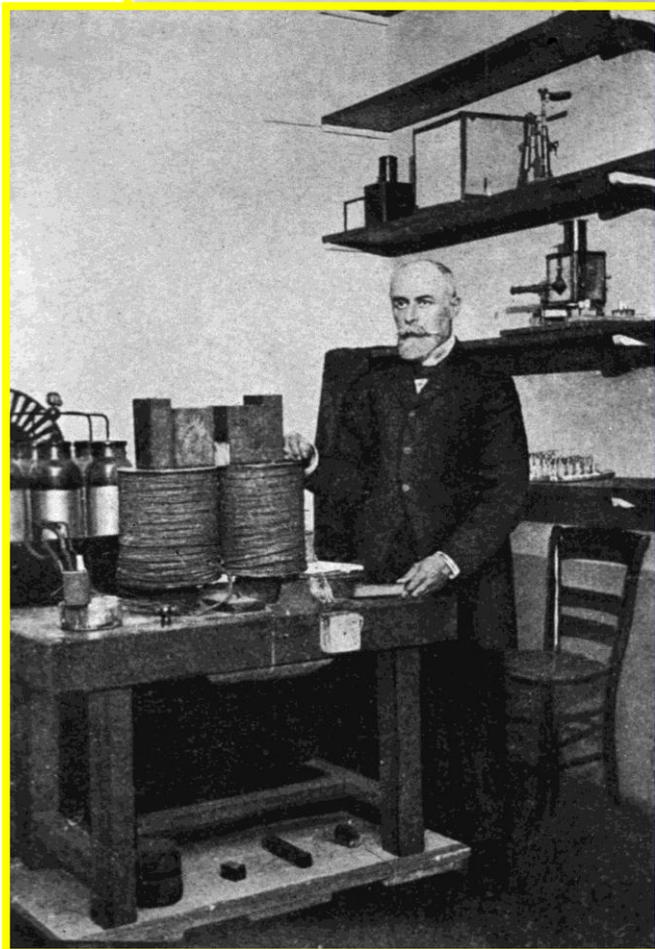
Объединенный институт
 ядерных исследований
 БИБЛИОТЕКА



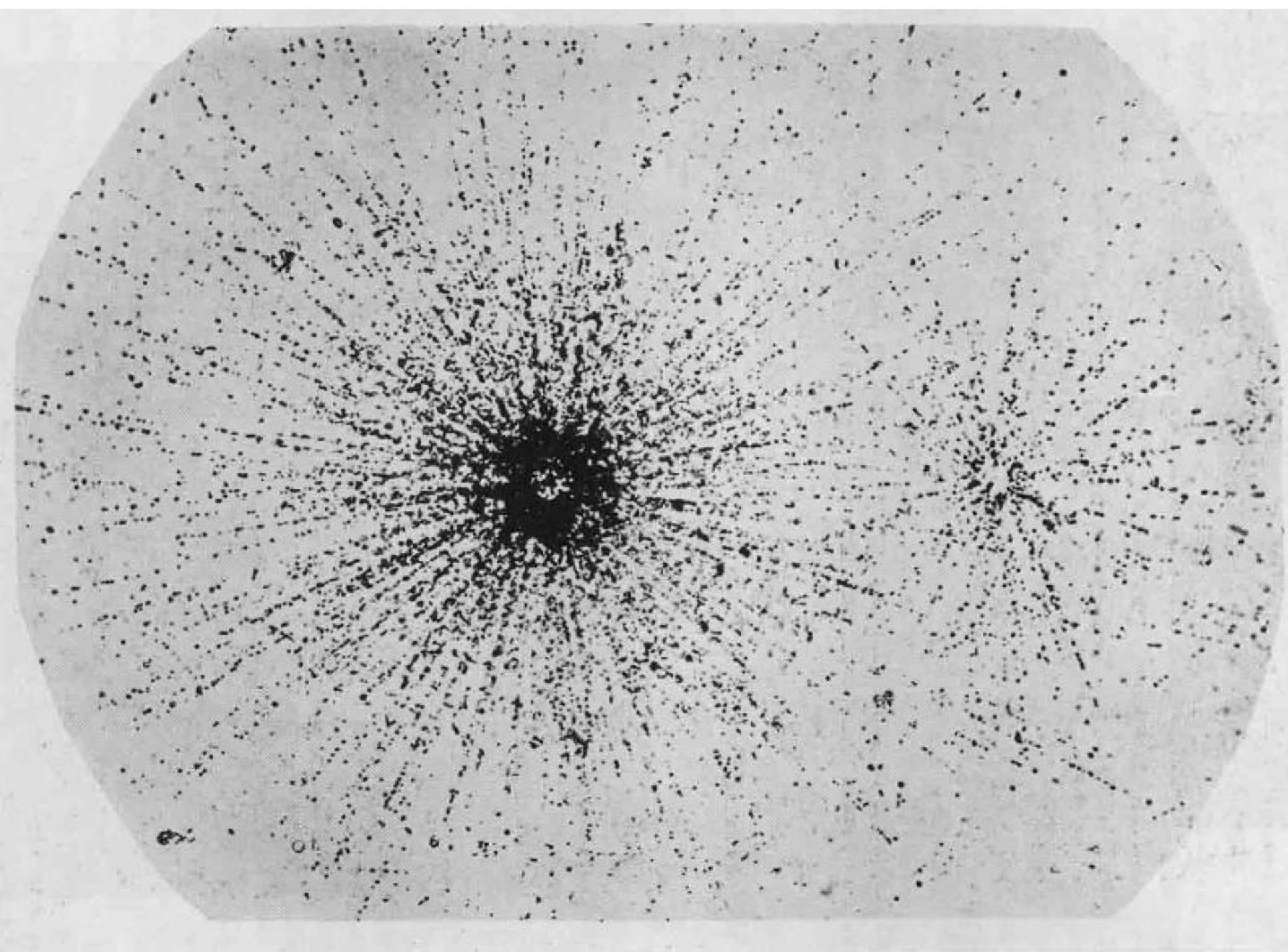
PERGAMON PRESS
 LONDON · NEW YORK · PARIS · LOS ANGELES

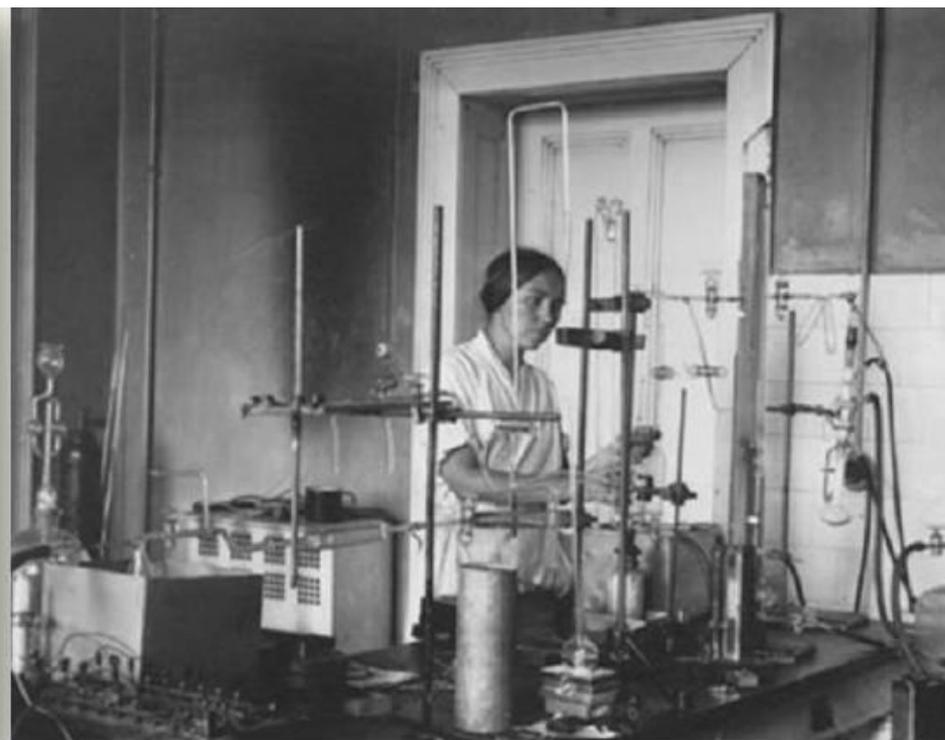
1959

60 - 1896 - 90. . . Sulfate d'Ammoniac et de Potasse
Papier noir. Cuir de laiton blanc.
Exposé au Salon le 27. et à la Cour d'Exposition le 26. -
Vendredi le 15 mars.

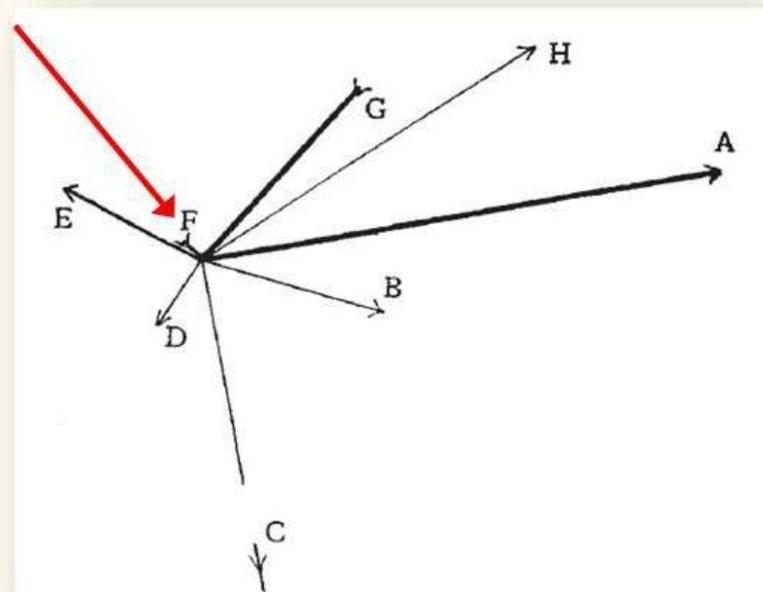
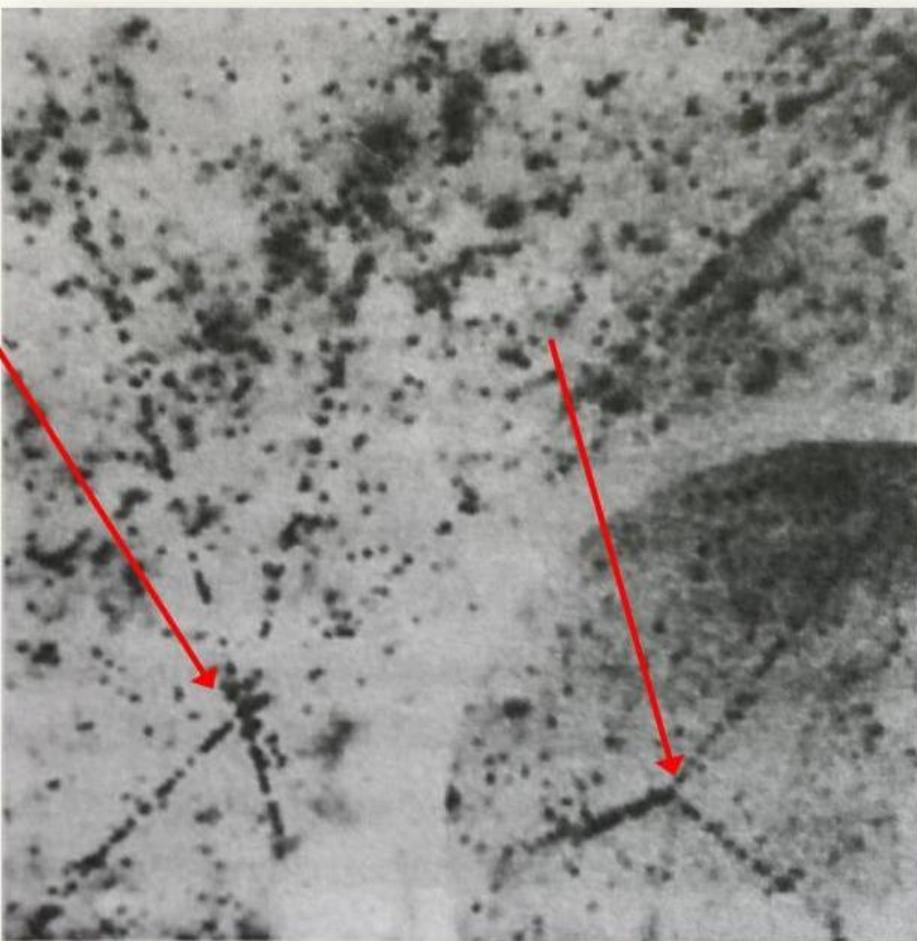


1896. r.





Marietta Blau (links; um 1927) und Hertha Wambacher (rechts, nach 1928) im Labor am Wiener Radiuminstitut



ON photographic plates which had been exposed to cosmic radiation on the Hafelekar (2,300 m. above sea-level) near Innsbruck for five months, we found, apart from the very long tracks (up to 1,200 cm.)from a single point within the emulsion several tracks, some of them having a considerable length, take their departure. We observed four cases with three particles, four with four and 'stars' with six, seven, eight and nine particles, one of each kind.

"Утвержден"
ДИРЕКТОР
Физического Института
им.П.Н.Лебедева АН СССР
академик

И С

инв. № 3

Саввинский /С.И.ВАВИЛОВ/

5 августа 1950 г.

О Т Ч Е Т

"ИСКУССТВЕННЫЕ" МЕЗОНЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ
С ПОМОЩЬЮ УСКОРИТЕЛЯ "С-25"

Зав. лабораторией ФИАН
Член-корр. АН СССР

В.Л. Векслер
/В.Л.Векслер/

Руководитель: действит.член АН УССР А.П.Комар *Комар*

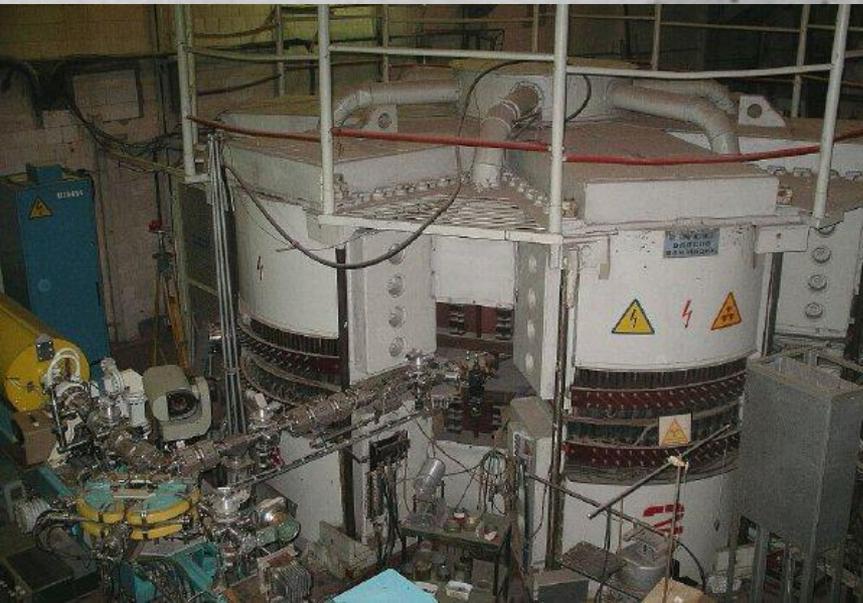
Исполнители: действит.член АН УССР А.П.Комар
инженер В.Г. Ларонова
студент-дипломник В.М.Лихачев.

Инв. № 294 инв

вст. инв.

Москва 1950 год

ФИАН
И.И.И.И.



АКАДЕМИИ НАУК СОВЕТА СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ П.Н. ЛЕБЕДЕВА

СТАЛОННАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

"УТЗЕР ДАР"

Директор физического
Института им. П.Н. Лебе-
дева Академии Наук СССР
академик

~~Секрет~~

изд. № 4

Вх. № 745 от 24/55.

С. Сабелов / С. И. Вавилов /

"5" *сентябрь* 1951 г.



Кандидат физико-матем. наук
Кандидат физико-матем. наук
Главный инженер лаборатории

М.С. РАБИНОВИЧ
А.А. КОЛОМЕНСКИЙ
К.И. БЛИНОВ

О Б Ъ Е К Т "КМ"

ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ

ТОМ II

ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ



ИСПОЛНИТЕЛИ

Кандидат физико-матем. наук
Кандидат физико-матем. наук
Кандидат физико-матем. наук
Научный сотрудник
Научный сотрудник

М.С. РАБИНОВИЧ
А.А. КОЛОМЕНСКИЙ
Л.Л. САБСОВИЧ
А.М. БАЛДИН
В.В. МИХАЙЛОВ

Научный руководитель объекта
Член-корреспондент АН СССР

В. Векслер / В. И. Векслер /

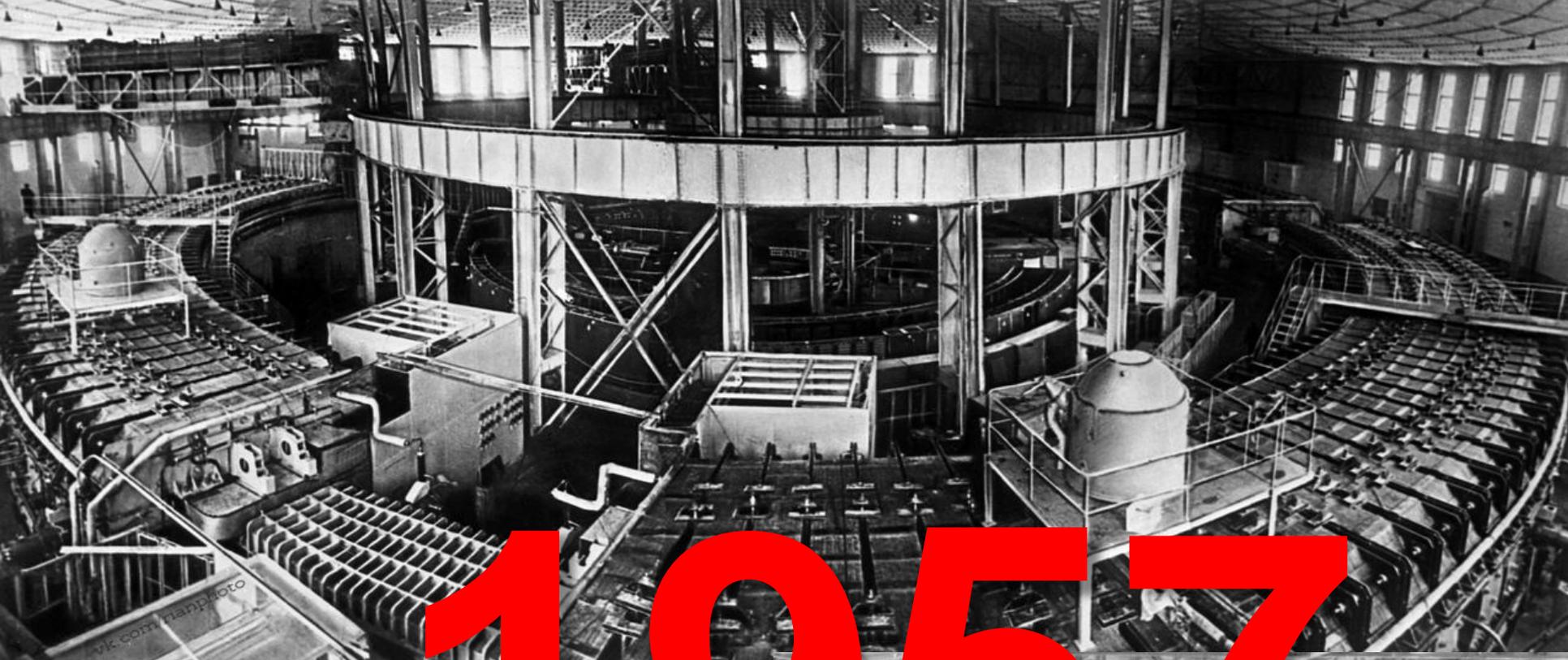
Главный инженер Сталонной лаборатории
Физического Института АН СССР

К. И. Блинов / К. И. Блинов /

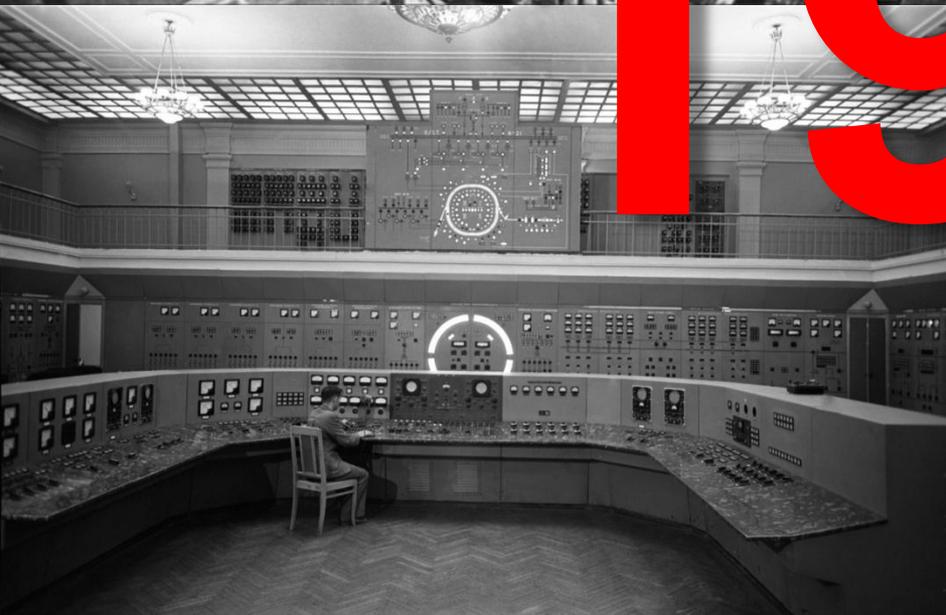
гор. МОСКВА

1950 год





1957



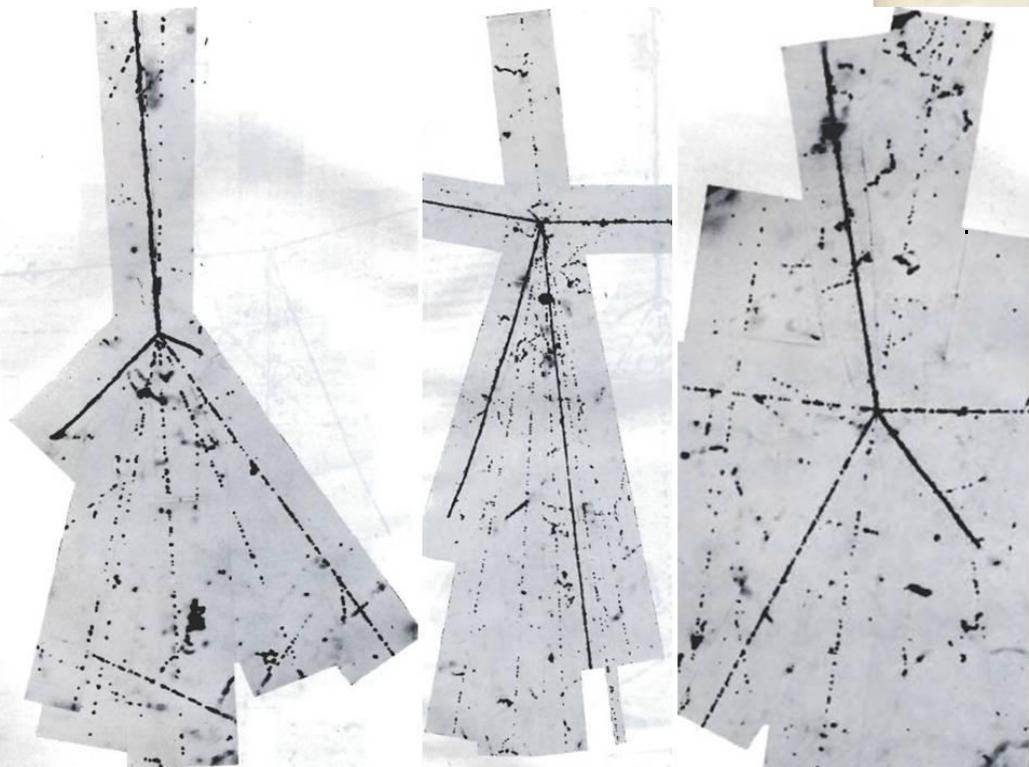
С. ПАУЭЛЛ, П. ФАУЛЕР, Д. ПЕРКИНС

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ
ФОТОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

**ОБЗОР
ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ЭКСПЕРИМЕНТА
И ОТКРЫТИЙ, ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЙ АТЛАСОМ
МИКРОФОТОГРАФИИ**

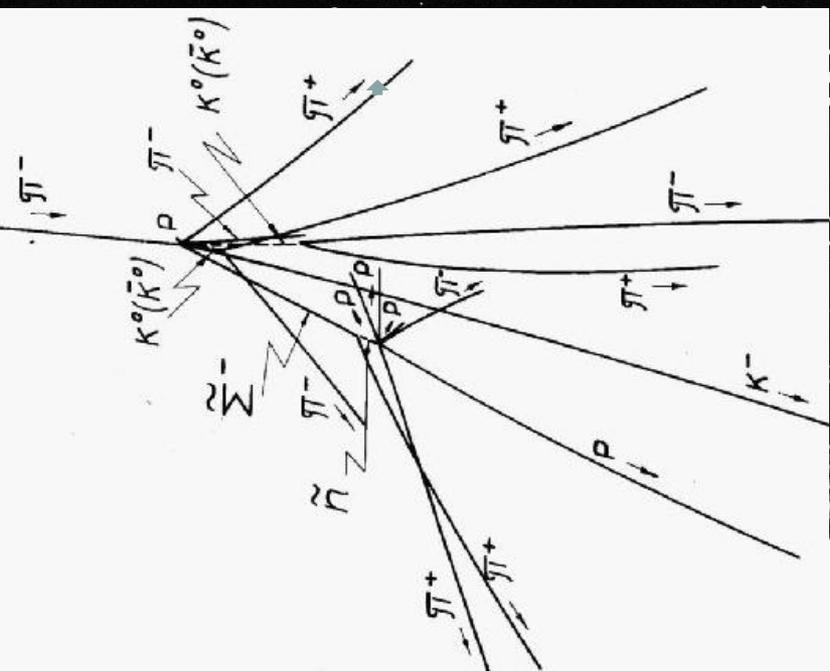
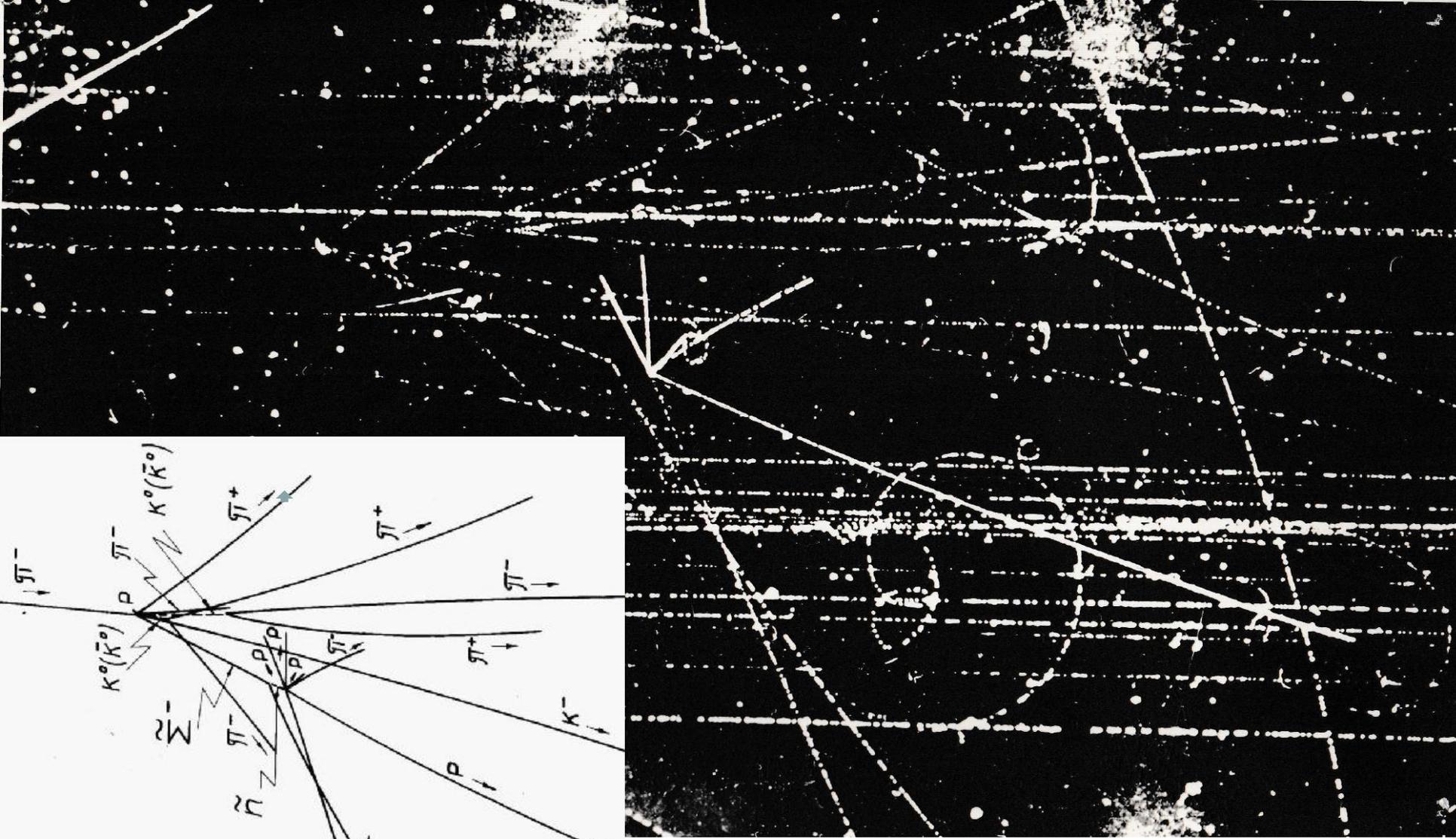
ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО
А. А. ВАРФОЛОМЕЕВА, Е. И. ДОБРОХОТОВА
И Ю. Л. СОКОЛОВА

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
Г. Б. ЖДАНОВА

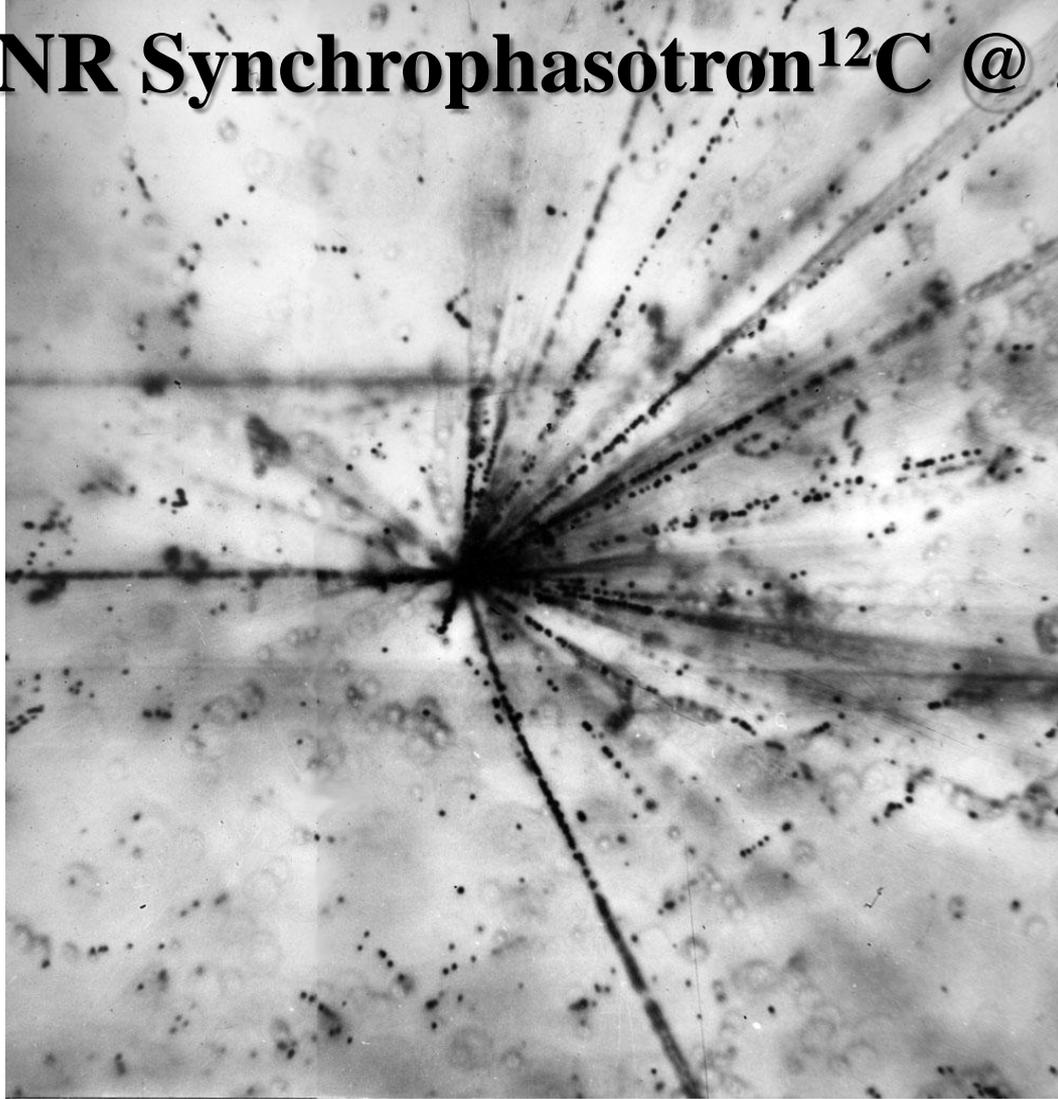


ИЗДАТЕЛЬСТВО ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

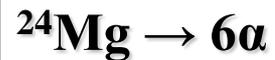
Москва 1962



1974 JINR Synchrotron ^{12}C @ 3.65 A GeV



Становление в начале 70-х годов релятивистской ядерной физики было поддержано сообществами, имевшими богатый опыт применения ядерных эмульсий. Ускорители частиц открыли возможность изучения взаимодействий различных ядер определенной энергии, что позволило исследовать методом ядерной эмульсии спектры релятивистских фрагментов. Ядерная эмульсия облучалась ядрами, впервые ускорившимися на синхрофазотроне ОИЯИ, БЕВАЛАКе, а затем, на ускорителях AGS (BNL) и SPS (CERN).



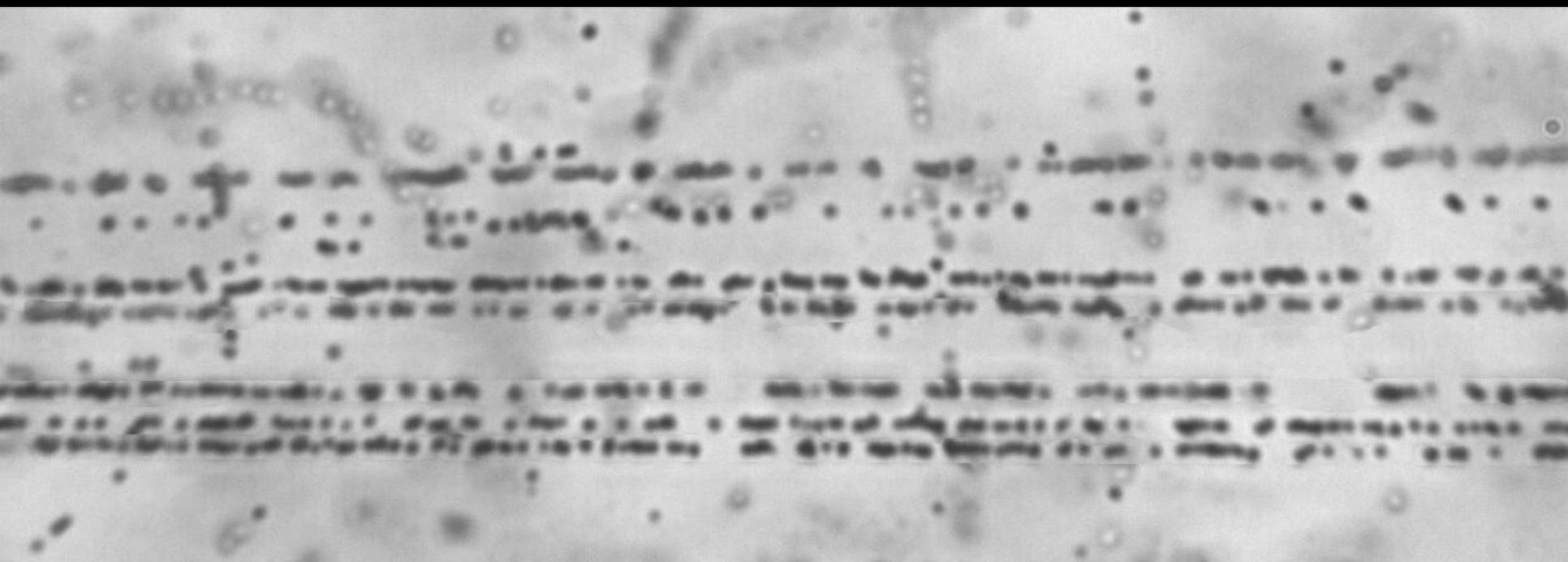
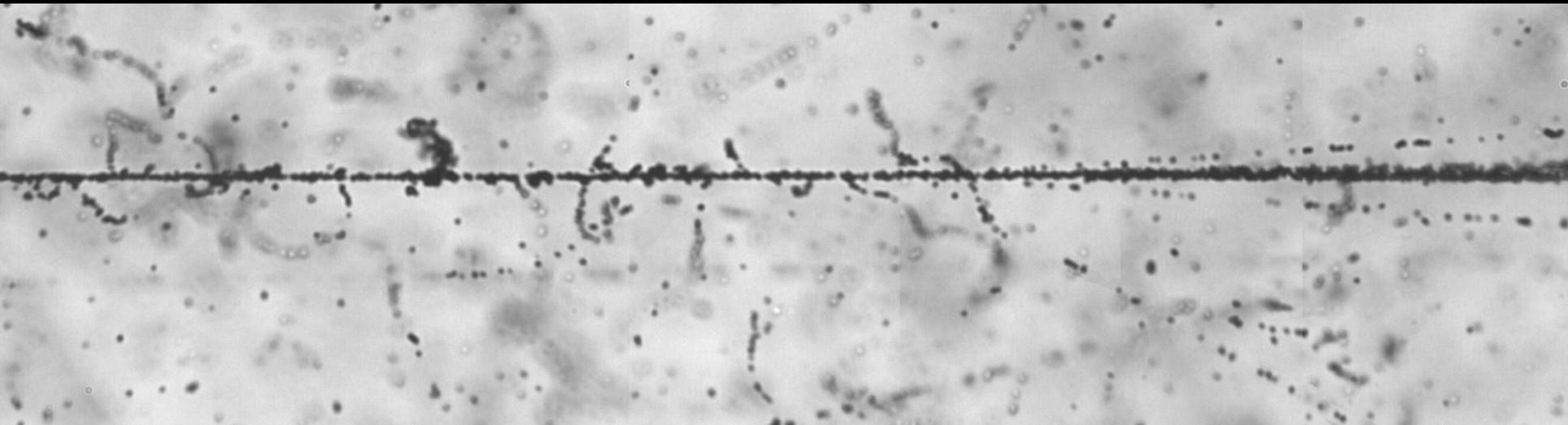
Исследование ядерной структуры в релятивистском подходе в условиях очень малых передач энергии–импульса имеет важные преимущества, поскольку в конечных состояниях фрагментов должна наиболее полно отражаться структура начальных состояний ядер.

Современные эксперименты проводятся с релятивистскими радиоактивными ядрами с большим избытком нейтронов на магнитных спектрометрах. Они ориентированы на регистрацию фрагментов с начальным зарядом как у исследуемого ядра или близким к нему.

Однако в таком подходе теряются принципиально важные каналы, содержащие фрагменты *He* и *H*, и, соответственно, распады ^8Be и ^9B . Возможность разрешения этой проблемы методом ядерной эмульсии мотивирует эксперимент БЕККЕРЕЛЬ на нуклотроне ОИЯИ.



3.65A GeV ^{28}Si



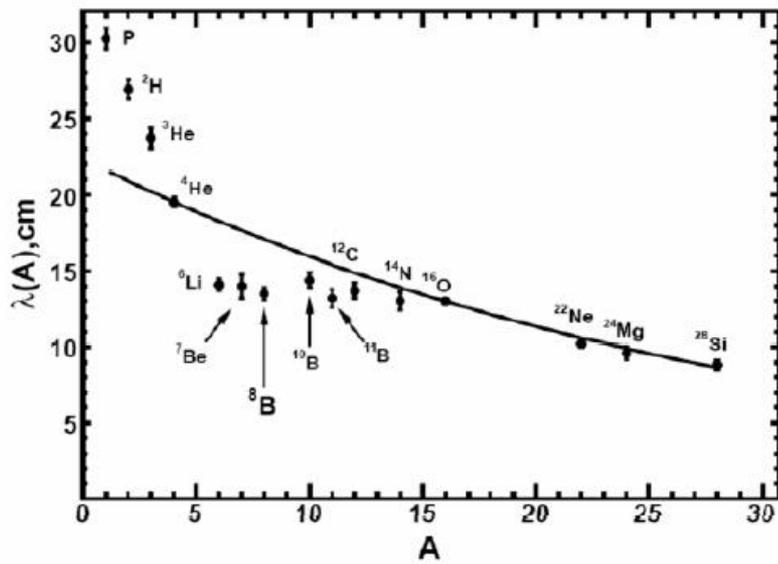


Рис. II.11 Данные по пробегам легких ядер в эмульсии, включая измерения настоящей работы (${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$, ${}^{10,11}\text{B}$, ${}^{14}\text{N}$)

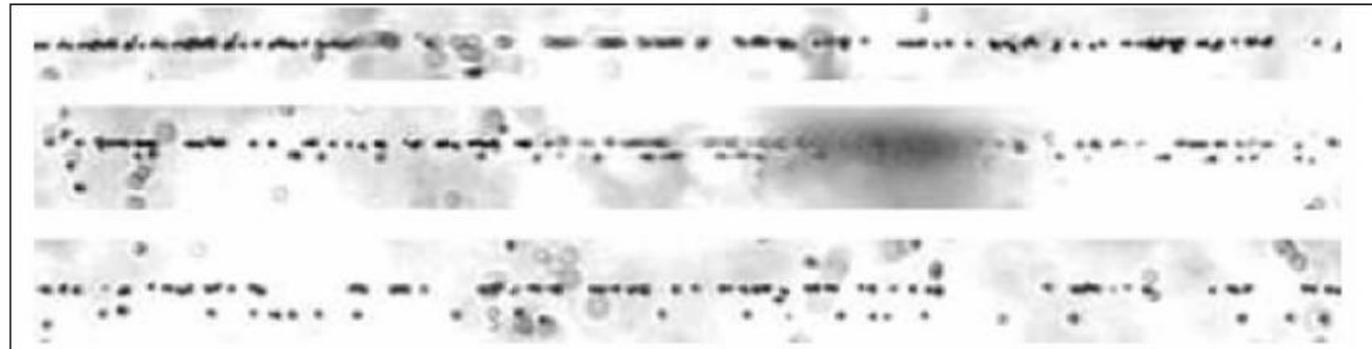
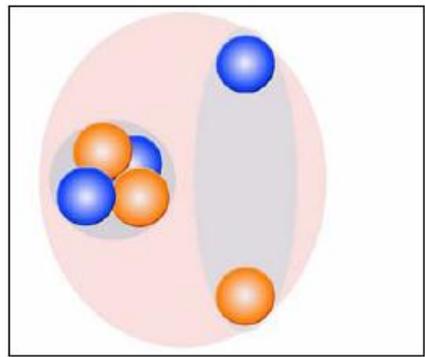


Рис II.12. Фрагментация релятивистского ядра ${}^6\text{Li}$ на одно- и двухзарядный фрагмент в эмульсии; на верхней фотографии видна вершина взаимодействия и узкая струя их двух фрагментов; при смещении вдоль струи фрагментов (нижние фотографии) отчетливо разделяются один однозарядный и один двухзарядный фрагменты

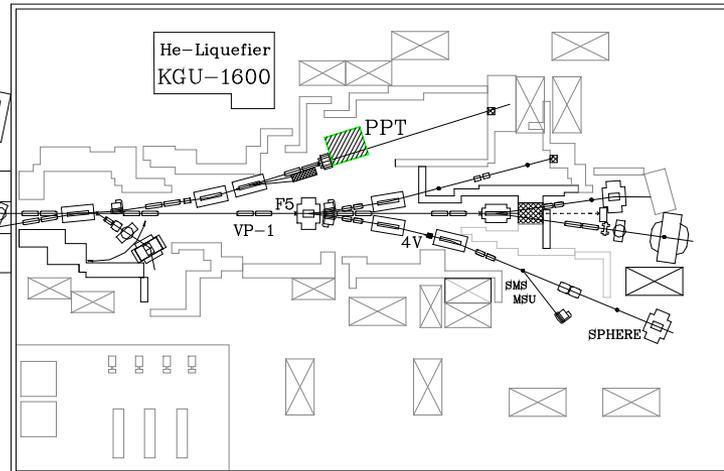
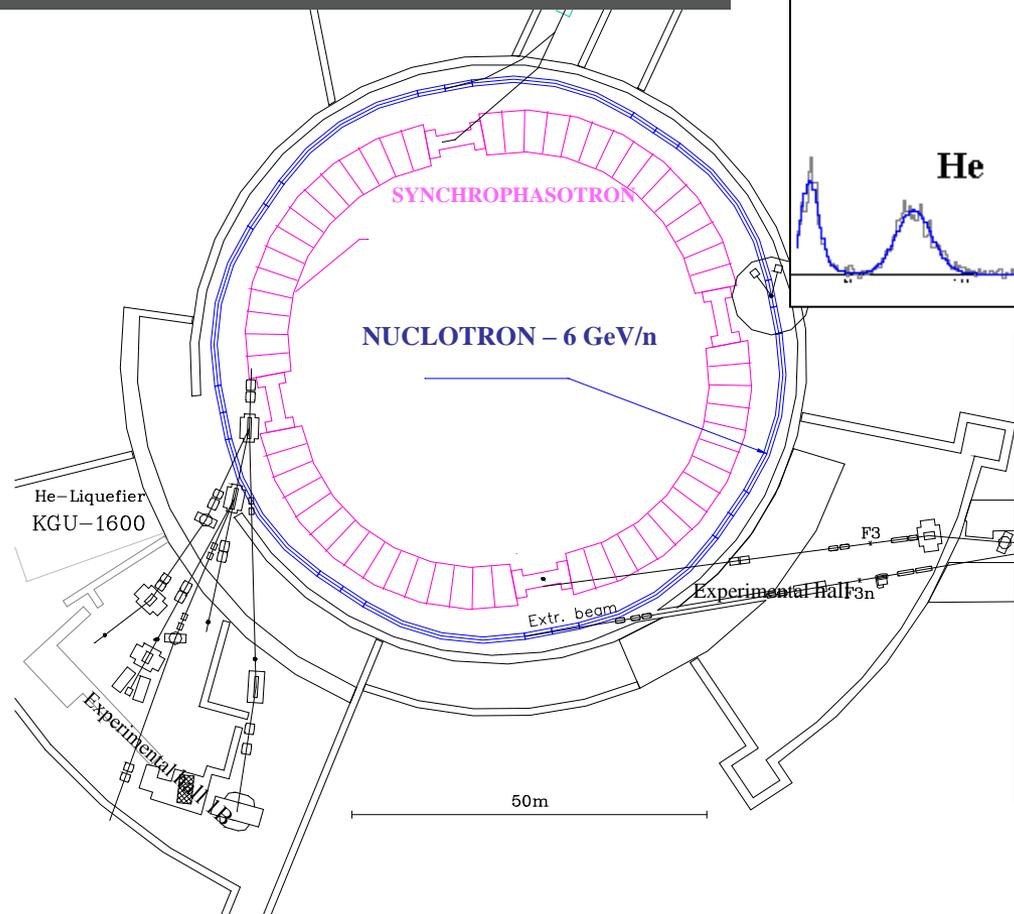
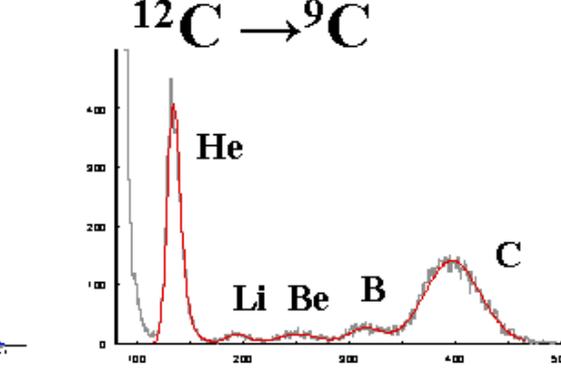
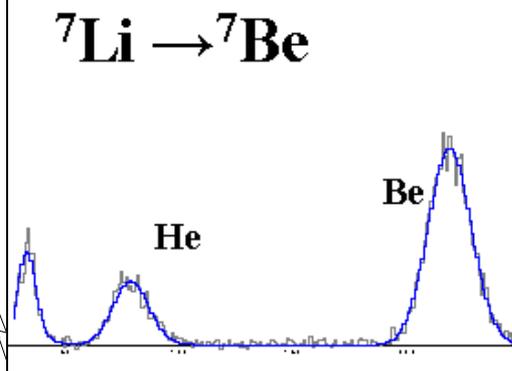
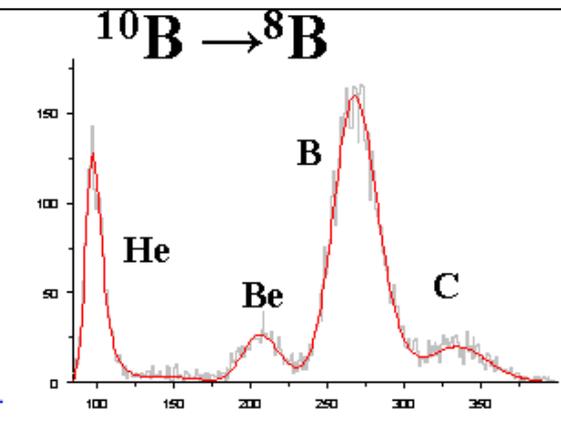
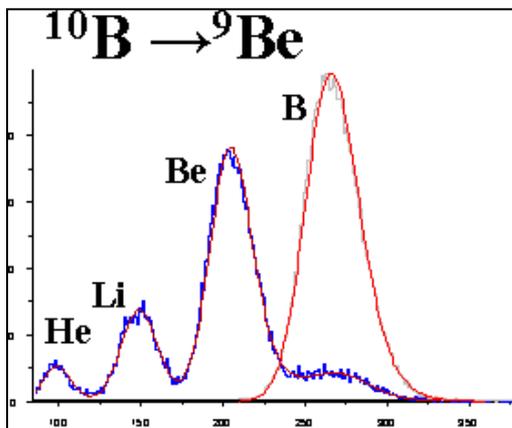
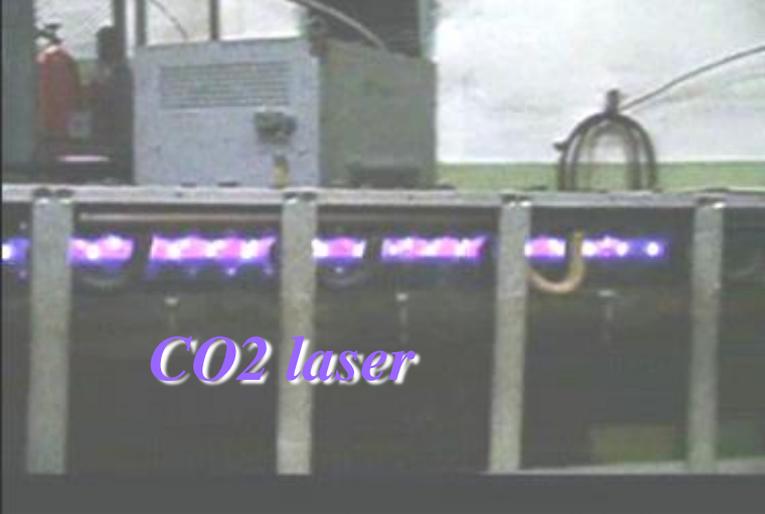


Коваленко

Александр Дмитриевич

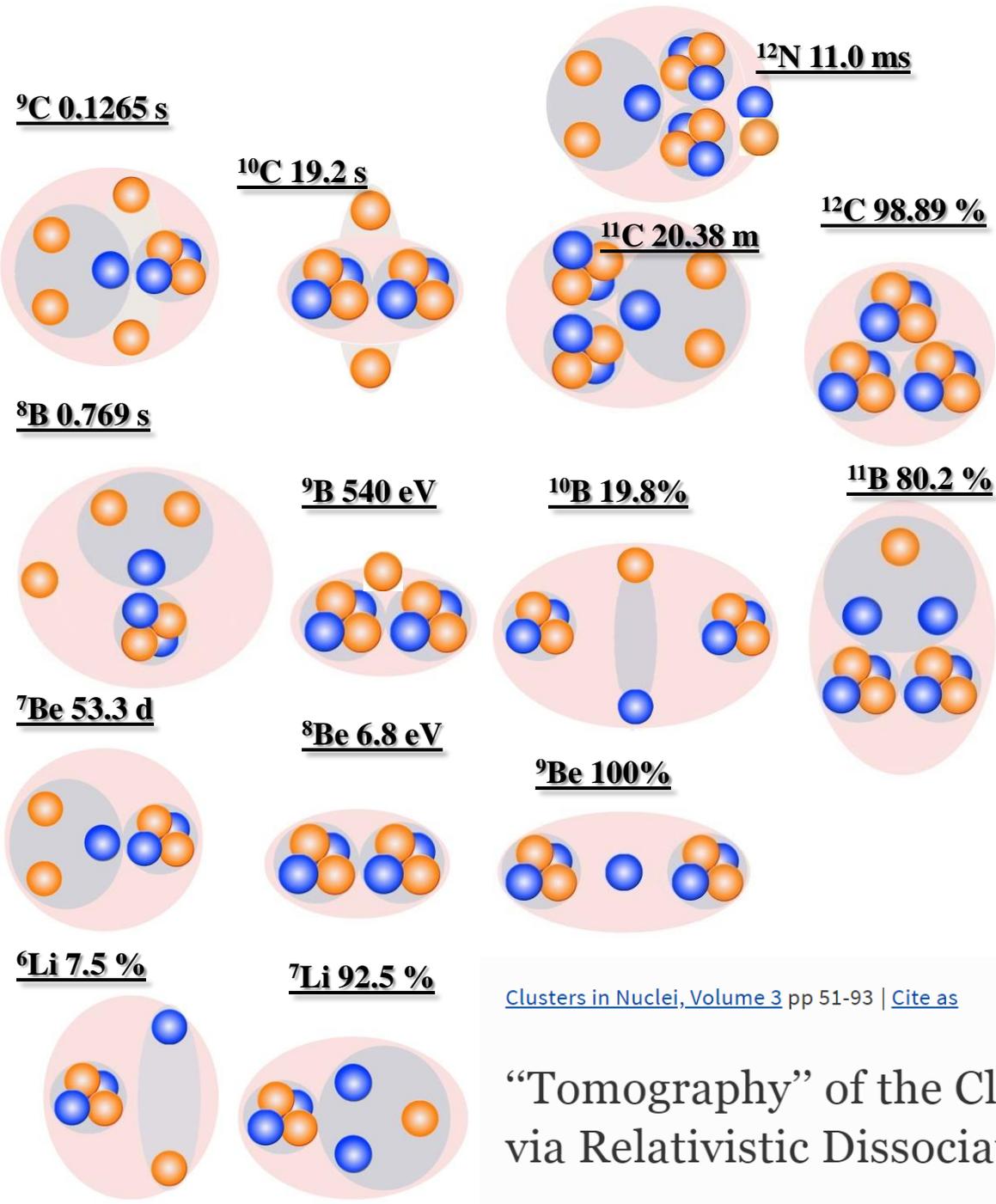
Малахов

Александр Иванович



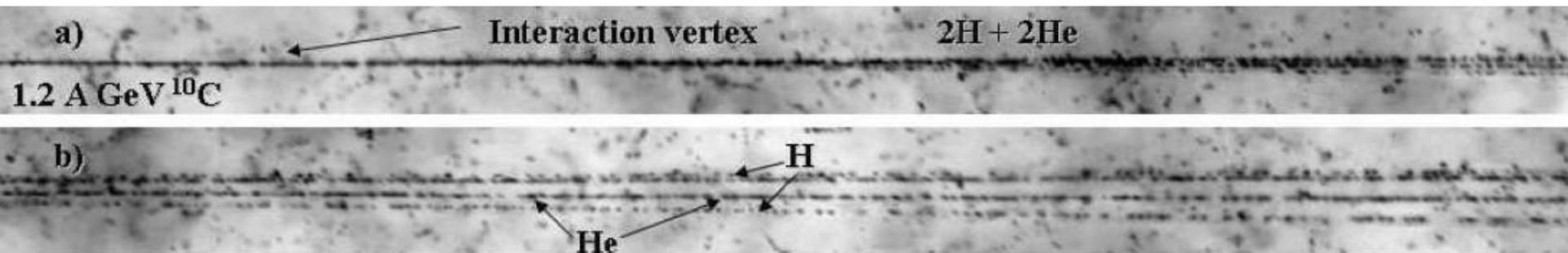
Christian Beck *Editor*

Clusters in Nuclei, Volume 3

 Springer


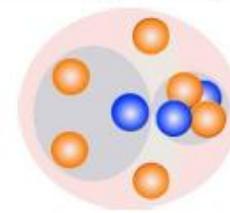
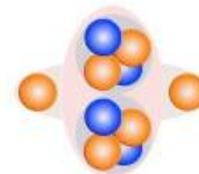
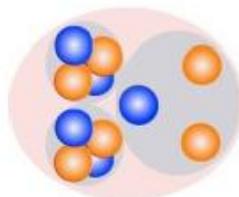
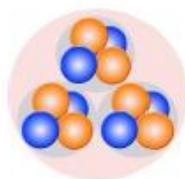
[Clusters in Nuclei, Volume 3](#) pp 51-93 | [Cite as](#)

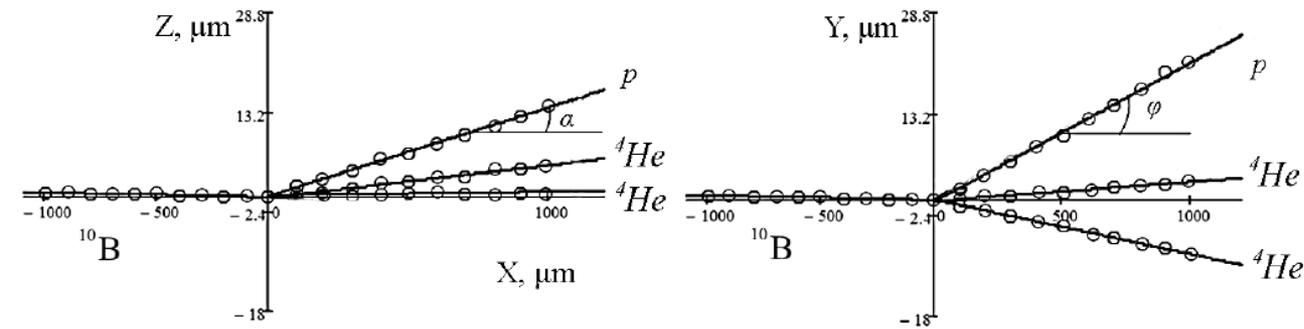
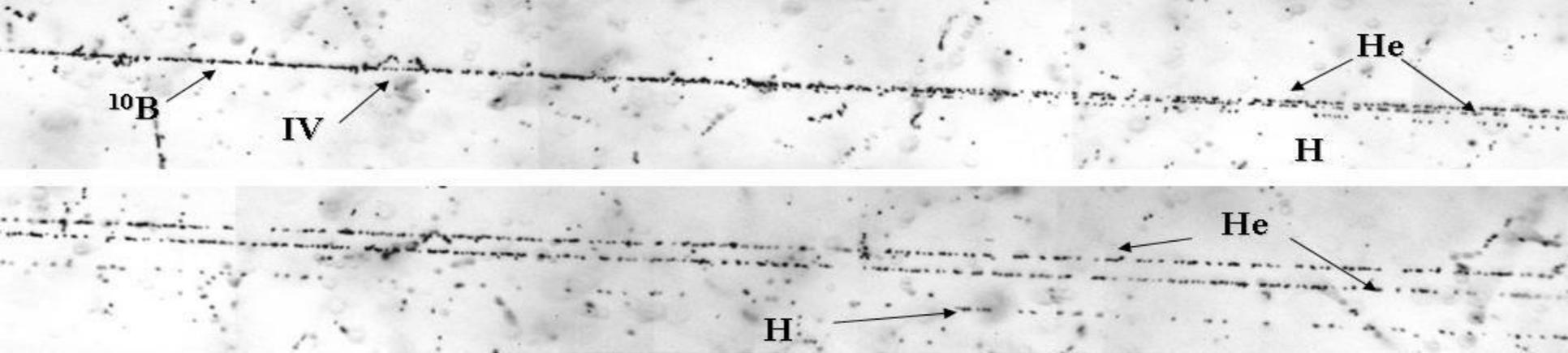
“Tomography” of the Cluster Structure of Light Nuclei
via Relativistic Dissociation



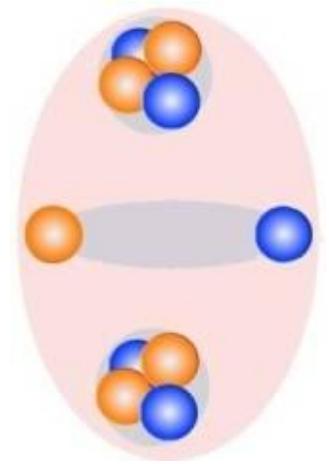
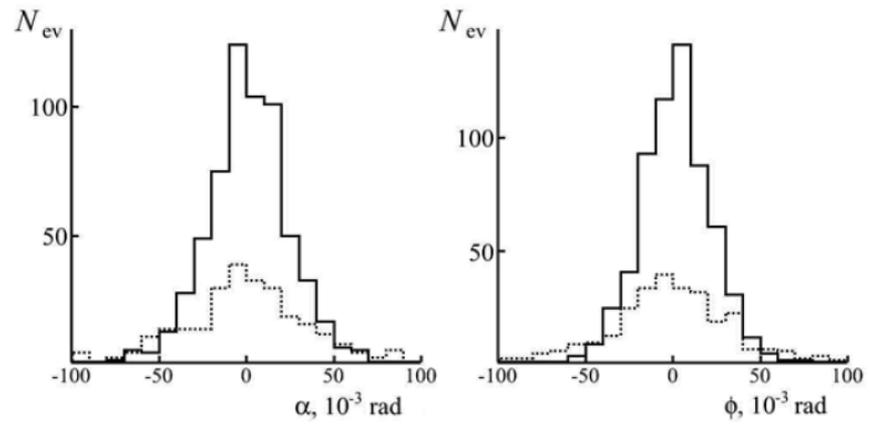
Зарядовая топология «белых» звезд

Channel	^{12}C	^{11}C	^{10}C	^9C
B + H		6 (5 %)	1 (0.4 %)	15 (14 %)
Be + He		18 (13 %)	6 (2.6 %)	
Be + 2H				16 (15 %)
3He	100 (100 %)	25 (17 %)	12 (5.3 %)	16 (15 %)
2He + 2H		72 (50 %)	186 (82 %)	24 (23 %)
He + 4H		15 (11 %)	12 (5.3 %)	28 (27 %)
Li + He + H		5 (3 %)		
Li + 3H			1 (0.4 %)	2 (2 %)
6H		3 (2 %)	9 (4 %)	6 (6 %)

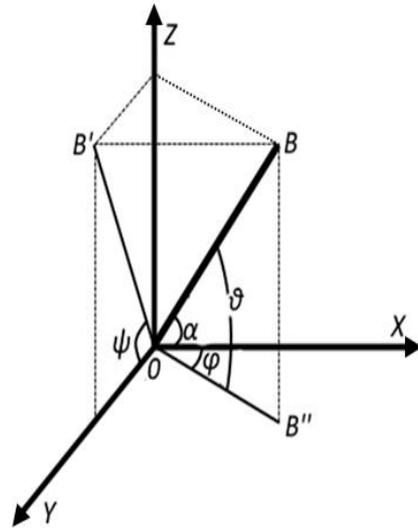
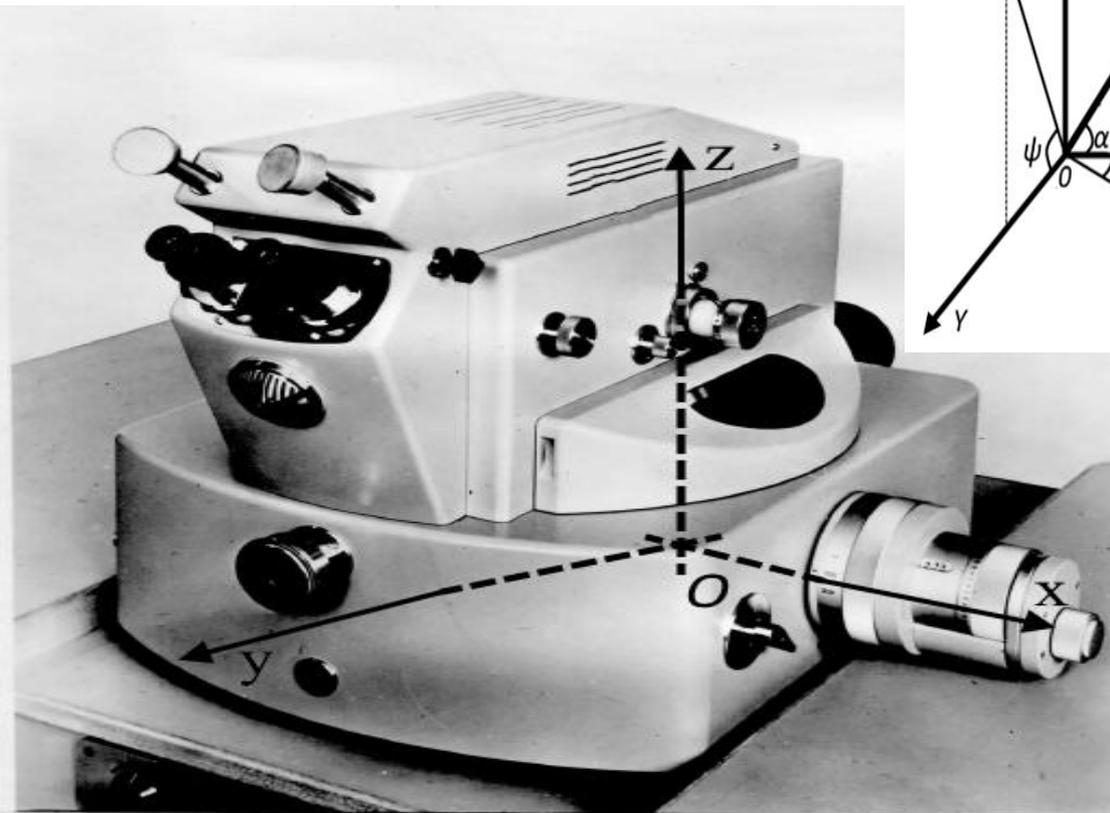




Example of restored directions in event $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ @ 1.2 A GeV over vertical and planar planes.



Distributions of fragments He (solid) and H (dotted) over dip and planar angles α and ϕ in events $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ @ 1.2 A GeV.



$$P_x = P_0 \cdot A \cdot \cos \alpha \cdot \cos \varphi$$

$$P_y = P_0 \cdot A \cdot \cos \alpha \cdot \sin \varphi$$

$$P_z = P_0 \cdot A \cdot \sin \alpha$$

$$P_{tot} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}$$

$$E_\alpha = \sqrt{P_0^2 \cdot A^2 + m_\alpha^2}$$

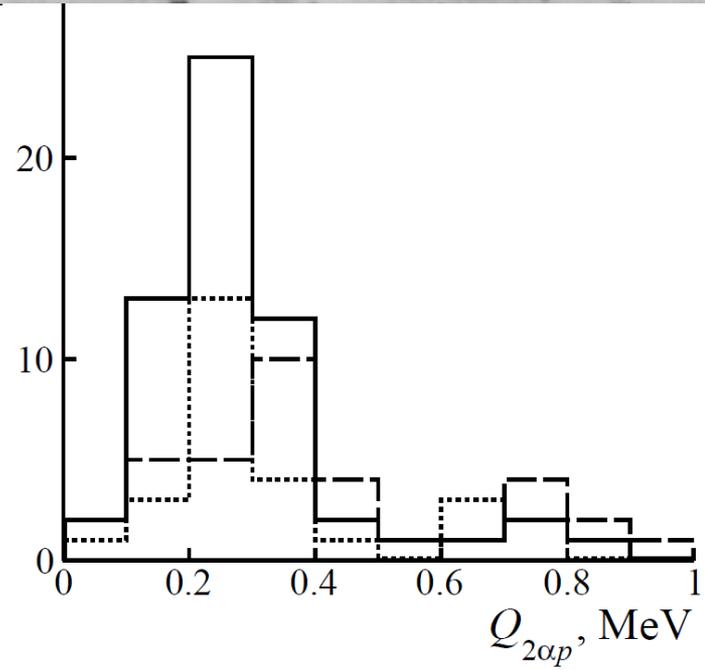
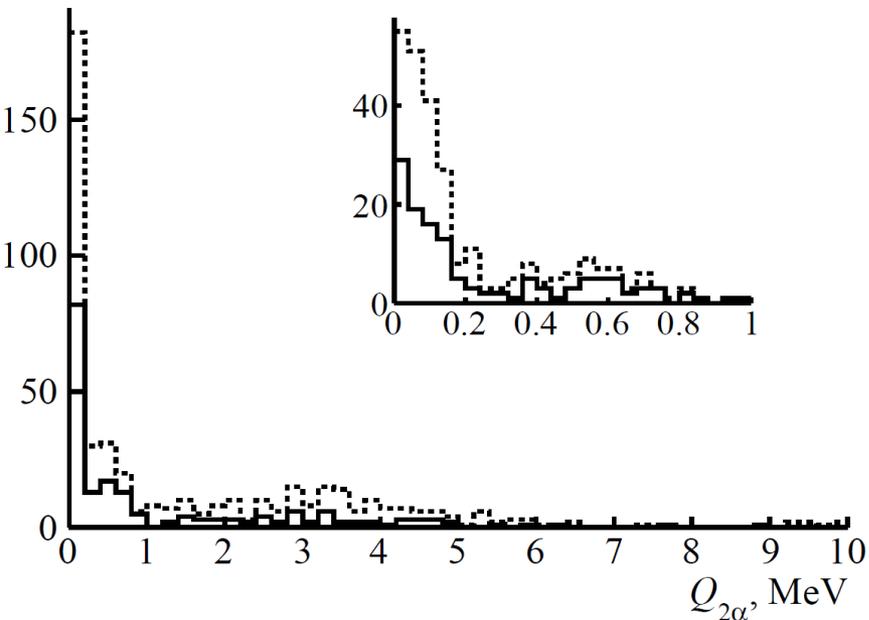
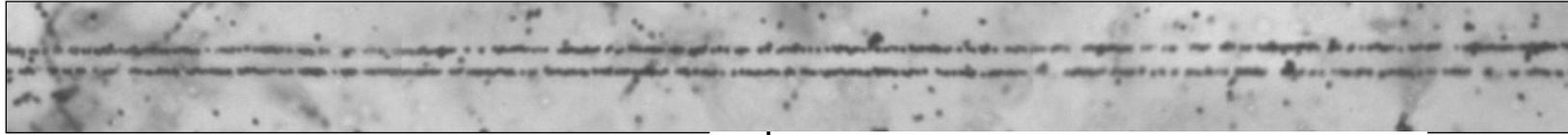
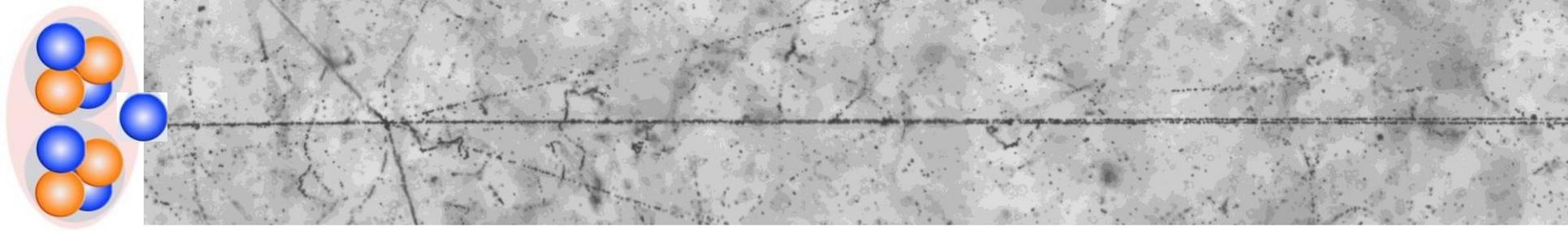
$$\Theta_{2\alpha} = \frac{P_{x1} \cdot P_{x2} + P_{y1} \cdot P_{y2} + P_{z1} \cdot P_{z2}}{P_{tot1} \cdot P_{tot2}}$$

$$Q_{2\alpha} = M_{2\alpha} - 2 \cdot m_\alpha$$

$$Q_{2\alpha} = \sqrt{2 \cdot [m_\alpha^2 + E_\alpha^2 - \vec{P}_{\alpha 1} \cdot \vec{P}_{\alpha 2}]} - 2 \cdot m_\alpha$$

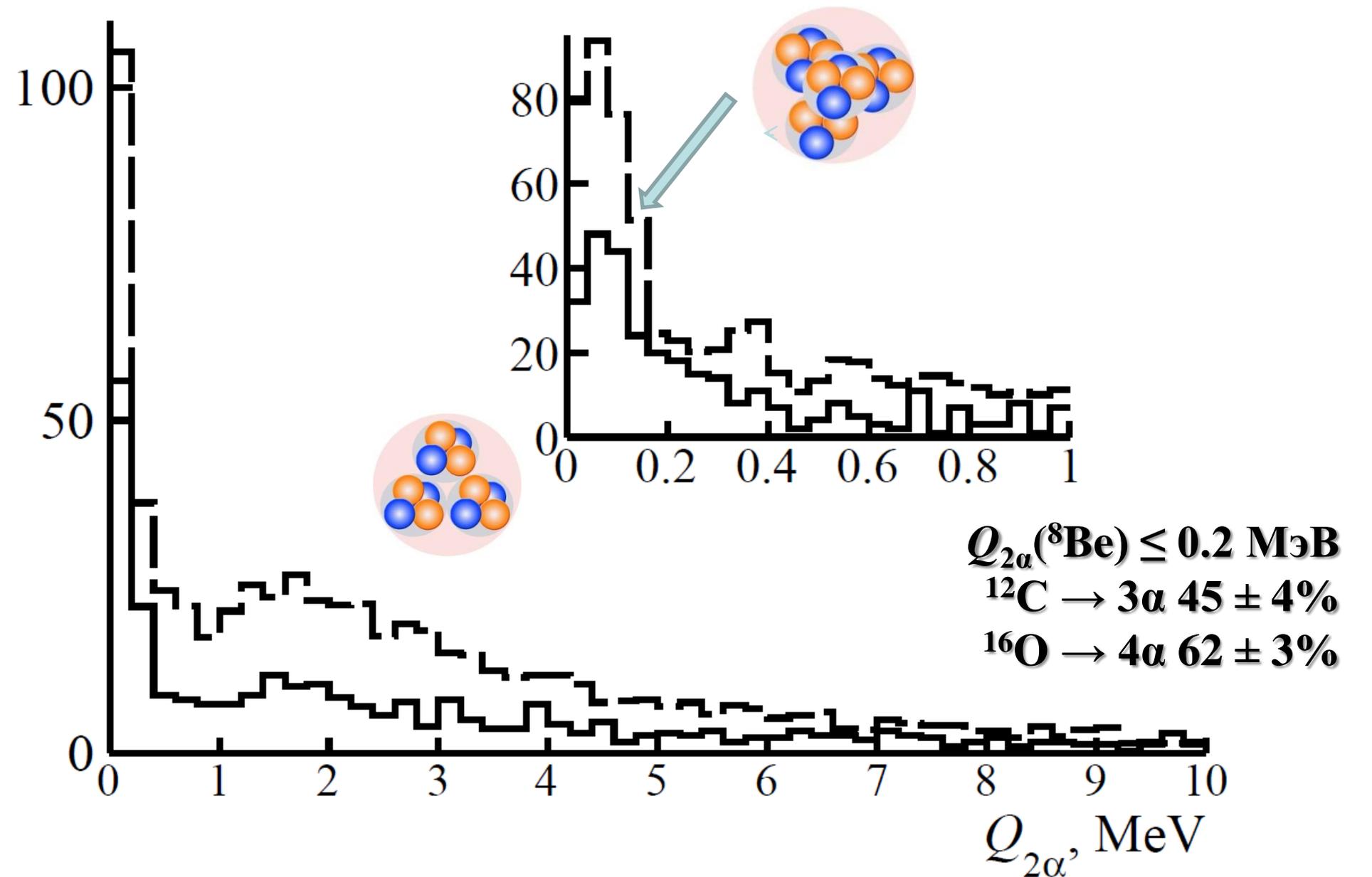
$$Q_{3\alpha} = \sqrt{3 \cdot m_\alpha^2 + 2 \cdot \sum_{i \neq j} (E_{\alpha i} \cdot E_{\alpha j} - \vec{P}_{\alpha i} \cdot \vec{P}_{\alpha j})} - 3 \cdot m_\alpha$$

Инвариантная масса системы релятивистских фрагментов определяется как сумма всех произведений 4-импульсов $P_{i,k}$ фрагментов $M^{*2} = \sum(P_i \cdot P_k)$. Вычитание массы начального ядра или суммы масс фрагментов $Q = M^* - M$ является вопросом удобства представления. Компоненты $P_{i,k}$ определяются в приближении сохранения фрагментами начального импульса на нуклон. Реконструкция по инвариантной массе распадов нестабильных ядер ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{Be}$, освоенная в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ, подтвердила справедливость этого приближения.



Распределение по $Q_{2\alpha}$ 500 2α -пар, в том числе 198 “белых” (сплошная), указывает на ограничение $Q_{2\alpha}({}^8\text{Be}) \leq 0.2$ МэВ. Имеются “наплывы” при $Q_{2\alpha} = 0.6$ и 3 МэВ. Первый отражает возбуждение ${}^9\text{Be}$ при 2.43 МэВ, а второй – состояние ${}^8\text{Be} 2^+$.

Распределение числа 2α -троек $N_{2\alpha p}$ по инвариантной массе $Q_{2\alpha p} (< 1$ МэВ) в событиях когерентной диссоциации ${}^{10}\text{C} \rightarrow 2\text{He}2\text{H}$ (сплошная) и диссоциации ${}^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He}2\text{H}$ (точки) и ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{HeH}$ (пунктир).

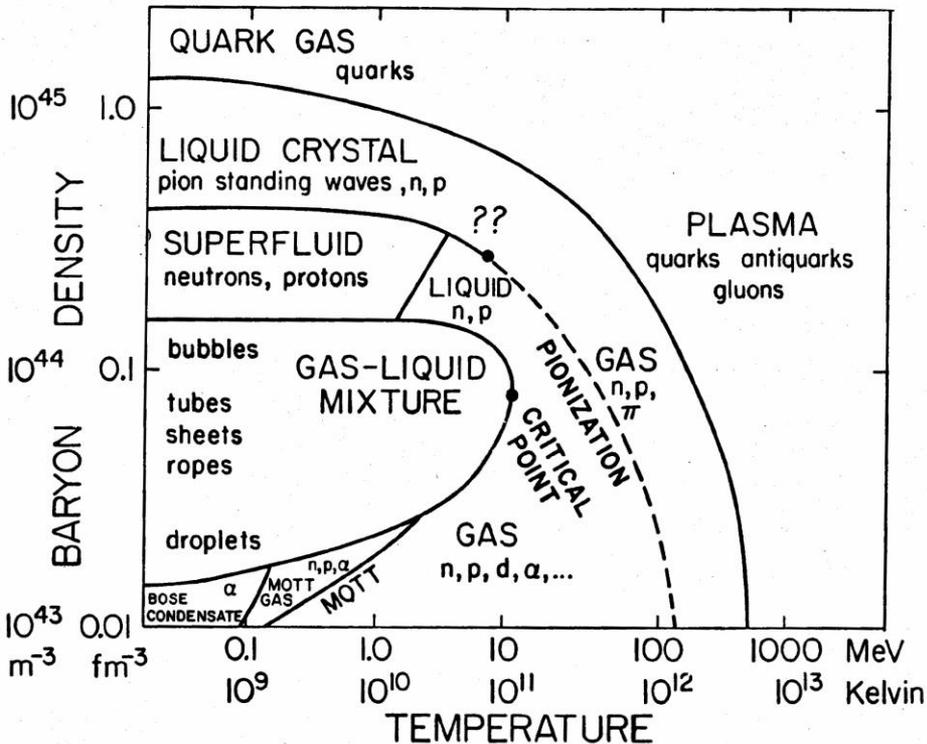


Распределение α -пар по инвариантной массе $Q_{2\alpha}$ в когерентной диссоциации ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ (сплошная) и ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ (пунктир) при 3.65 А ГэВ; на вставке увеличенная часть $Q_{2\alpha} < 1 \text{ МэВ}$ (шаг 40 кэВ); гистограммы нормированы на числа “белых” звезд N_{ws} .

Alpha-Clusters in Nuclear Systems

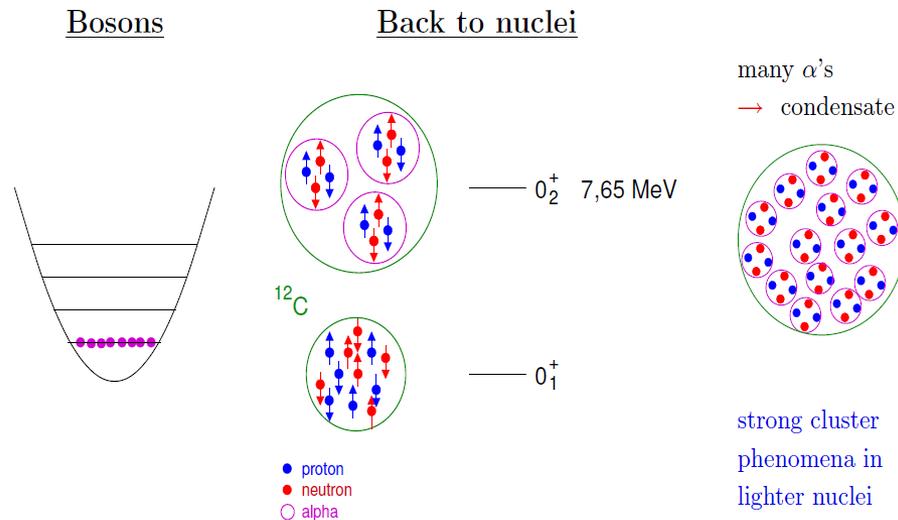
P. Schuck

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

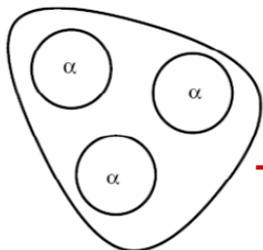


Bosons

Back to nuclei



If 0_2^+ in ^{12}C dilute α -state



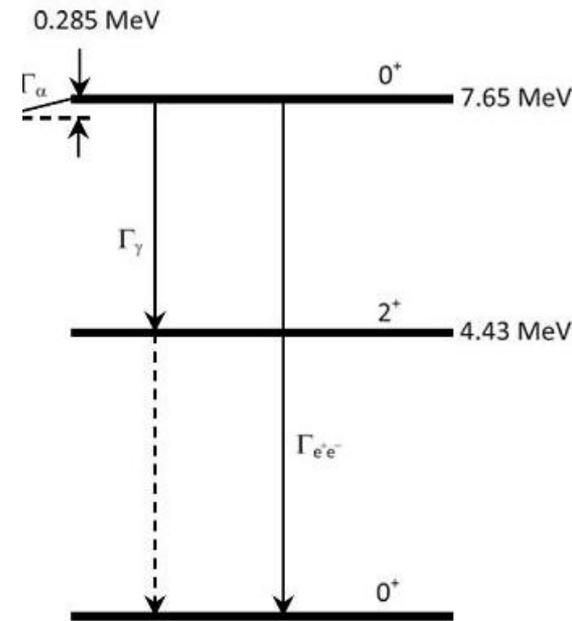
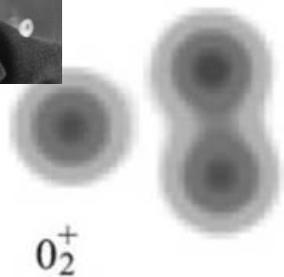
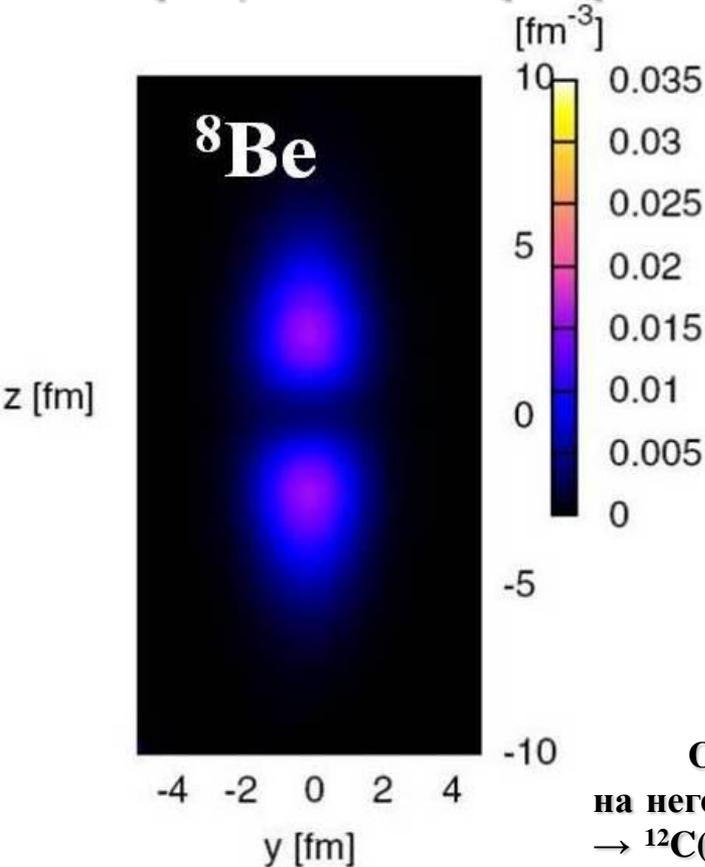
then α -condensate

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

В настоящее время в фокусе исследования находится концепция α -частичного конденсата Бозе-Эйнштейна (α ВЕС)

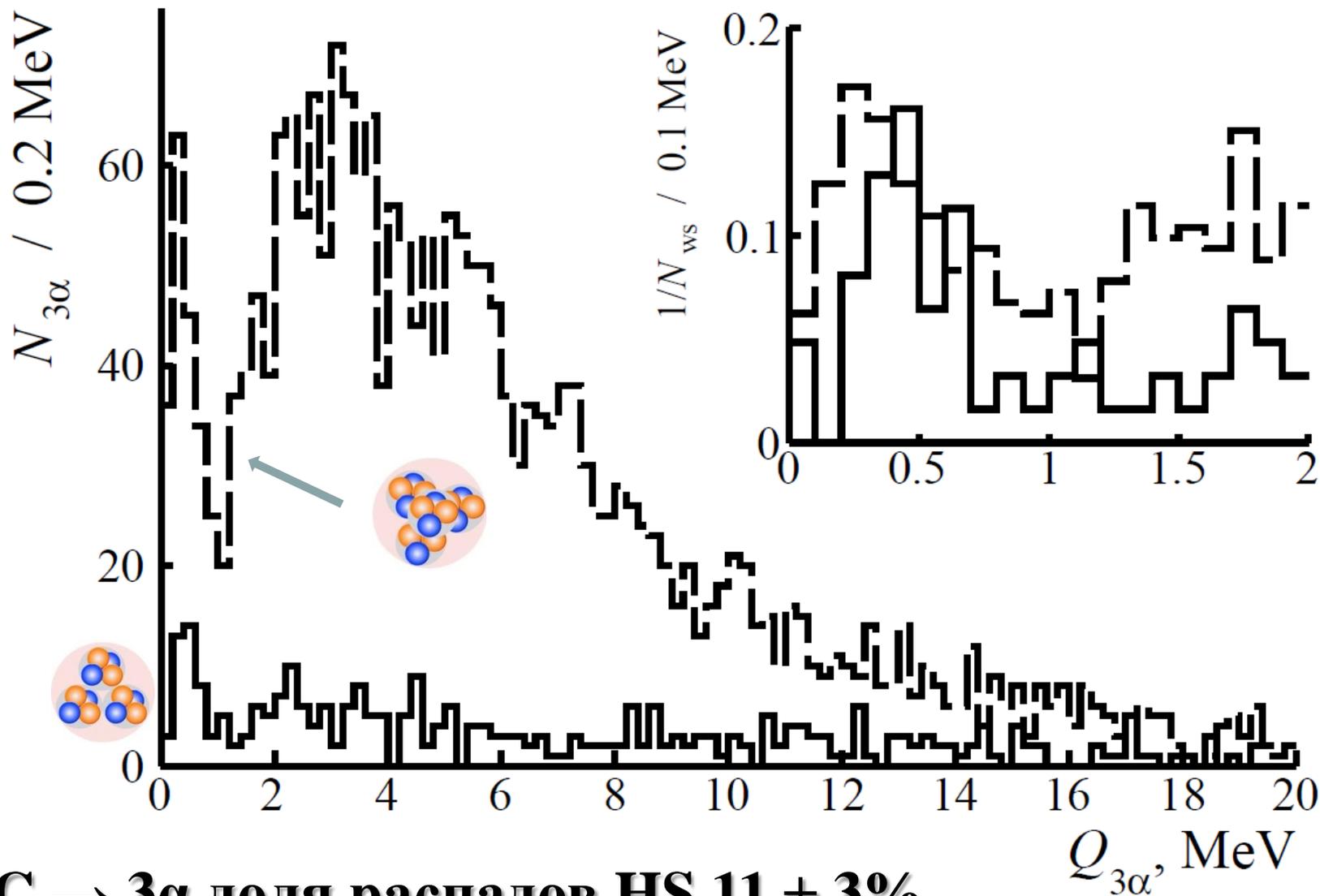
– предельно холодного состояния нескольких S-волновых α -частиц вблизи порогов связи. Нестабильное ядро ^8Be описывается как 2α ВЕС, а возбуждение $^{12}\text{C}(0_2^+)$ или состояние Хойла (HS) как 3α ВЕС. Распады $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ и $^{12}\text{C}(0_2^+) \rightarrow ^8\text{Be}\alpha$ могут служить сигнатурами более сложных распадов $n\alpha$ ВЕС. Так состояние 0_6^+ ядра ^{16}O при 660 кэВ над 4α -порогом, рассматриваемое как 4α ВЕС, может последовательно распадаться $^{16}\text{O}(0_6^+) \rightarrow \alpha^{12}\text{C}(0_2^+)$ или $^{16}\text{O}(0_6^+) \rightarrow 2^8\text{Be}(0^+)$. Его поиски ведутся в нескольких экспериментах по фрагментации легких ядер при низких энергиях. Подтверждение существования этой и более сложных форм α ВЕС могло бы дать основу для расширения сценариев синтеза средних и тяжелых ядер в ядерной астрофизике.

Энергия распада ${}^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ составляет всего $E_{\text{th}}({}^8\text{Be}) = 91.8$ кэВ, а ширина $\Gamma({}^8\text{Be}) = 5.57 \pm 0.25$ эВ. Ядро ${}^8\text{Be}$ является неизменным продуктом распада ${}^9\text{B}$ и HS. Основное состояние ${}^9\text{B}$ выше порога ${}^8\text{Be}p$ на $E_{\text{th}}({}^9\text{B}) = 185.1$ кэВ при $\Gamma({}^9\text{B}) = 0.54 \pm 0.21$ кэВ. Состояние HS является вторым (и первым α -несвязанным) возбуждением ядра ${}^{12}\text{C}$ при $E_{\text{th}}(\text{HS}) = 378$ кэВ над 3α -порогом. Значение $\Gamma(\text{HS}) = 9.3 \pm 0.9$ эВ соответствует по порядку величины ширине распада $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$.



The Hoyle state

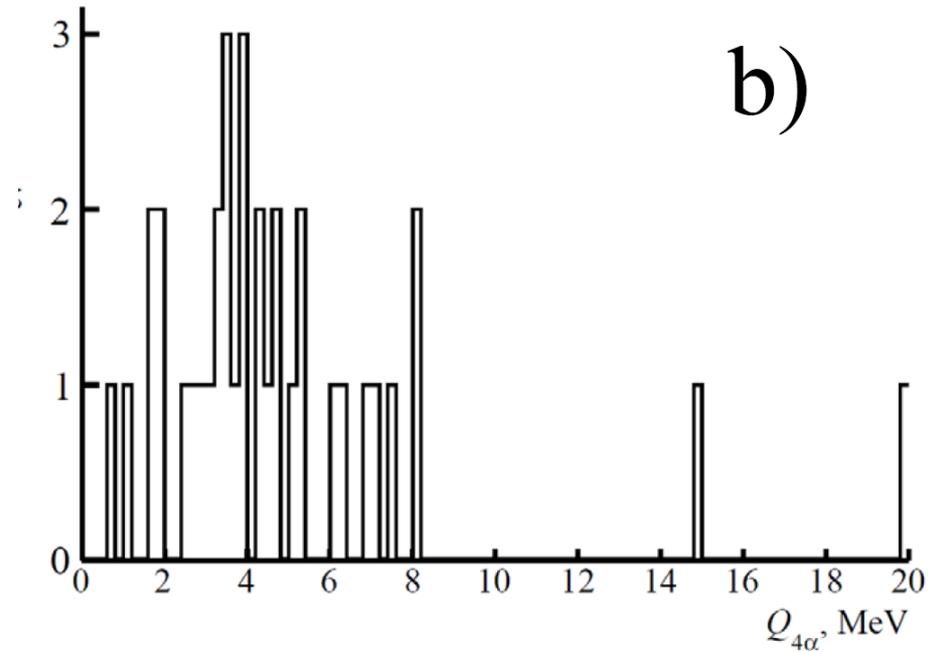
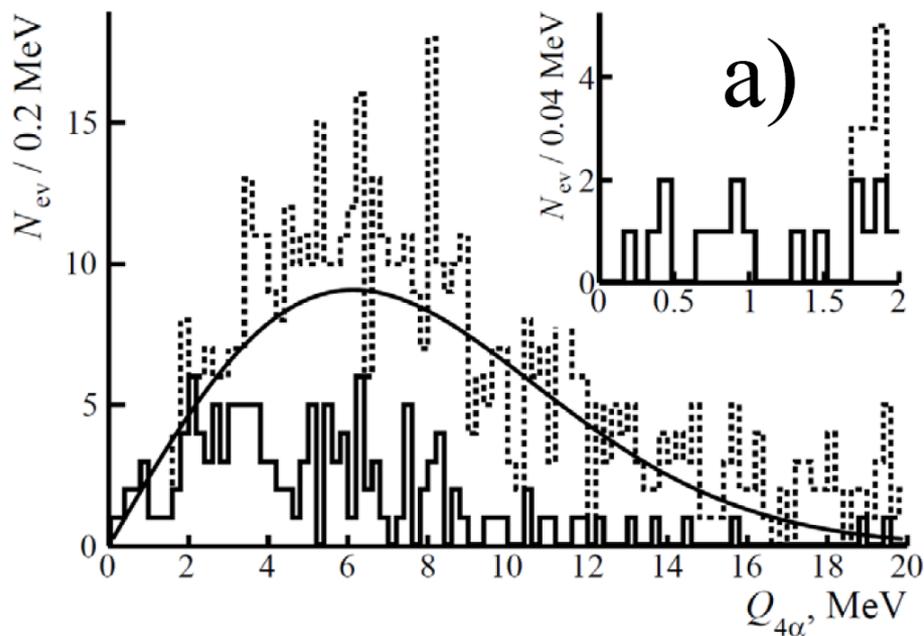
Обособленность HS от более высоких возбуждений ${}^{12}\text{C}$, указывают на него как 3α -аналог ${}^8\text{Be}$. Синтез ${}^{12}\text{C}$ возможен через слияние $3\alpha \rightarrow \alpha{}^8\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C}(0_2^+) \rightarrow {}^{12}\text{C}(+2\gamma \text{ или } e^+e^-)$ с вероятностью порядка 10^{-4} . Дальнейший синтез $\alpha{}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{16}\text{O}\gamma$ через подходящий по энергии уровень ${}^{16}\text{O}$, запрещен по четности. Однако, синтез возможен в последовательности ${}^{12}\text{C}{}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{C}{}^{12}\text{C}(0_2^+) \rightarrow {}^{16}\text{O}{}^8\text{Be}$. эти обстоятельства определяют отношение распространенностей ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{16}\text{O}$ во Вселенной. Все эти факты позволяют предположить важность более тяжелых нестабильных состояний в процессах ядерной астрофизики.



$^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ доля распадов HS $11 \pm 3\%$

$^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ доля распадов HS $22 \pm 2\%$

Рост α -комбинаций усиливает вклад ^8Be и HS.



Существует возможность возникновения HS через α -распад $^{16}\text{O}(0^+_{\delta})$. Распределение “белых” звезд $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ по инвариантной массе 4α -квартетов $Q_{4\alpha}$ в основной части описывается распределением Рэля с параметром $\sigma_{Q_{4\alpha}} = (6.1 \pm 0.2)$ МэВ. Условие $Q_{3\alpha}(\text{HS}) < 700$ кэВ смещает распределение по $Q_{4\alpha}$ в низкоэнергетическую сторону. Увеличенный вид распределения по $Q_{4\alpha}$ указывает на 9 событий, удовлетворяющих $Q_{4\alpha} < 1$ МэВ и имеющих среднее значение $\langle Q_{4\alpha} \rangle$ (RMS) = 624 ± 84 (252) кэВ. Тогда оценка вклада распадов $^{16}\text{O}(0^+_{\delta}) \rightarrow \alpha + \text{HS}$ составляет $1.4 \pm 0.5\%$ при нормировке на $N_{\text{ws}}(^{16}\text{O})$ и $7 \pm 2\%$ при нормировке на $N_{\text{HS}}(^{16}\text{O})$.

Идентифицированы 33 события $^{16}\text{O} \rightarrow ^{28}\text{Be}$, что составляет $5 \pm 1\%$ “белых” звезд $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$. Тогда статистика $^{16}\text{O} \rightarrow ^{28}\text{Be}$ и $^{16}\text{O} \rightarrow \alpha\text{HS}$ имеет отношение 0.22 ± 0.02 . Распределение по инвариантной массе $Q_{4\alpha}$ событий $^{16}\text{O} \rightarrow ^{28}\text{Be}$, представленное на рис. b, указывает на два кандидата $^{16}\text{O}(0^+_{\delta}) \rightarrow ^{28}\text{Be}$ в области $Q_{4\alpha} < 1.0$ МэВ. Оценка отношения вероятности каналов $^{16}\text{O}(0^+_{\delta}) \rightarrow ^{28}\text{Be}$ и $^{16}\text{O}(0^+_{\delta}) \rightarrow \alpha\text{HS}$ составляет 0.22 ± 0.17 .

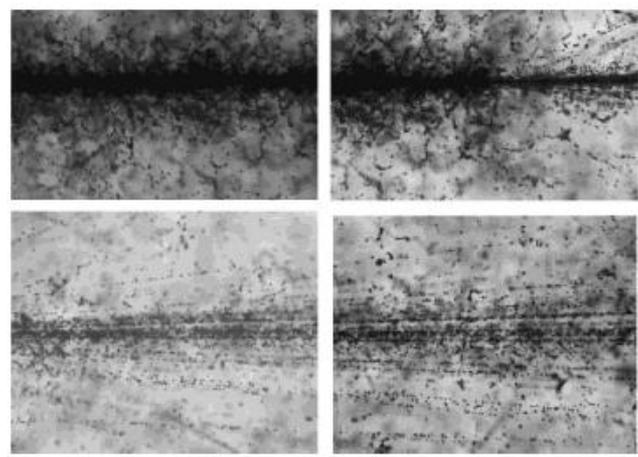
 Light clusters in nuclei and nuclear matter: Nuclear structure and decay, heavy ion collisions, and astrophysics

2-6 September 2019
ECT* - Villa Tambosi

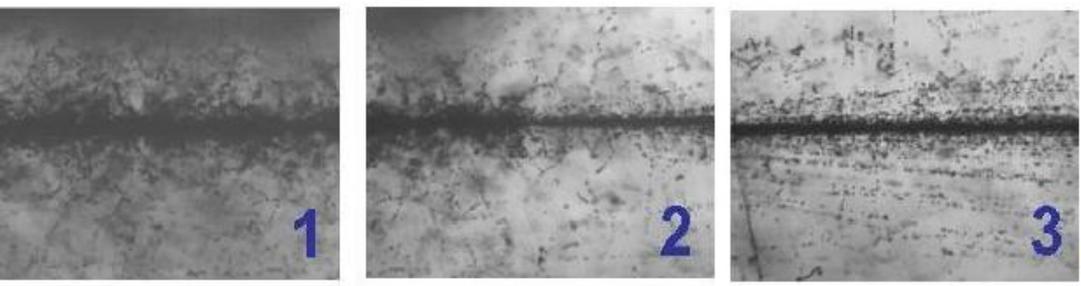




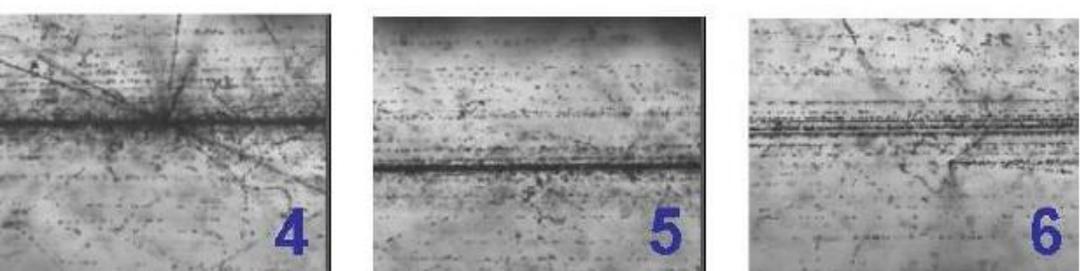
1A GeV U

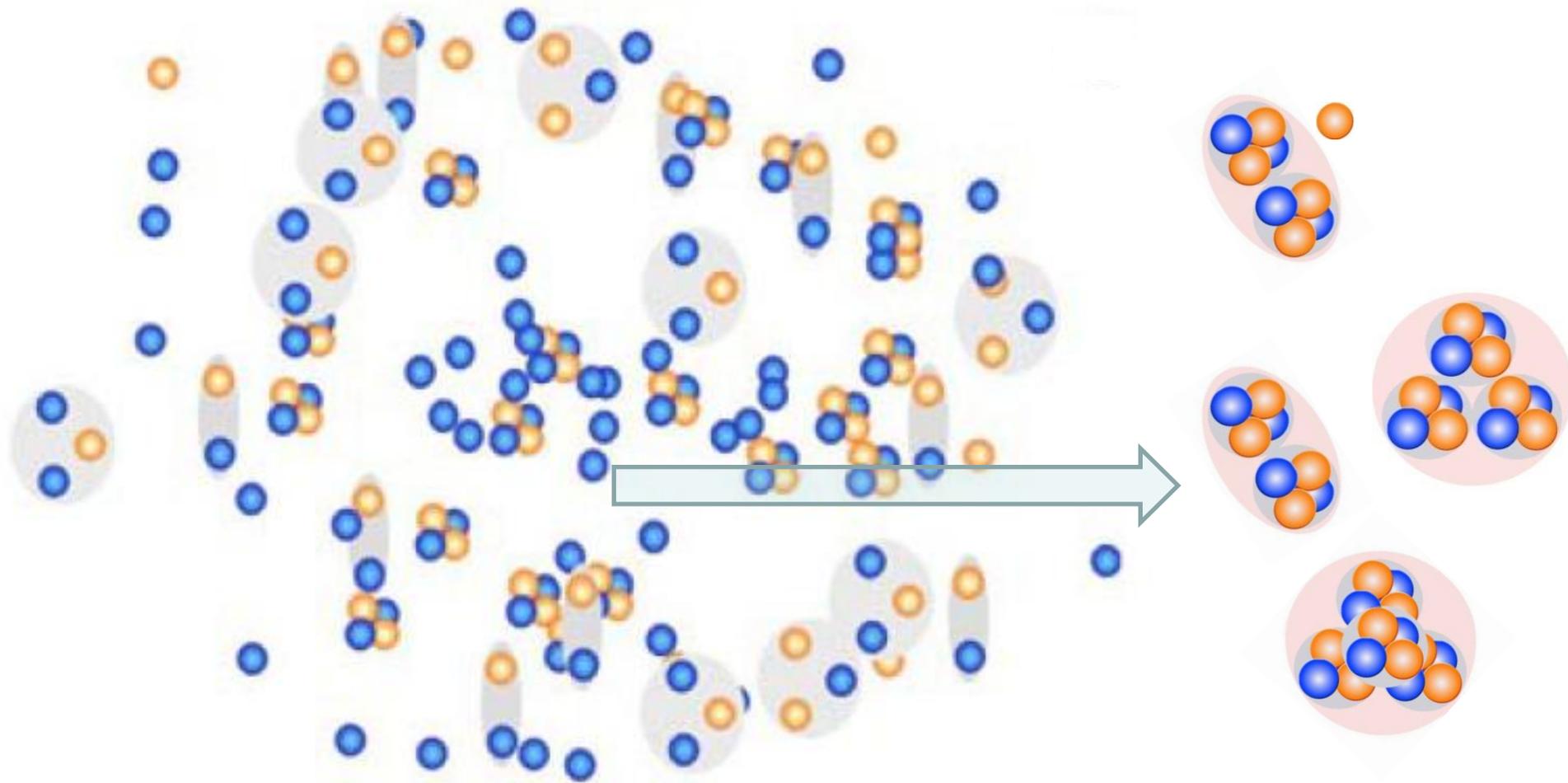


10A GeV Au

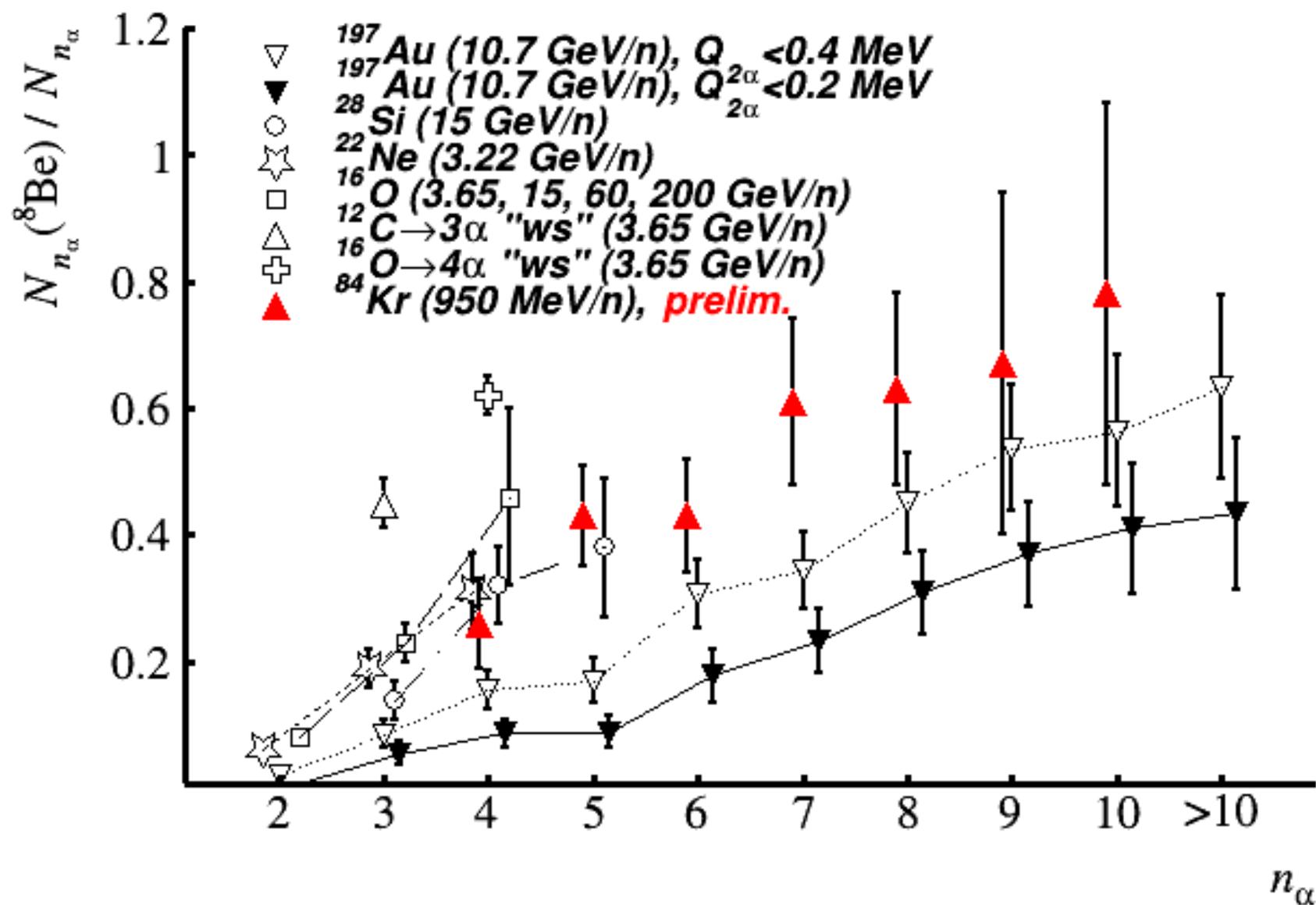


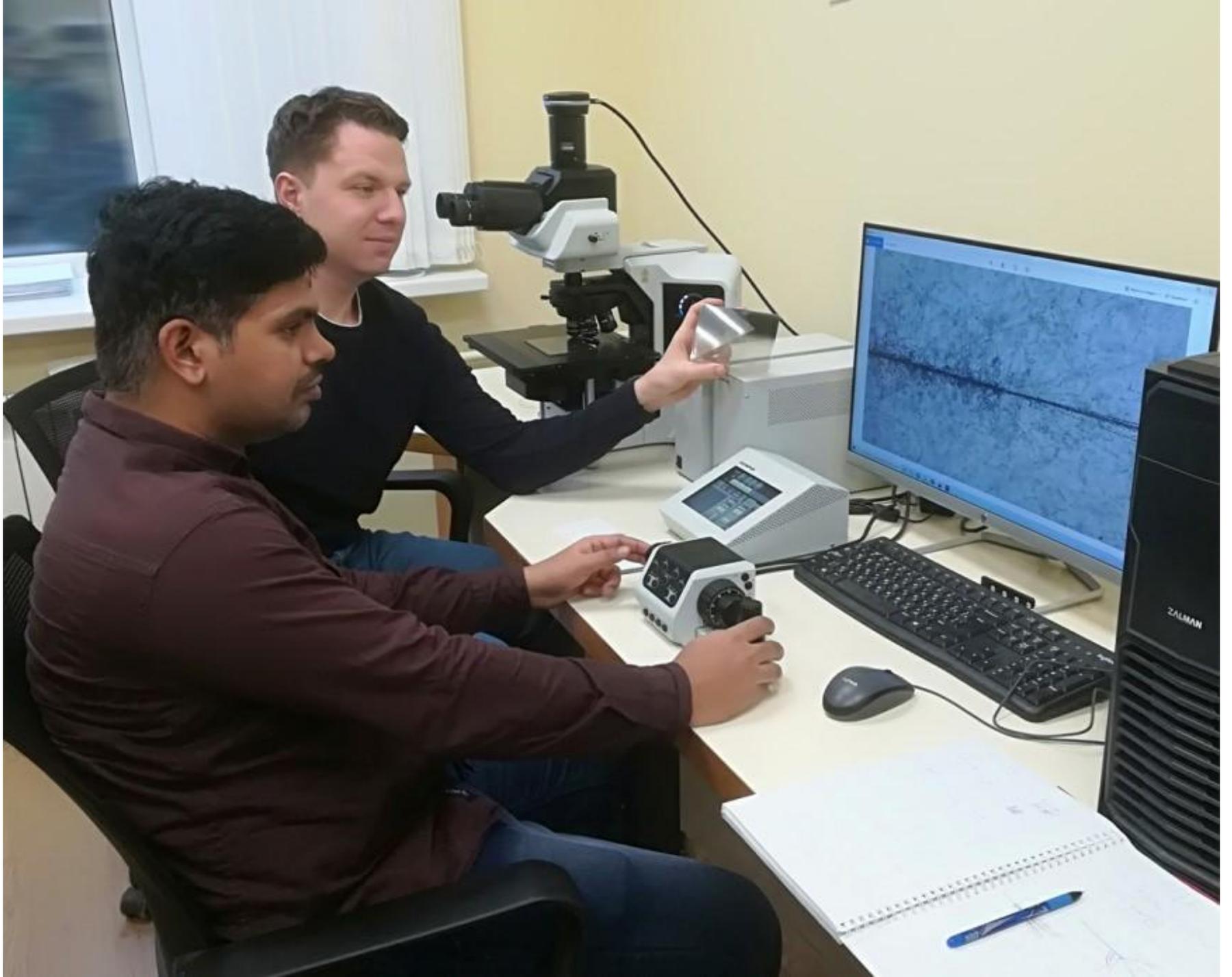
160A GeV Pb





Этот подход стал применяться для идентификации ${}^8\text{Be}$ и HS и поиска более сложных состояний $n\alpha\text{BEC}$ во фрагментации средних и тяжелых ядер. На статистике десятков распадов ${}^8\text{Be}$ обнаружено возрастание вероятности обнаружения ${}^8\text{Be}$ в событии с ростом числа релятивистских α -частиц. Сделан предварительный вывод о том, что вклады распадов ${}^9\text{B}$ и HS также растут. Экзотические размеры и времена жизни ${}^8\text{Be}$ и HS позволяют предположить возможность синтеза $n\alpha\text{BEC}$ последовательным соединением α -частиц.

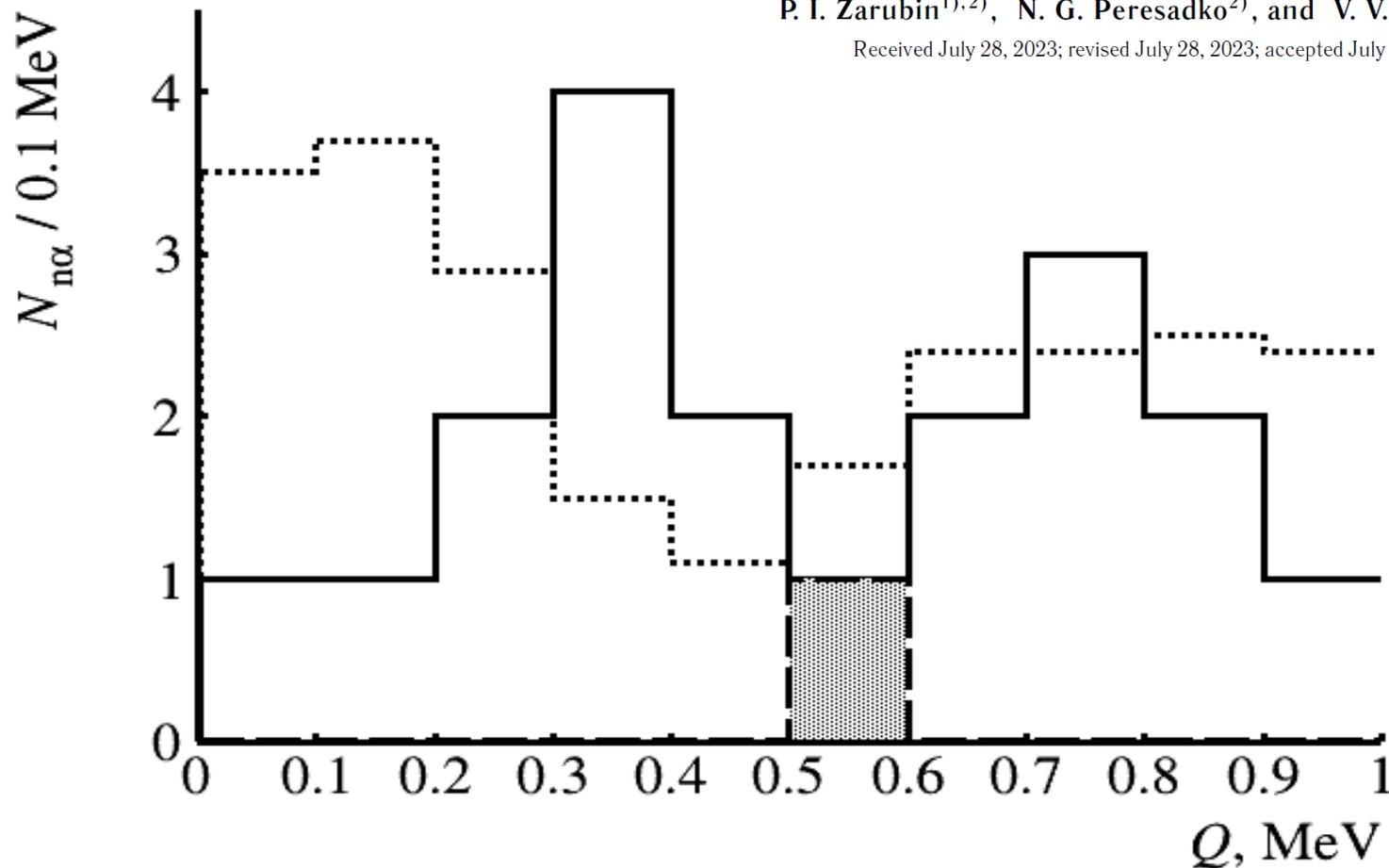




Cosmophysical Aspects of Relativistic Nuclear Fragmentation

A. A. Zaitsev^{1),2)*}, N. Marimuthu¹⁾, D. A. Artemenkov¹⁾,
P. I. Zarubin^{1),2)}, N. G. Peresadko²⁾, and V. V. Rusakova¹⁾

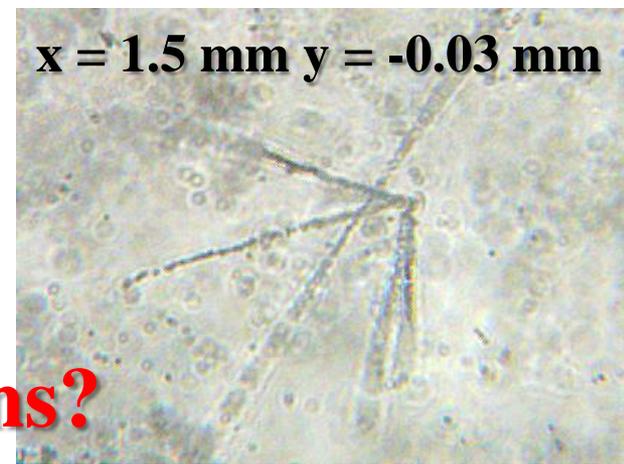
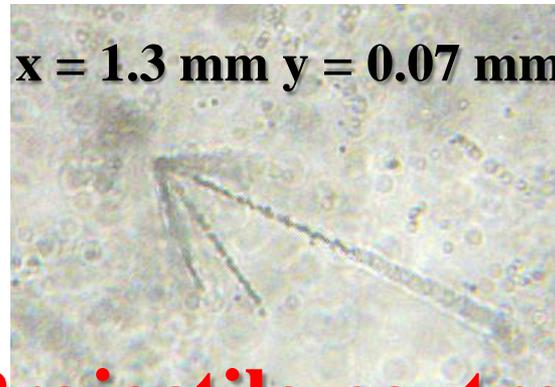
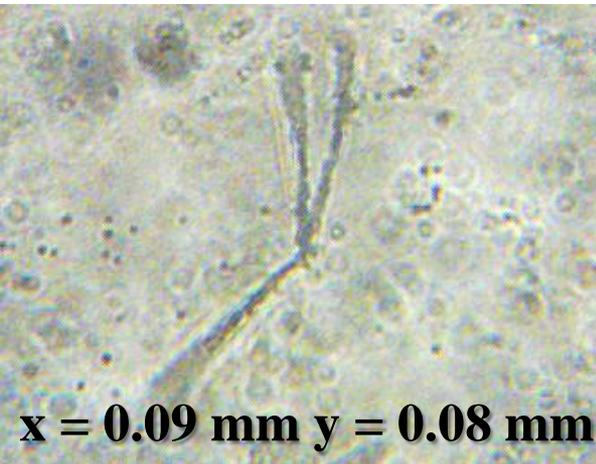
Received July 28, 2023; revised July 28, 2023; accepted July 28, 2023



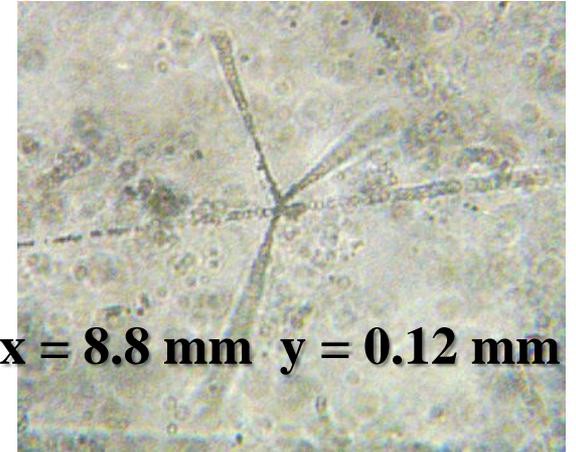
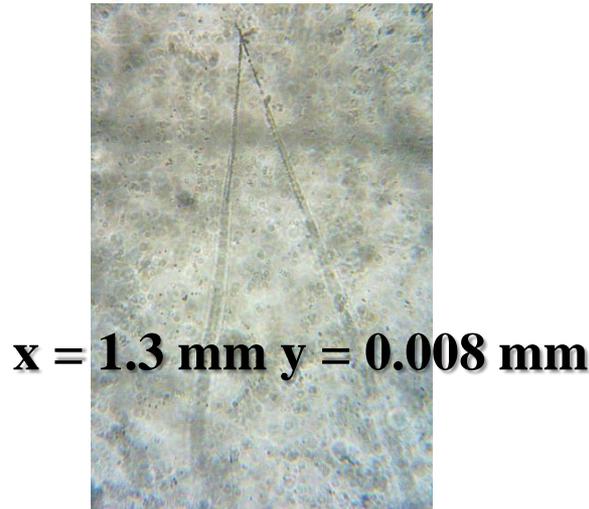
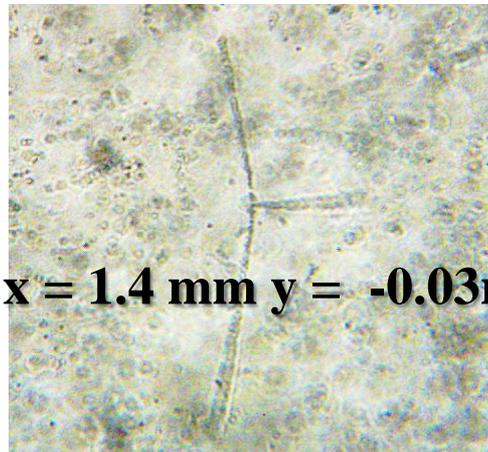
Распределение в области малых значений инвариантной массы Q пар (точки), троек (сплошная линия) и четверок (заштриховано) α -частиц, образовавшихся во фрагментации ядер Кр. Распределение для пар умножено на 0.1

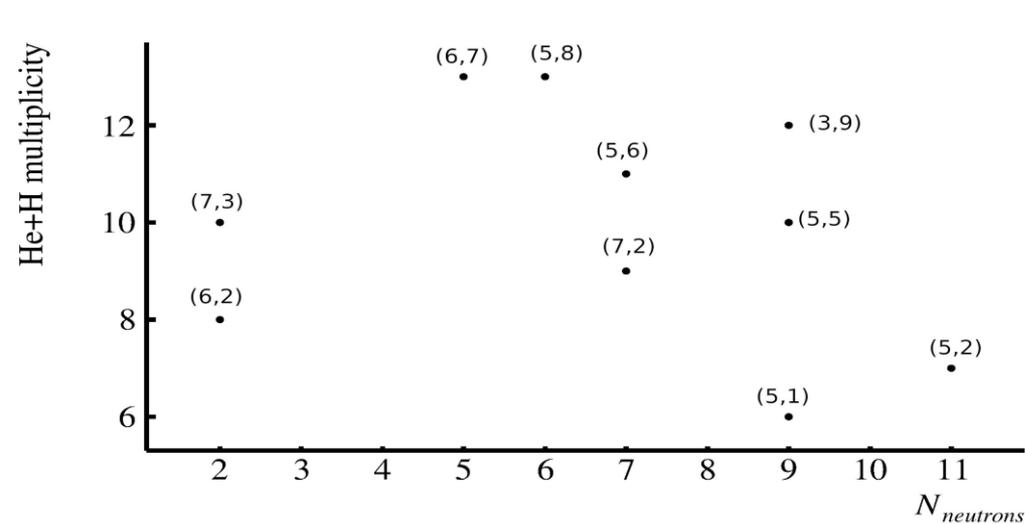
Kr 800 A MeV #7012 (17.6 mm) x60

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

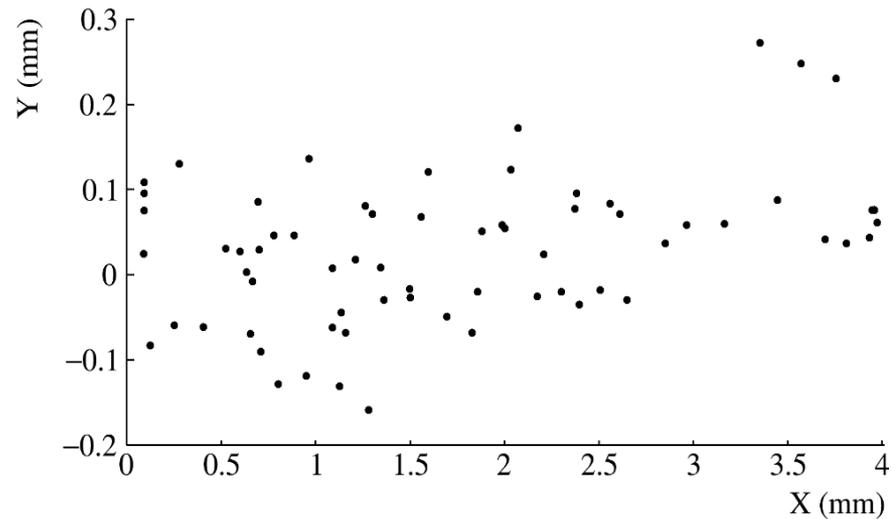


Projectile neutrons?

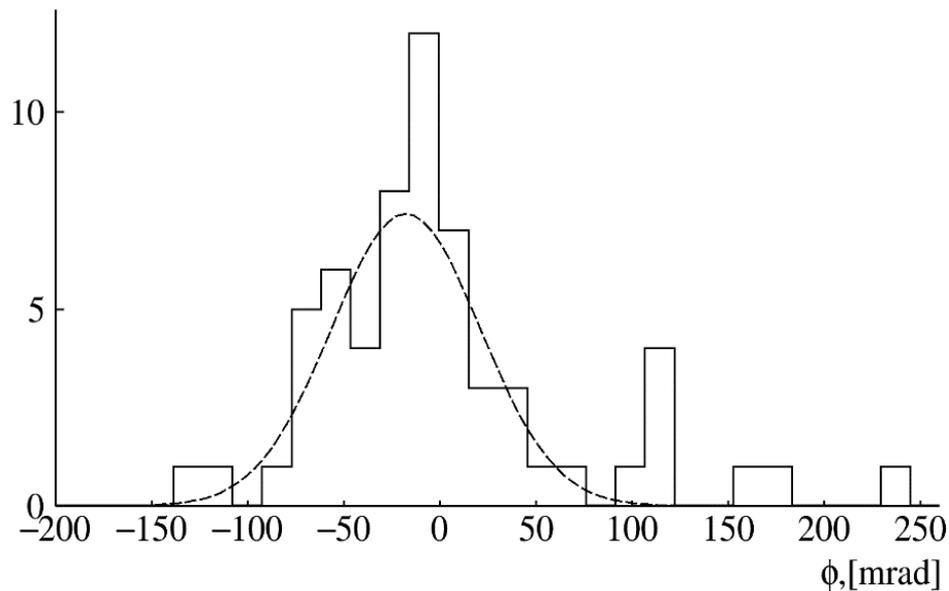




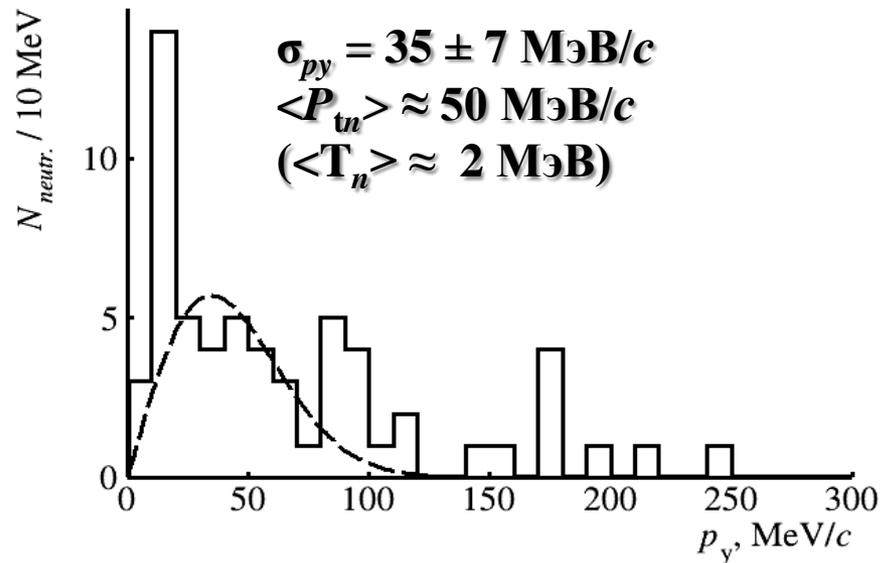
Число SNS и множественность (He, H).



Координаты SNS в фокальной плоскости относительно первичных вершин

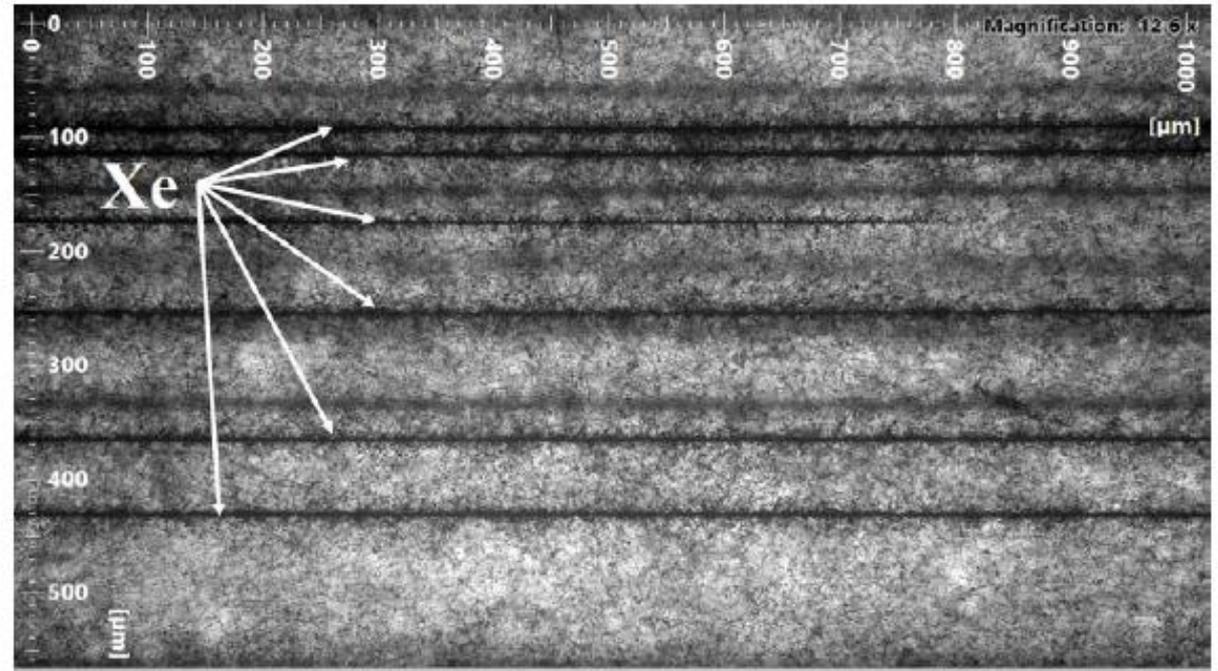
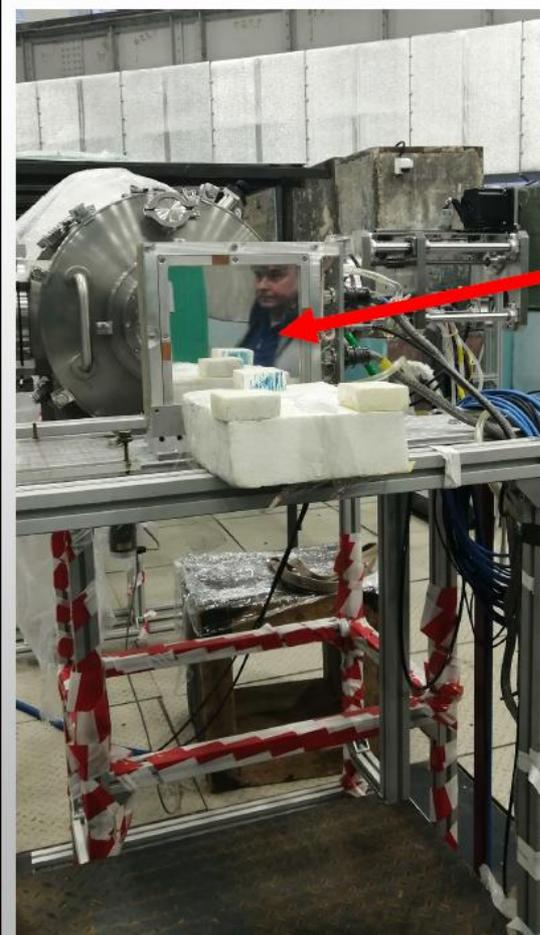


Распределение SNS по плоскому углу ϕ относительно первичных следов

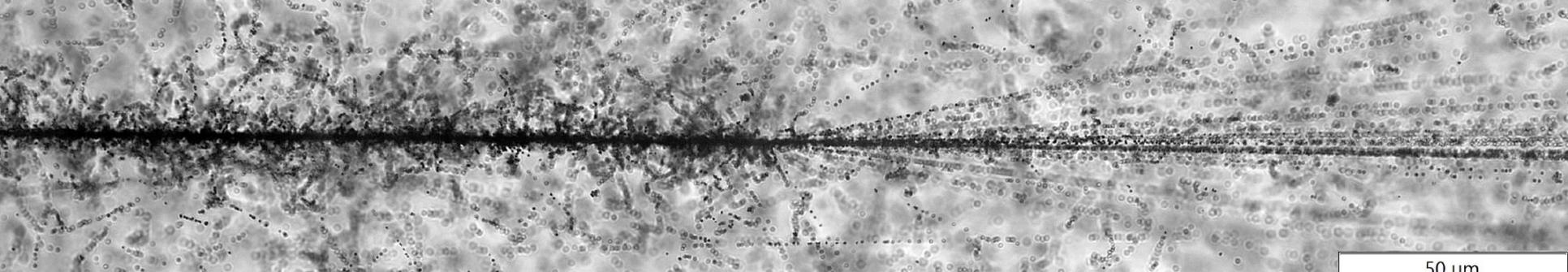


Распределение нейтронов по планарной компоненте поперечного импульса

Облучение ядерной эмульсии ядрами ксенона F3 (2022 г.)

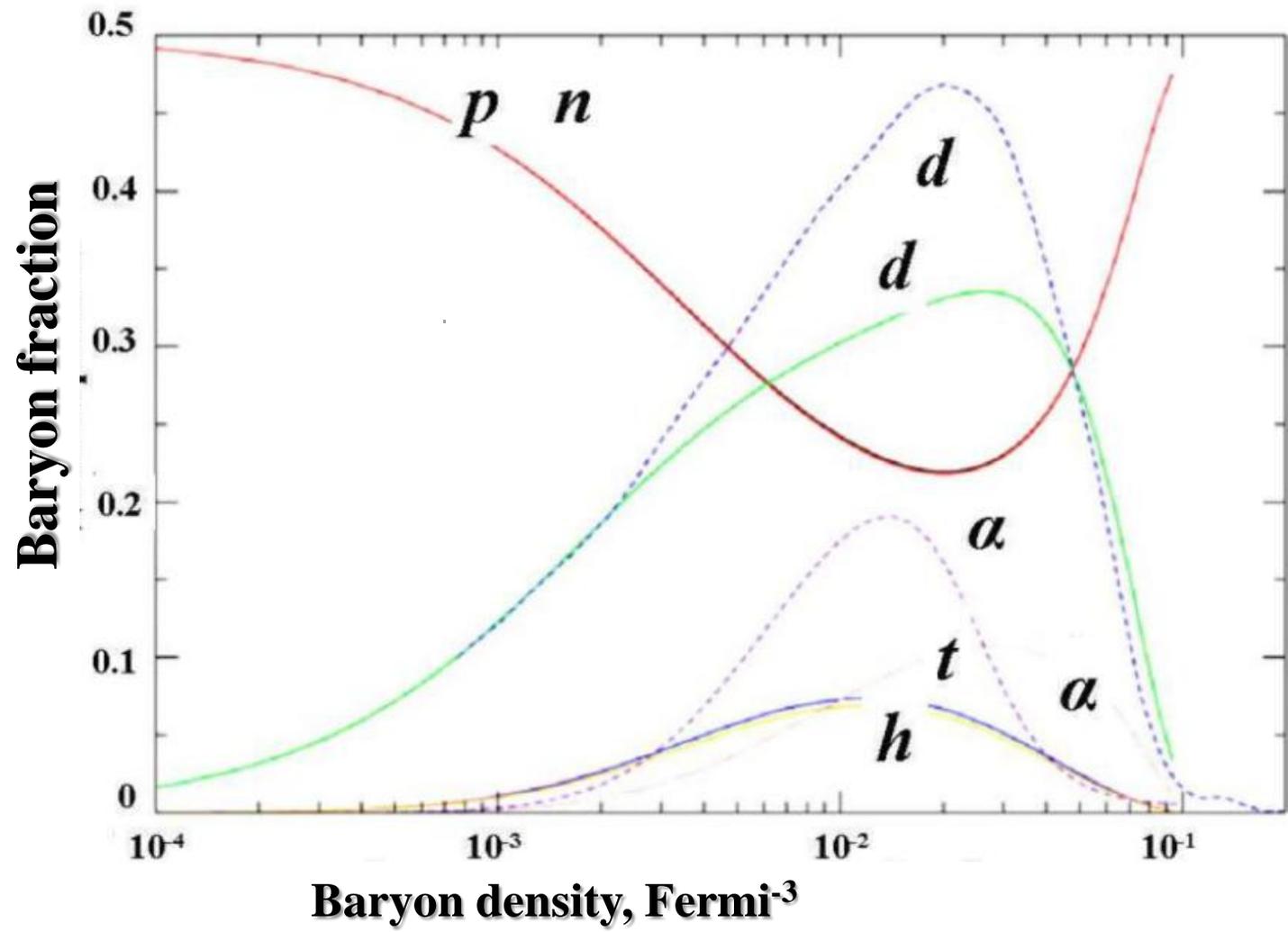


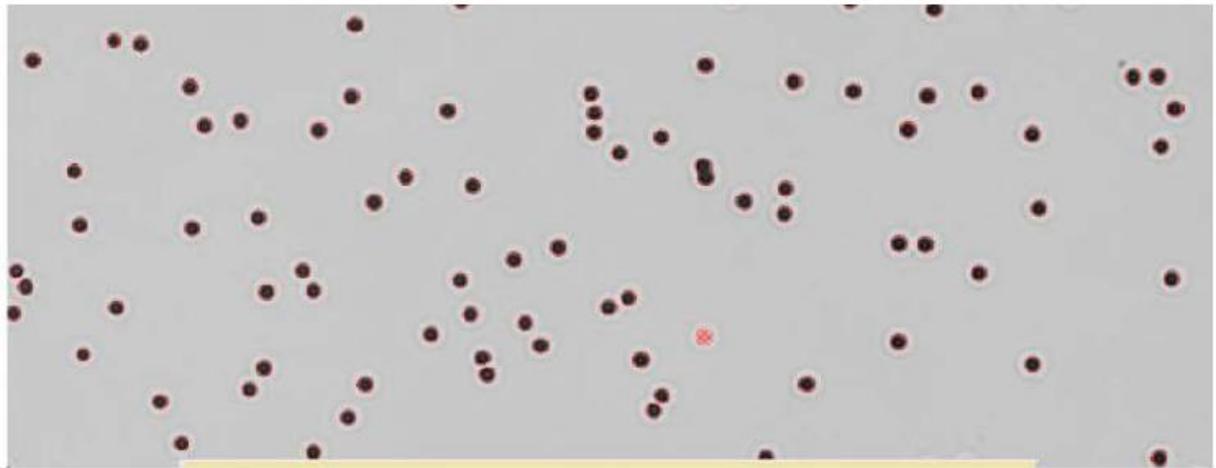
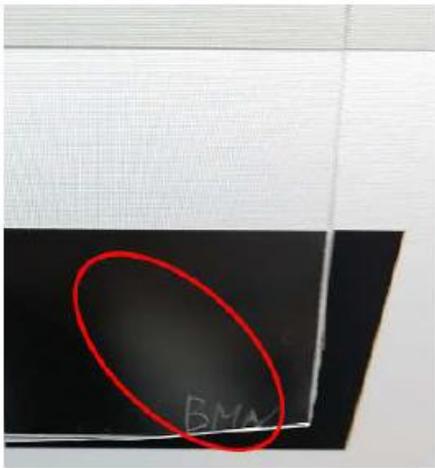
Xe exposed emulsion at 12x, single cycle



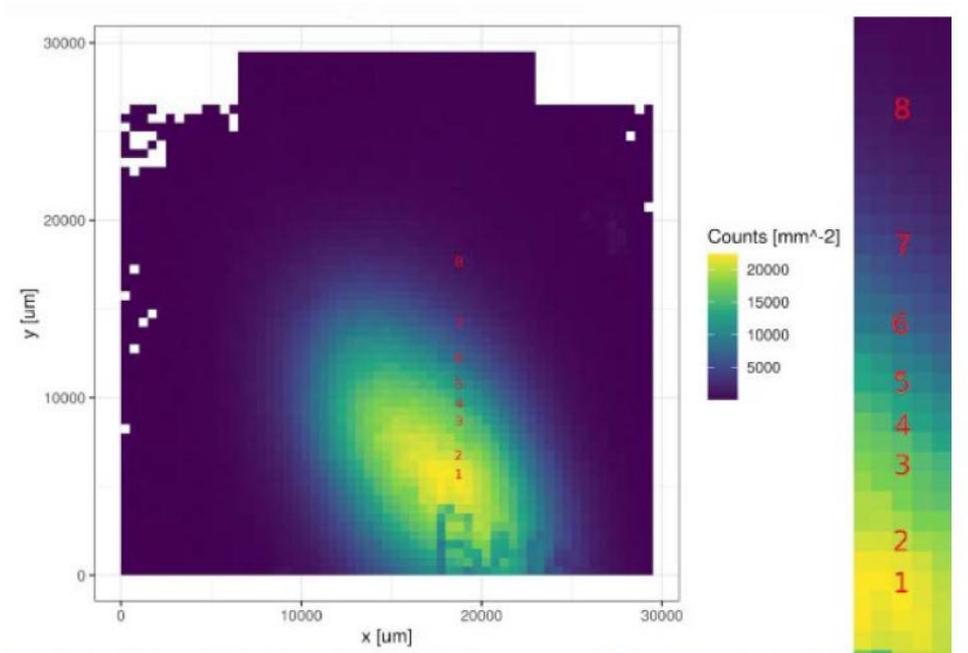
50 μm

Nuclotron
December
2022
 ^{124}Xe
 $3.8 A \text{ GeV}$

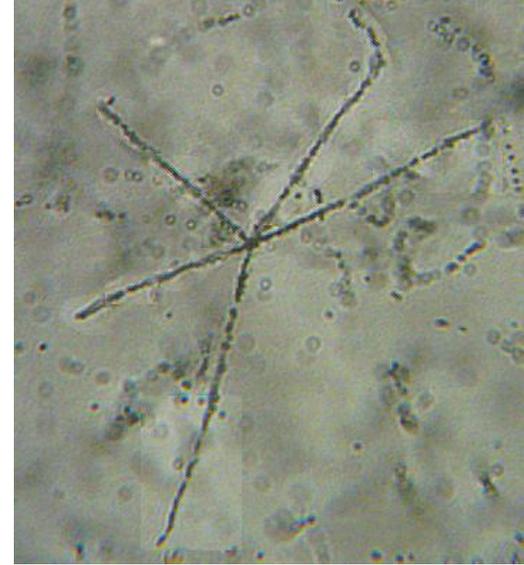
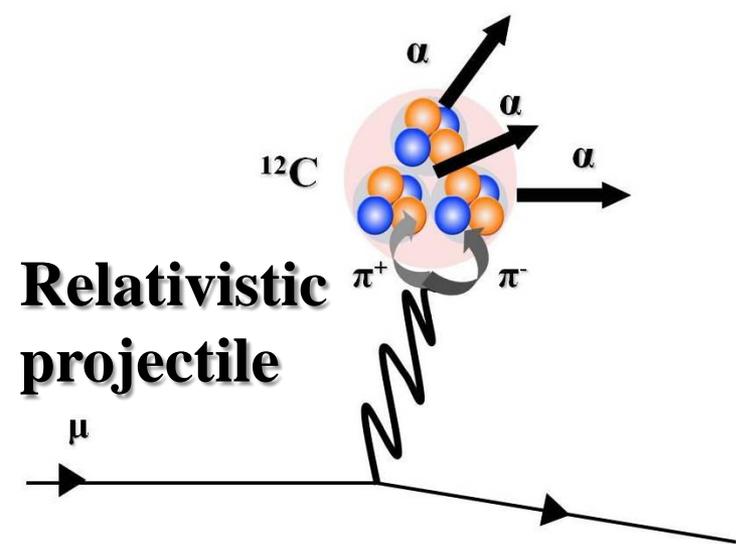




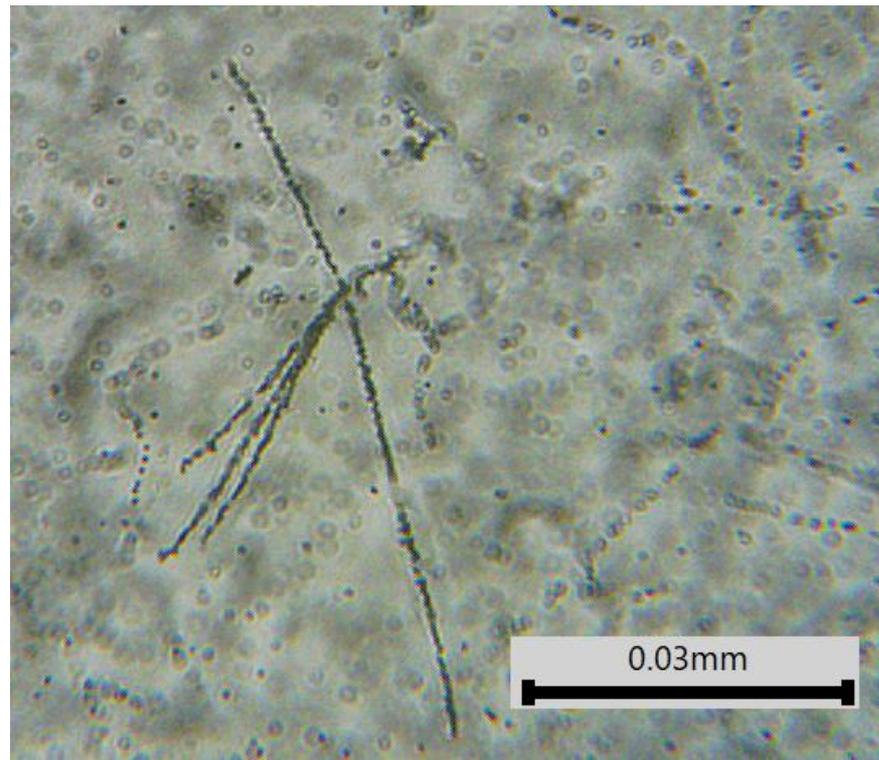
CR-39 detector exposed to 5 accelerator cycles of relativistic Xe nuclei behind the BM@N experiment (left) at 40x; program detected craters by are highlighted in red



Student Stanislav Murashko of Belarusian State University in practice <https://start.jinr.ru/> analyzes irradiation of CR-39 detector on Olympus BX63 microscope (1 - high-speed video camera, 2 - lens revolver, motorized table, 3. 4, 5 - controls) **Xe beam profile reconstructed in CR-39 detector behind BM@N experiment**



Stopped alphas in target fragmentation



**ТЕХНОЛОГИЯ
ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

УДК 539.1.073.7

НЕДАВНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ

© 2016 г. П. И. Зарубин

*Лаборатория физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия*

Физический институт им. П.П. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

E-mail: zarubin@lhe.jinr.ru

Поступила в редакцию 11.05.2016 г.

Дан обзор недавних результатов, полученных с помощью метода ядерной эмульсии (ЯЭ) в низкоэнергетических применениях. Облучение ЯЭ ядрами ^8He с энергией 60 МэВ позволило идентифицировать их распады при остановке, оценить возможности пробежной α -спектрометрии и наблюдать дрейф термализованных атомов ^8He . Корреляции α -частиц, изучавшихся в расщеплениях $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$, вызванных нейтронами с энергией 14.1 МэВ, указывают на наличие суперпозиции состояний 0^+ и 2^+ ядра ^8Be в основном состоянии ^{12}C . В обогащенной бором ЯЭ исследованы угловые корреляции фрагментов, обсуждаются перспективы ЯЭ в исследованиях радиоактивности и ядерного деления. Предложено использовать автоматизированный микроскоп для поиска коллинеарного тройного деления тяжелых ядер, имплантированных в ЯЭ. Начаты поверхностные облучения образцов ЯЭ источником ^{252}Cf . Изучаются планарные события, содержащие пары фрагментов и длиннопробежные α -частицы, и только тройки фрагментов. Образцы ЯЭ калибровались на ионах Кг и Хе с энергией 1.2 и 3 А МэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проект БЕККЕРЕЛЬ2023 на ускорительном комплексе НУКЛОТРОН/НИСА для продолжит исследования периферических взаимодействий релятивистских ядер, в которых только метод ядерной эмульсии обеспечивает требуемое разрешение, полноту и единообразие наблюдений.

Проект сфокусирован на поиске α -частичного конденсата Бозе-Эйнштейна (α ВЕС). Для легких ядер, в том числе радиоактивных, апробирована идентификация по инвариантной массе распадов ${}^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$, ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ и ${}^{12}\text{C}(0^+_{2}) \rightarrow {}^8\text{Be}\alpha$ (состояние Хойла). Тенденция к росту ${}^8\text{Be}$ с числом α -частиц, а также ${}^9\text{B}$ и ${}^{12}\text{C}(0^+_{2})$, недавно обнаруженная для средних и тяжелых ядер, указывает на возможность синтеза 4α ВЕС.

Проект БЕККЕРЕЛЬ2023 нацелен на анализ фрагментации ${}^{84}\text{Kr}$ при 950 МэВ на нуклон для прояснения связи ${}^8\text{Be}$ и состояния Хойла и множественностью α -ансамблей и поиске на этой основе распадов состояния ${}^{16}\text{O}(0^+_{6}) \rightarrow {}^{12}\text{C}(0^+_{2})\alpha$ и $2{}^8\text{Be}$ как кандидата в 4α ВЕС. Попутно оценивается множественность и поперечные импульсы сопровождающих нейтронов.

В продолжение исследований с легкими ядрами в диссоциации ${}^9\text{Be}$ и ${}^{10}\text{C}$ ведется поиск изобар-аналоговых состояний ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$. Во фрагментации ядер из состава эмульсии под действием релятивистских частиц осваивается методика идентификации по инвариантной массе ансамблей остановившихся α -частиц.

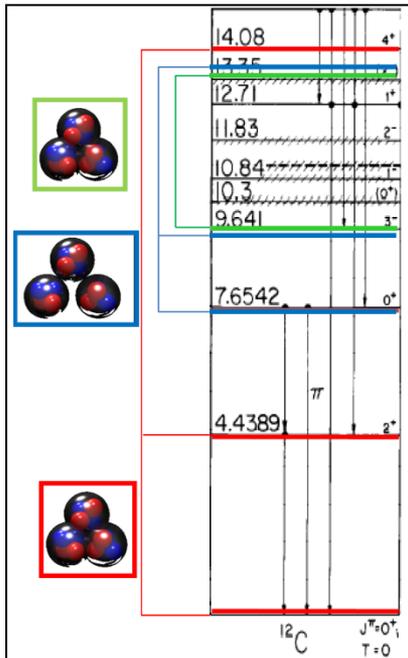
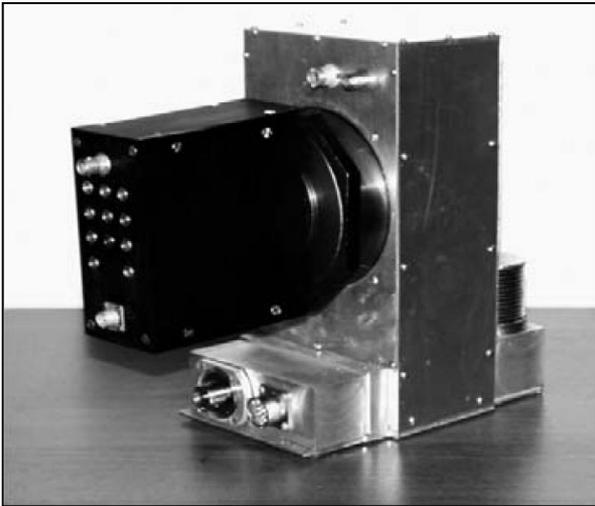
В декабре 2022 г. слои ядерной эмульсии облучены ядрами ${}^{124}\text{Xe}$ с энергией 3.8 ГэВ на нуклон. Тем самым, получен материал для анализа множественных состояний α -частиц и нуклонов при оптимальной энергии. Определение среднего разворота пучковых следов указывает на возможность идентификации релятивистских изотопов. Применение CR-39 позволило полностью реконструировать профиль и интенсивность использованного пучка.

В целом, сочетание классических ядерных методик и успешное освоение моторизованного микроскопа позволяет развить в ОИЯИ исследования с релятивистскими радиоактивными изотопами, привлекая к ним молодых исследователей.

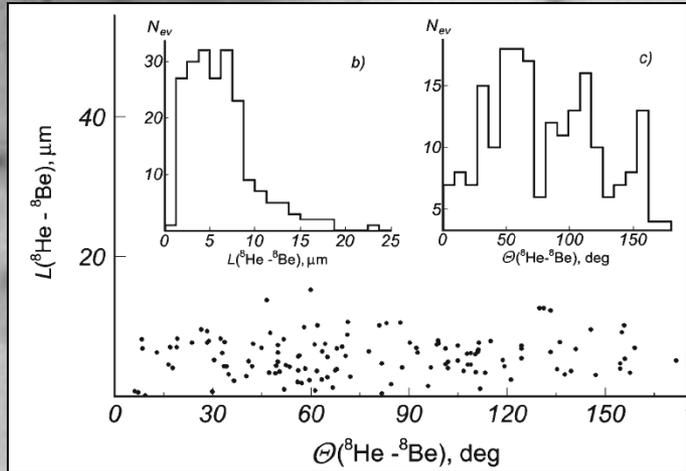
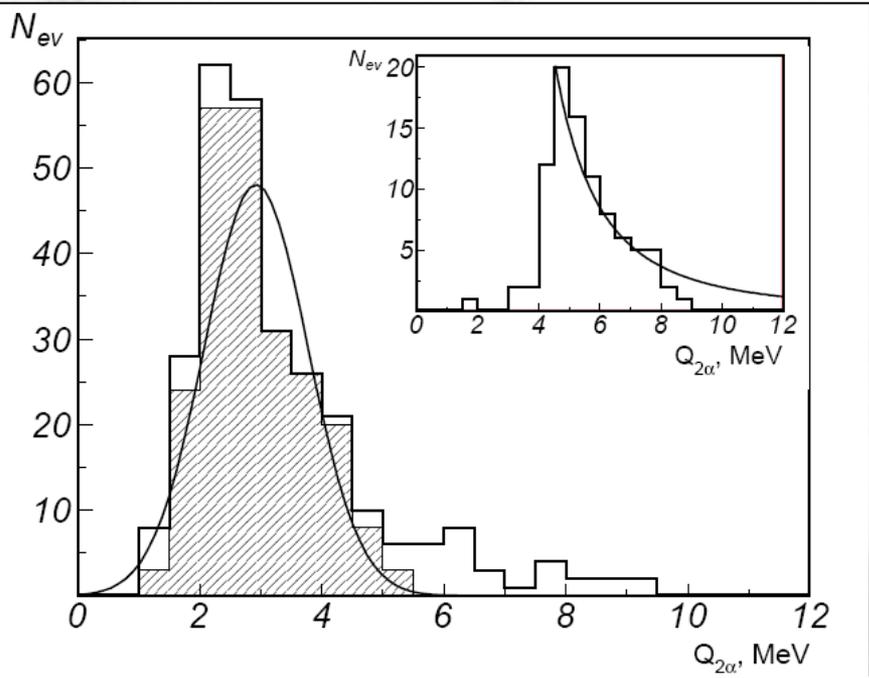
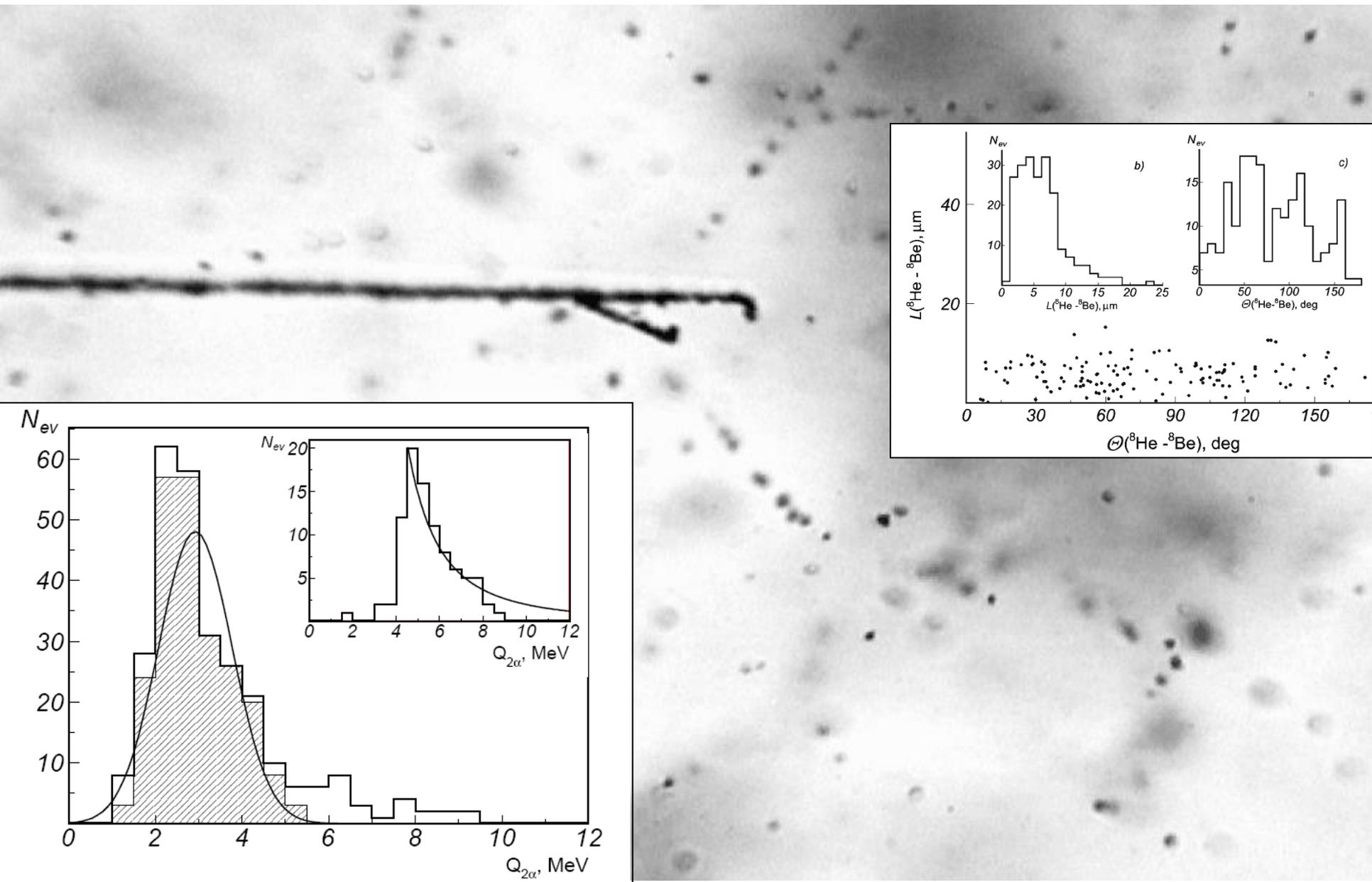
*Если сомневаешься,
куда идти дальше,
посмотри откуда
пришел.*

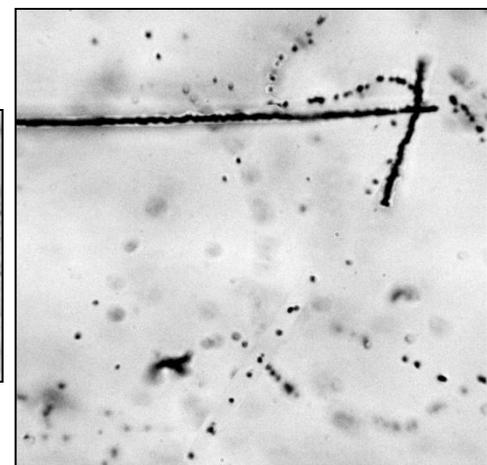
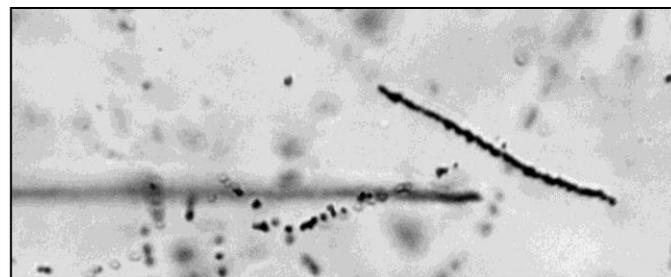
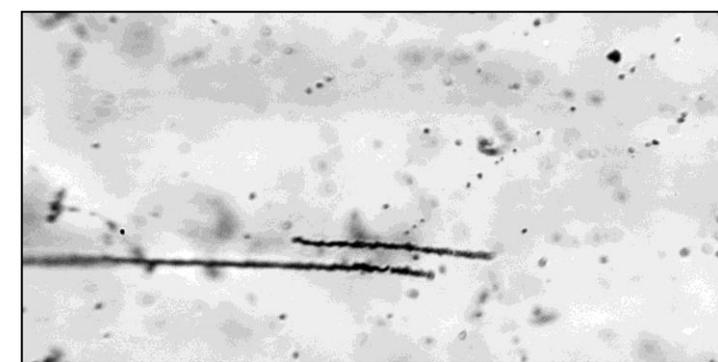
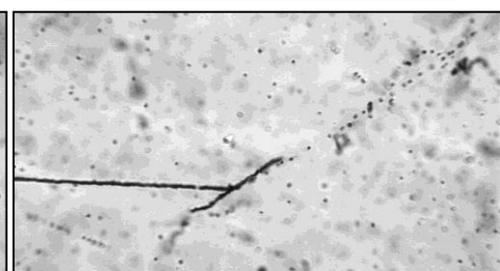
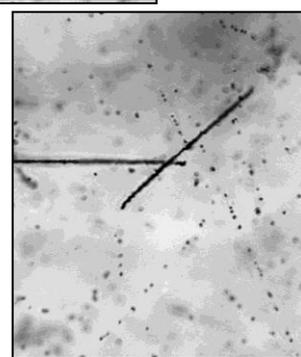
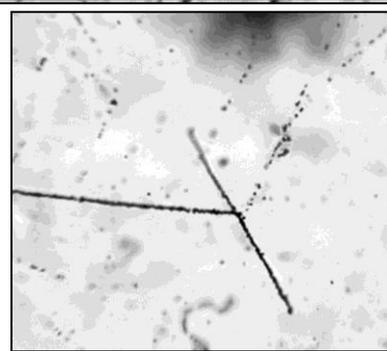
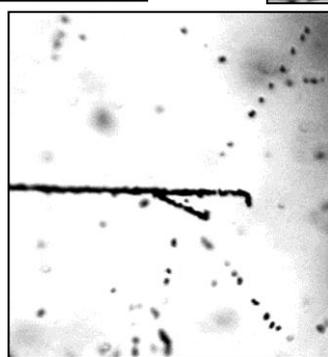
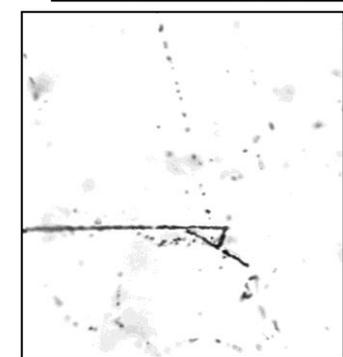
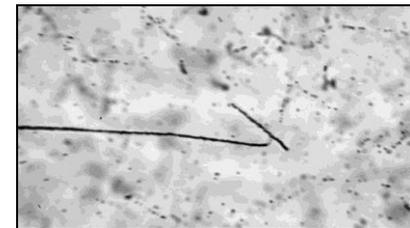
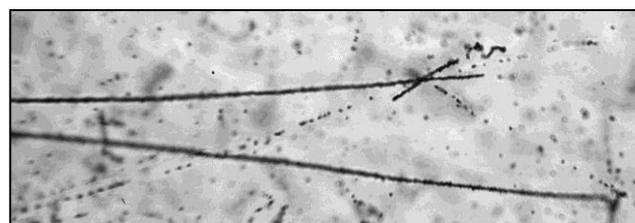
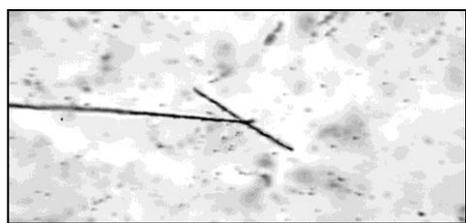
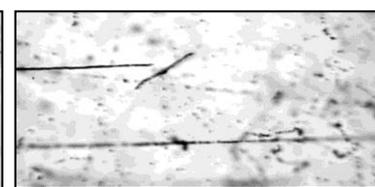
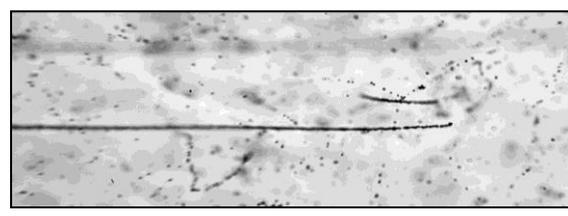
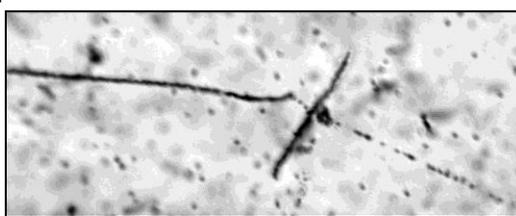
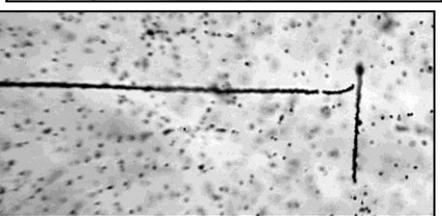
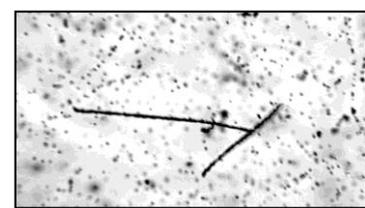
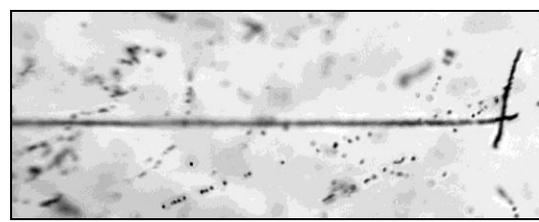
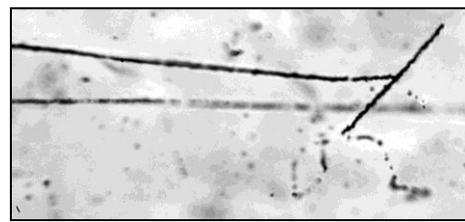
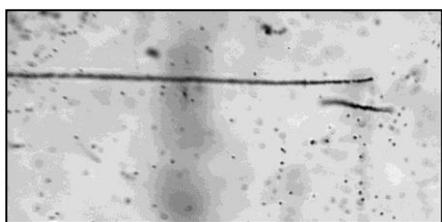
(индийская поговорка)

Изучение кластерной и спиновой структуры ядра ^{12}C методом ядерной эмульсии облученной нейтронами с энергией 14 МэВ

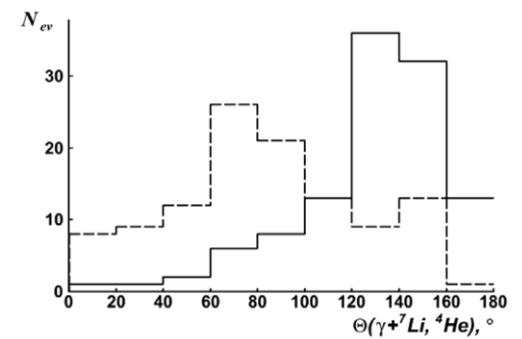
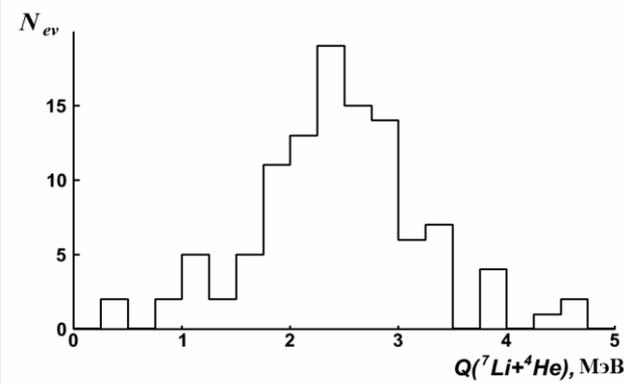
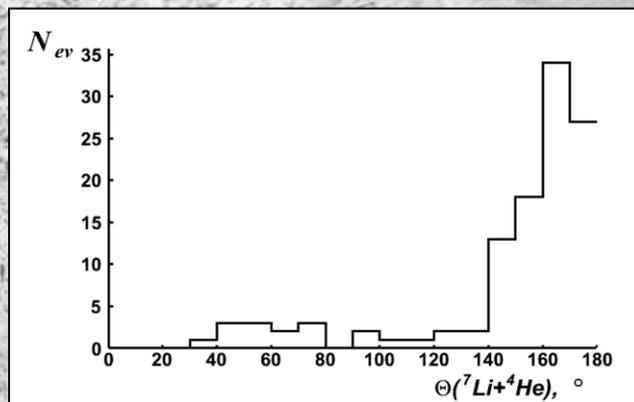


Exposure of Nuclear Track Emulsion to ^8He Nuclei at the ACCULINNA Separator





IBR 30m Thermal Neutrons x20



Xe x10 1.2 A MeV



3

5

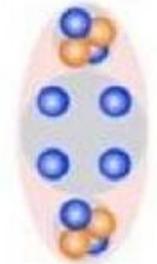
2

5

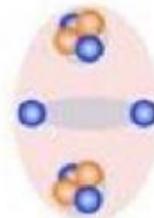
^{12}B 20 ms



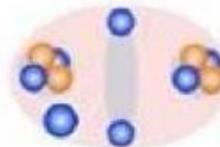
^{12}Be 23 ms



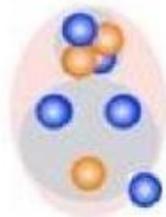
^{10}Be 1510000 y



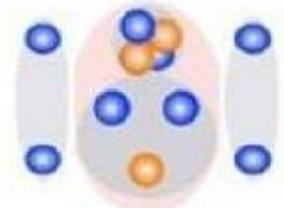
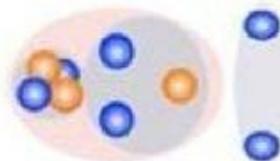
^{11}Be 13.8 s



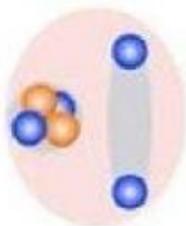
^8Li 838 ms



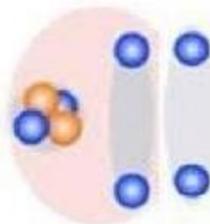
^9Li 178 ms



^{11}Li 8.5 ms



^6He 807 ms



^8He 119 ms