



BECQUEREL
PROJECT

Проект
БЕККЕРЕЛЬ

Beryllium (Boron)

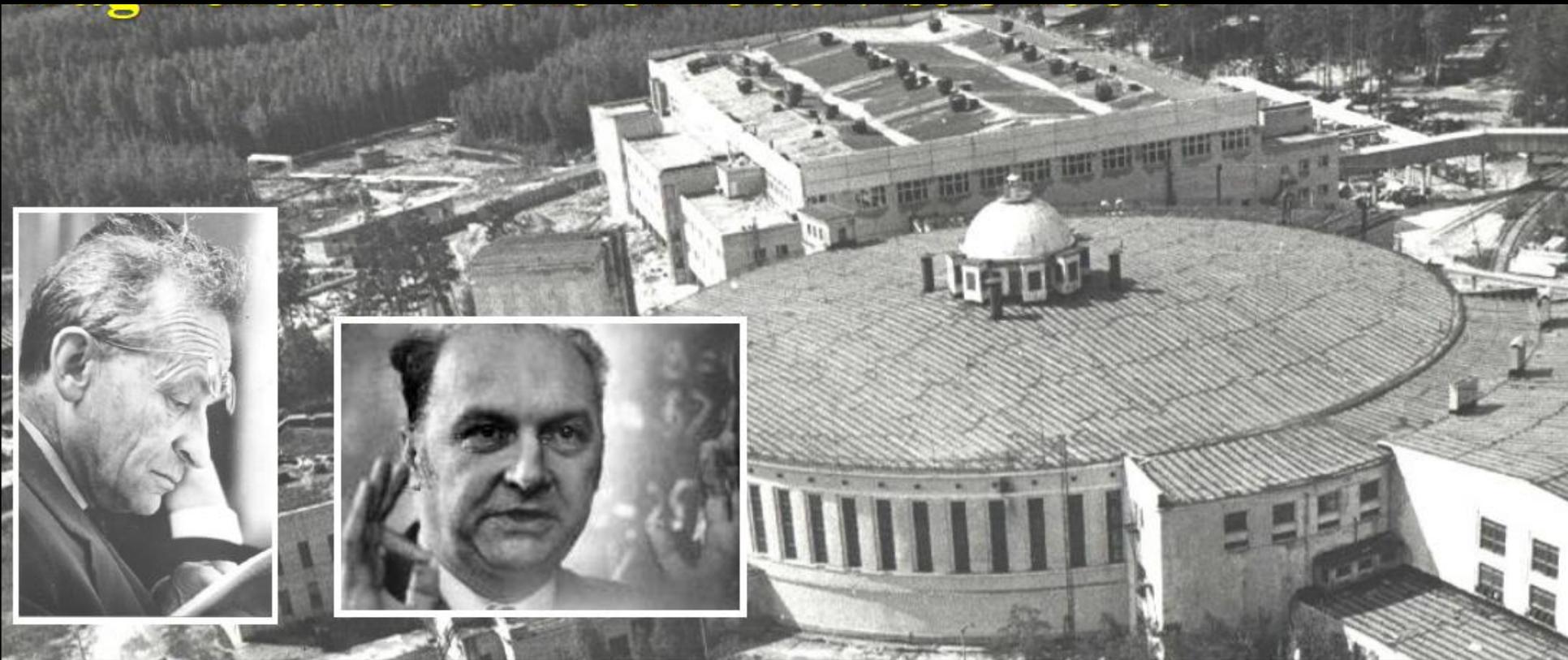
Clustering

Quest in

Relativistic Multifragmentation

<http://becquerel.jinr.ru>

Павел Зарубин «Нестабильные состояния в релятивистской ядерной фрагментации»



*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 - $0.2 \mu\text{m}$

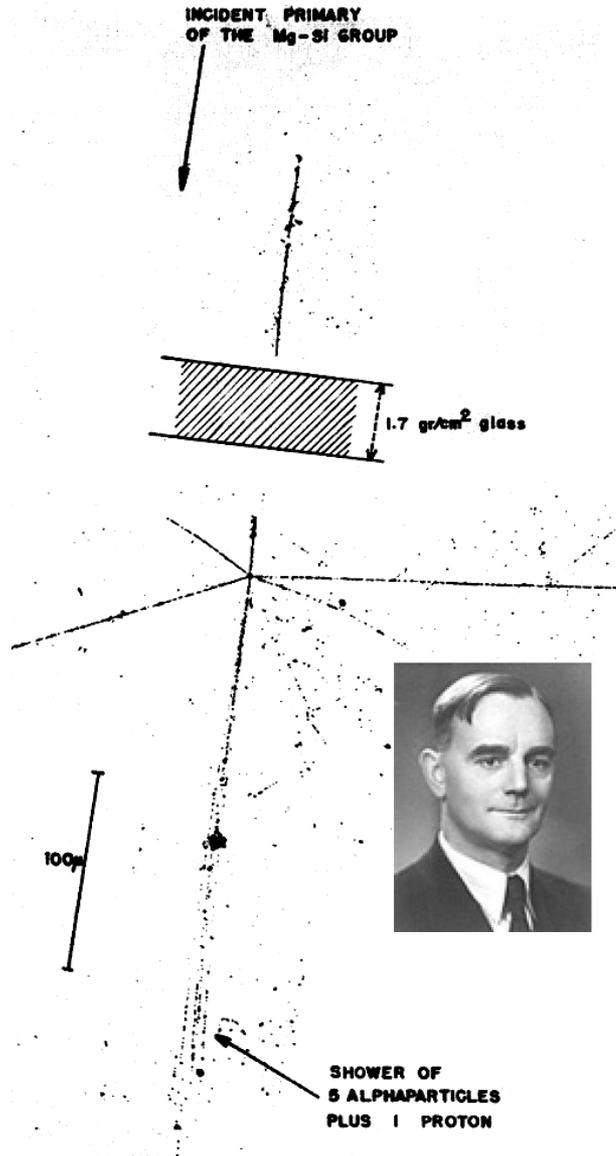
Atom - $10^{-4} \mu\text{m}$

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

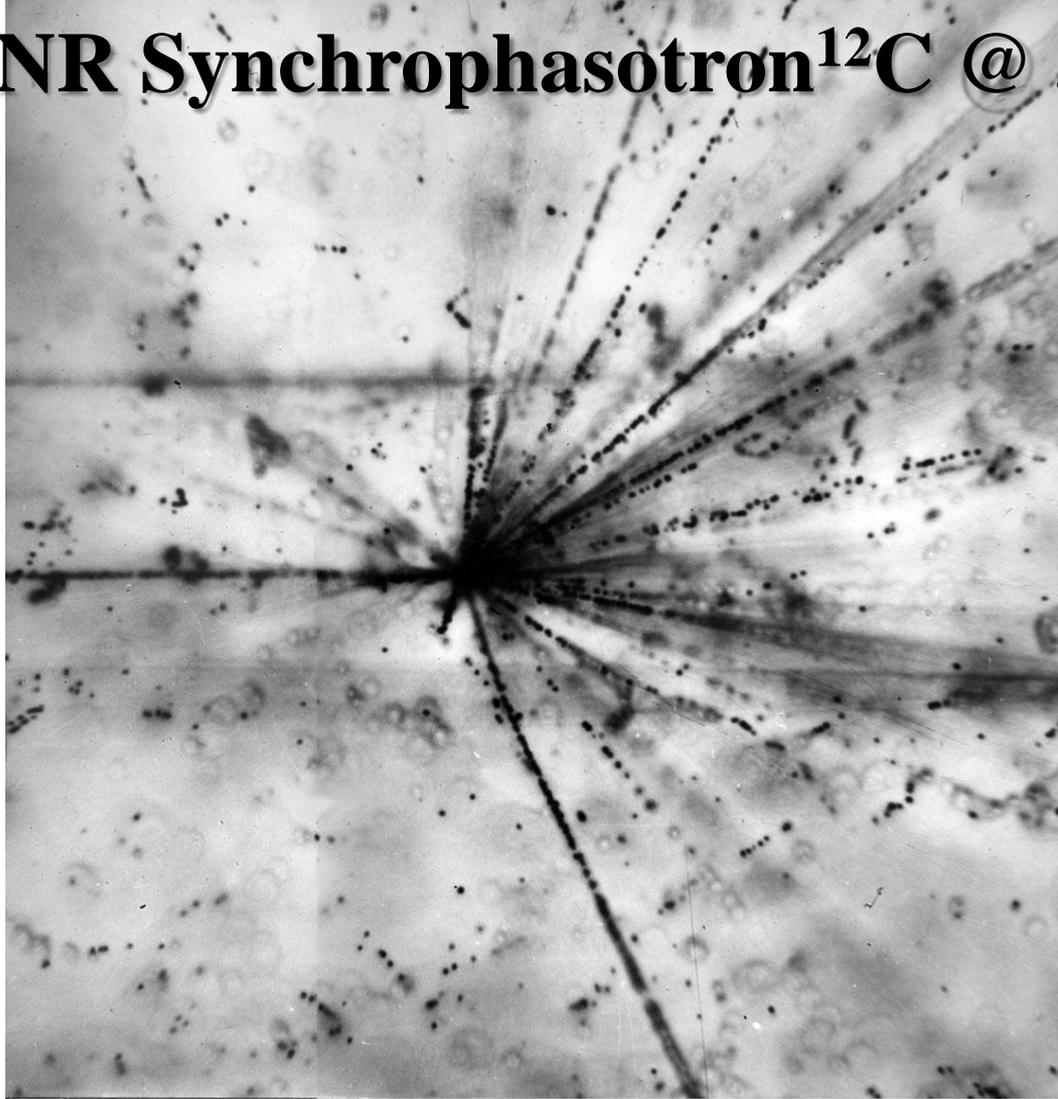
Объединенный институт
 ядерных исследований
 БИБЛИОТЕКА



PERGAMON PRESS
 LONDON · NEW YORK · PARIS · LOS ANGELES

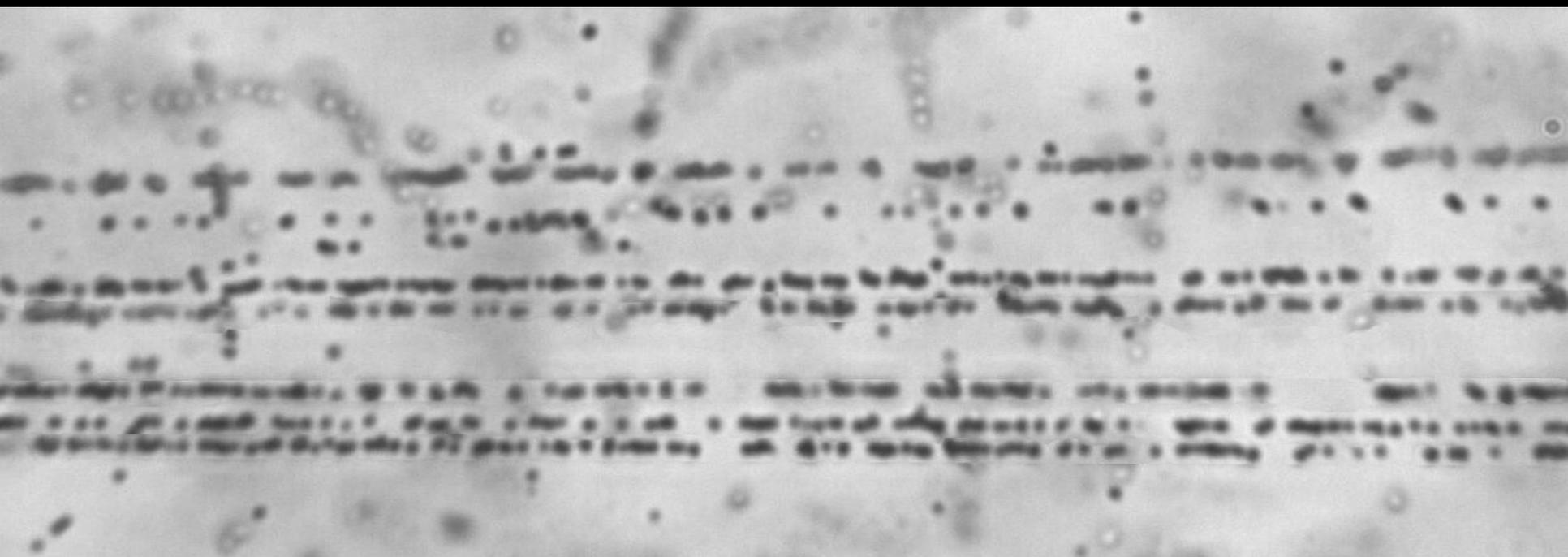
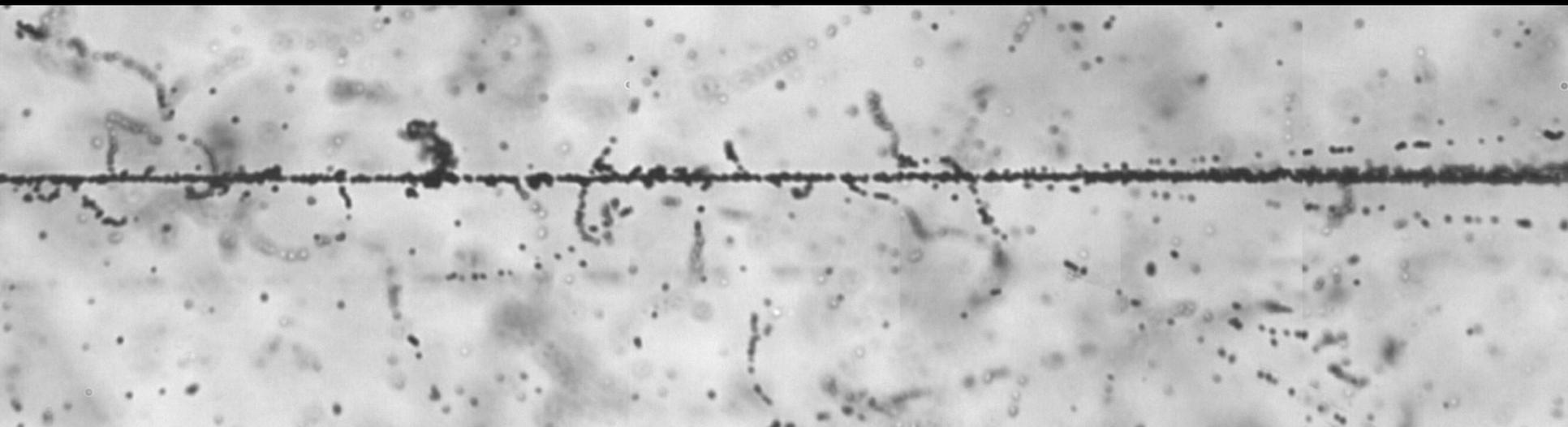
1959

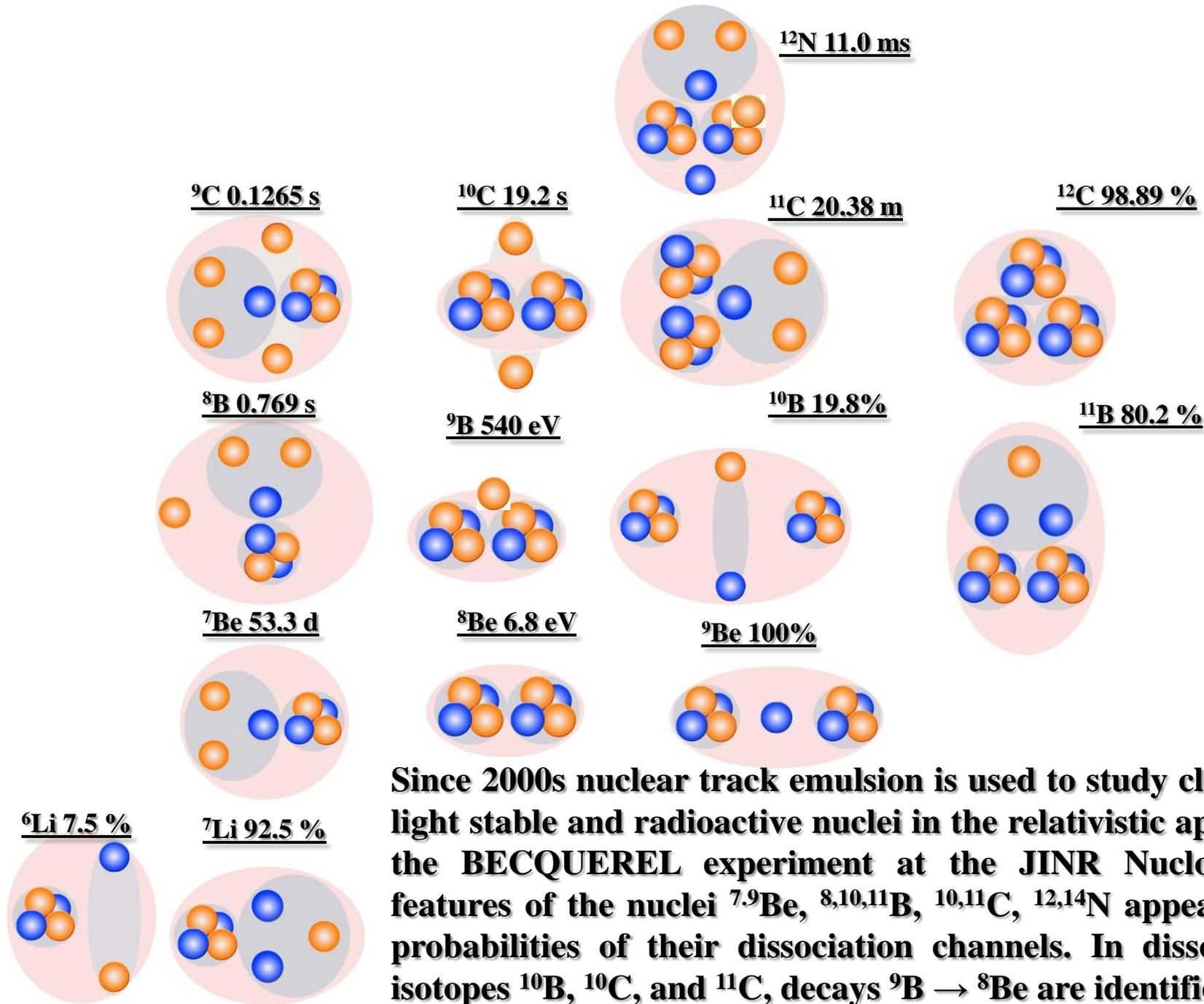
1974 JINR Synchrotron ^{12}C @ 3.65 A GeV



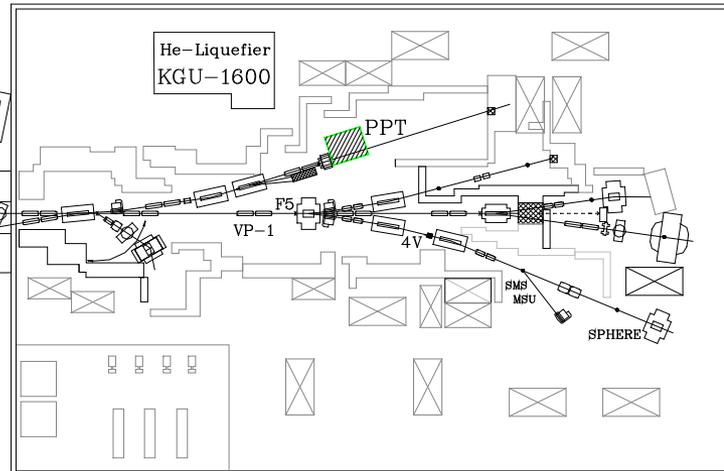
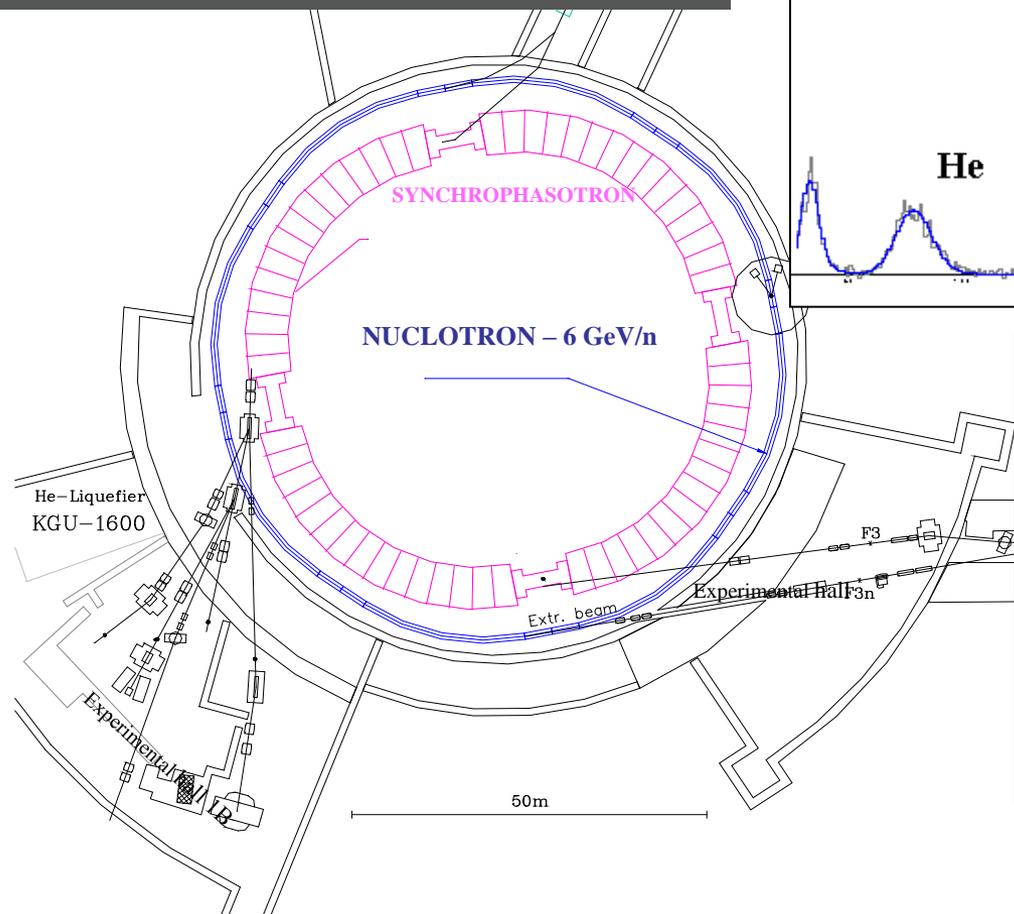
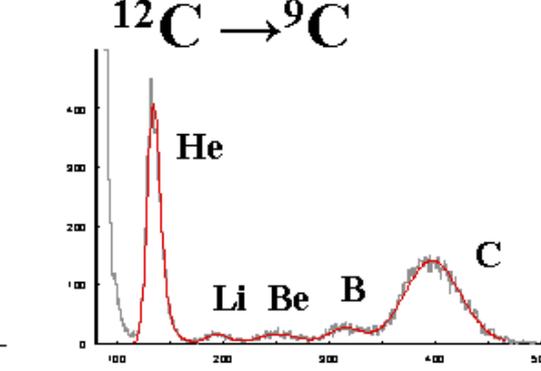
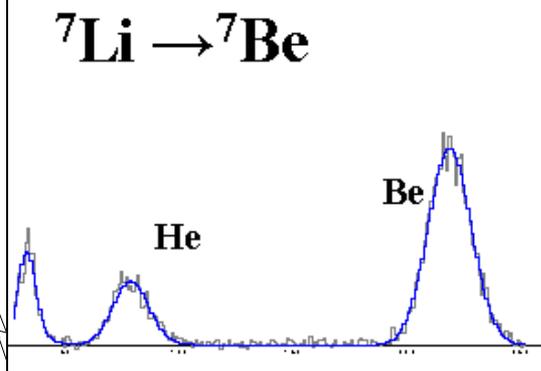
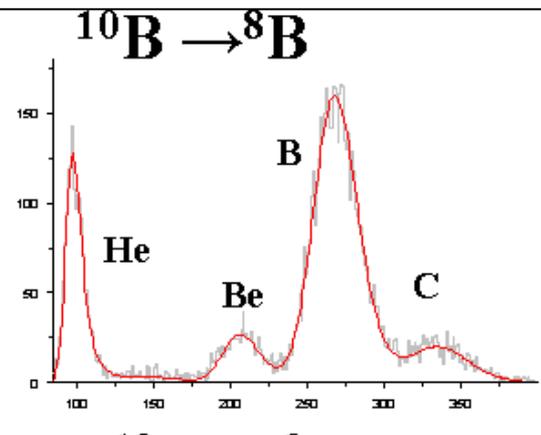
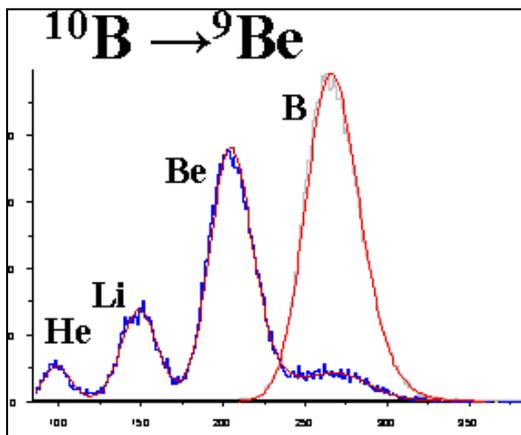
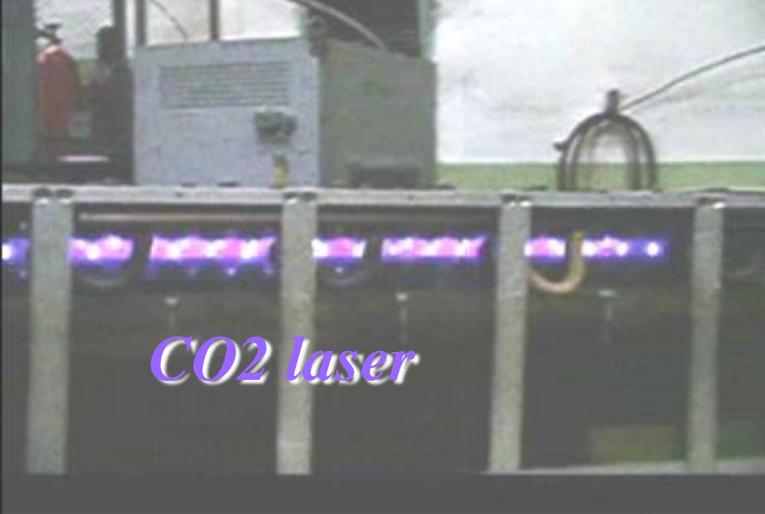
Становление в начале 70-х годов релятивистской ядерной физики было поддержано сообществами, имевшими богатый опыт применения ядерных эмульсий. Ускорители частиц открыли возможность изучения взаимодействий различных ядер определенной энергии, что позволило исследовать методом ядерной эмульсии спектры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

Синхрофазотрон 1986 г. ^{28}Si 3.65 ГэВ на нуклон





Since 2000s nuclear track emulsion is used to study clustering of light stable and radioactive nuclei in the relativistic approach in the BECQUEREL experiment at the JINR Nuclotron. The features of the nuclei $^{7,9}\text{Be}$, $^{8,10,11}\text{B}$, $^{10,11}\text{C}$, $^{12,14}\text{N}$ appeared in the probabilities of their dissociation channels. In dissociation of isotopes ^{10}B , ^{10}C , and ^{11}C , decays $^9\text{B} \rightarrow ^8\text{Be}$ are identified



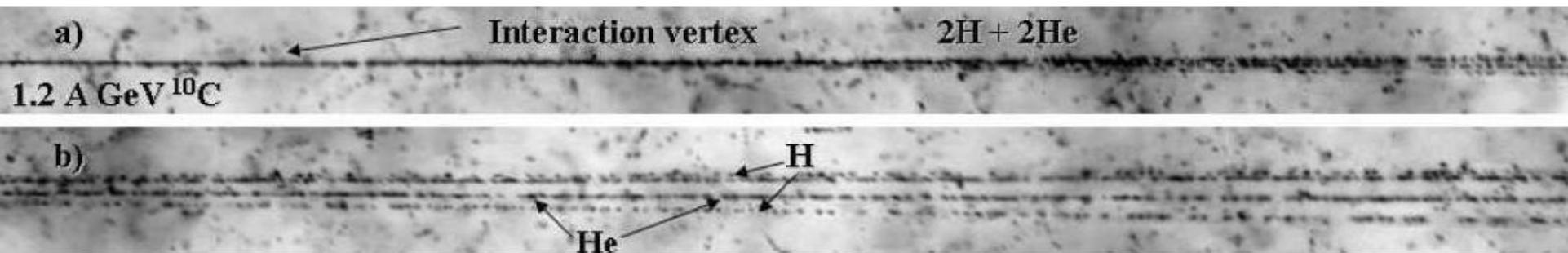


Коваленко

Александр Дмитриевич

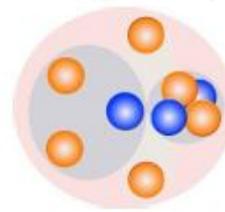
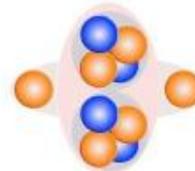
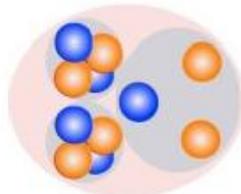
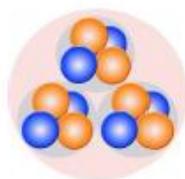
Малахов

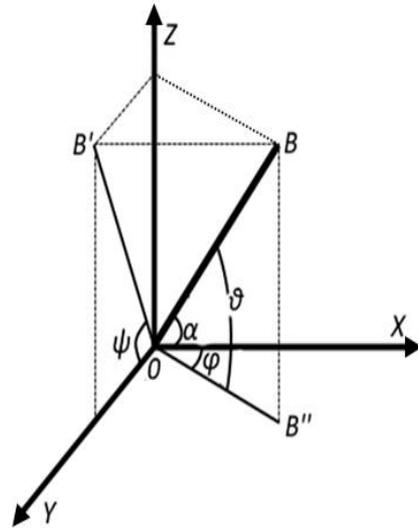
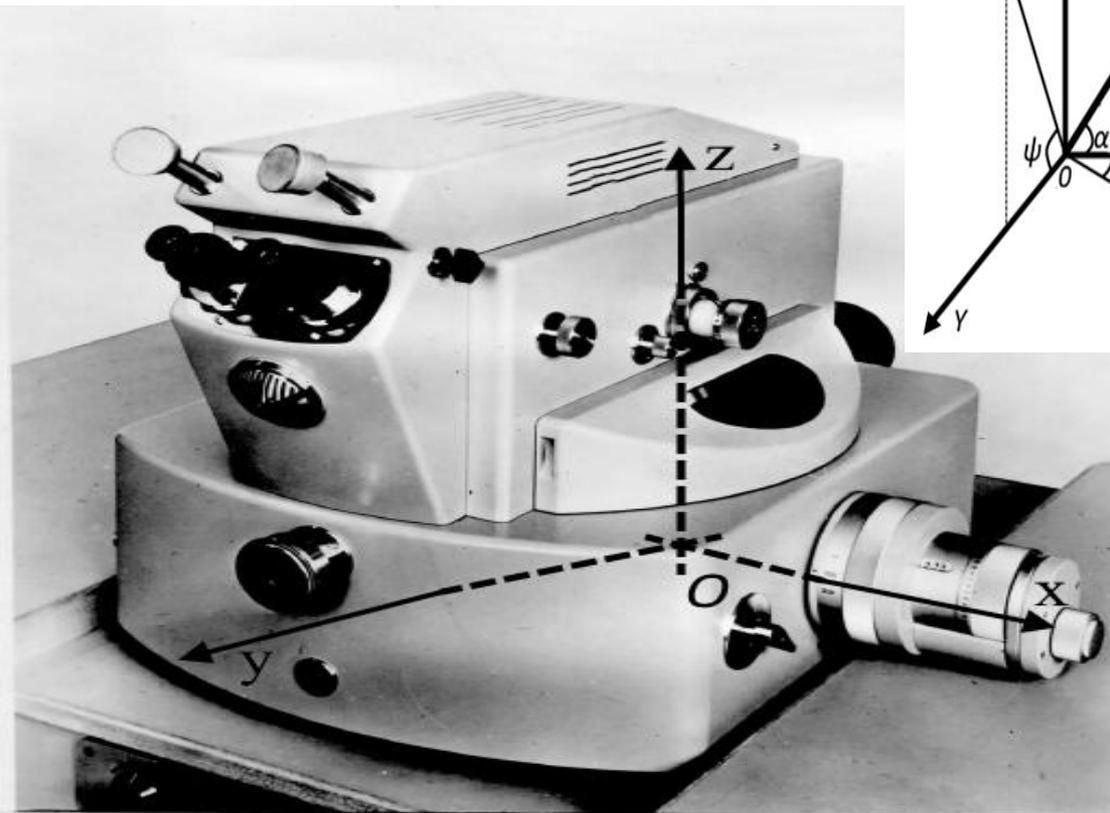
Александр Иванович



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 %)





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

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

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

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

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

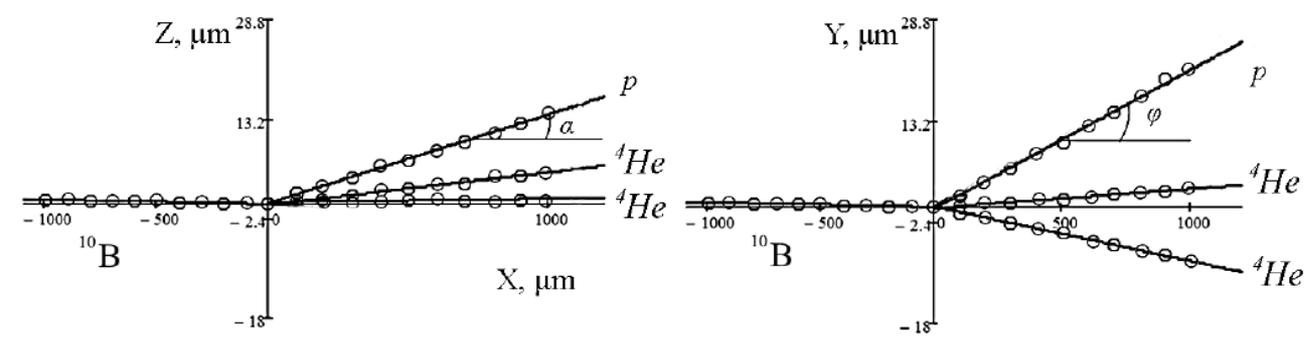
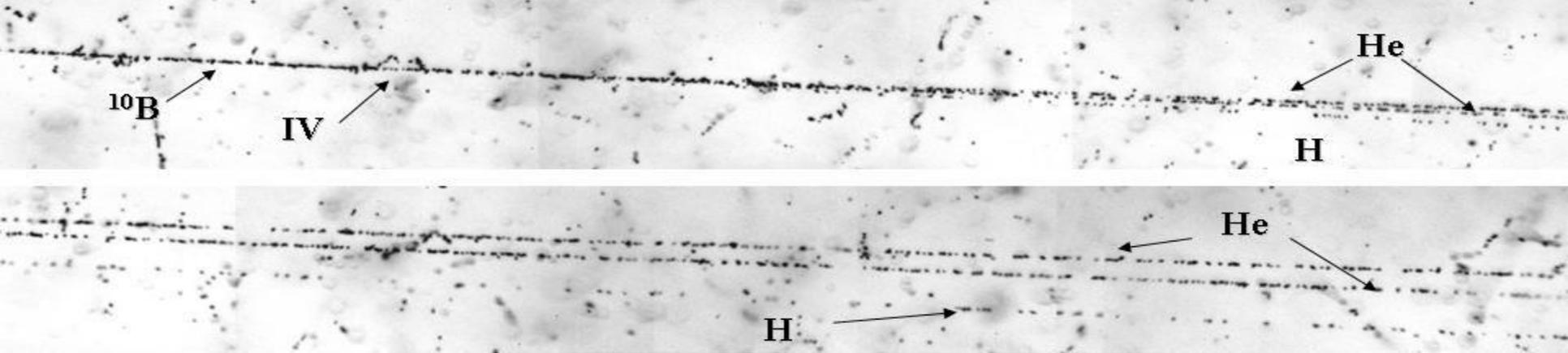
$$\Theta_{2\alpha} = \frac{P_{x1} \cdot P_{x2} + P_{y1} \cdot P_{y2} + P_{z1} \cdot P_{z2}}{P_{tot1} \cdot P_{tot2}}$$

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

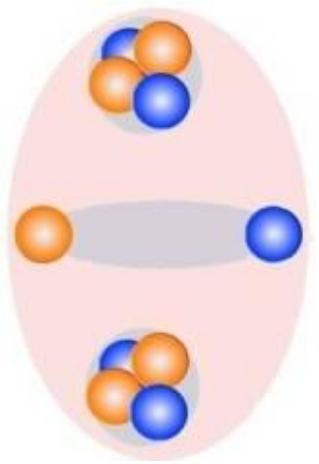
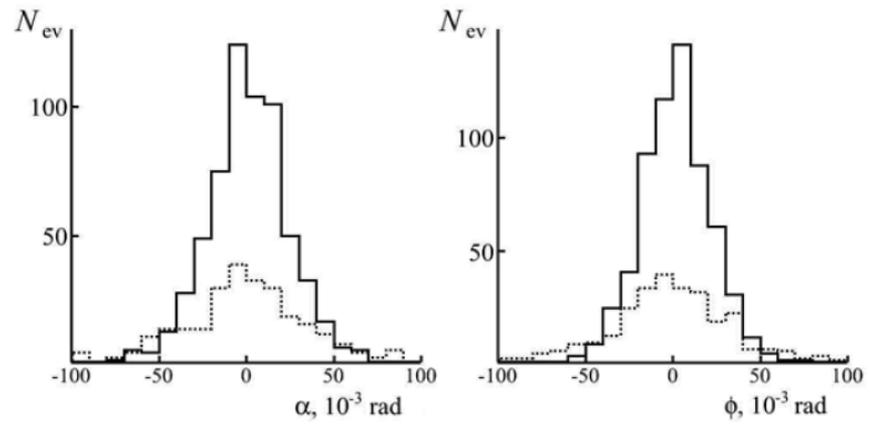
$$Q_{2\alpha} = \sqrt{2 \cdot [m_\alpha^2 + E_\alpha^2 - \vec{P}_{\alpha 1} \cdot \vec{P}_{\alpha 2}]} - 2 \cdot m_\alpha$$

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

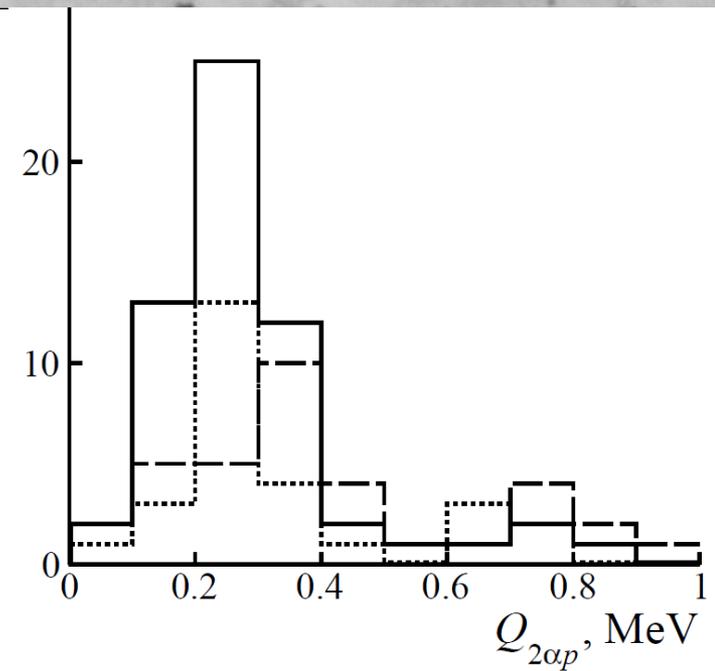
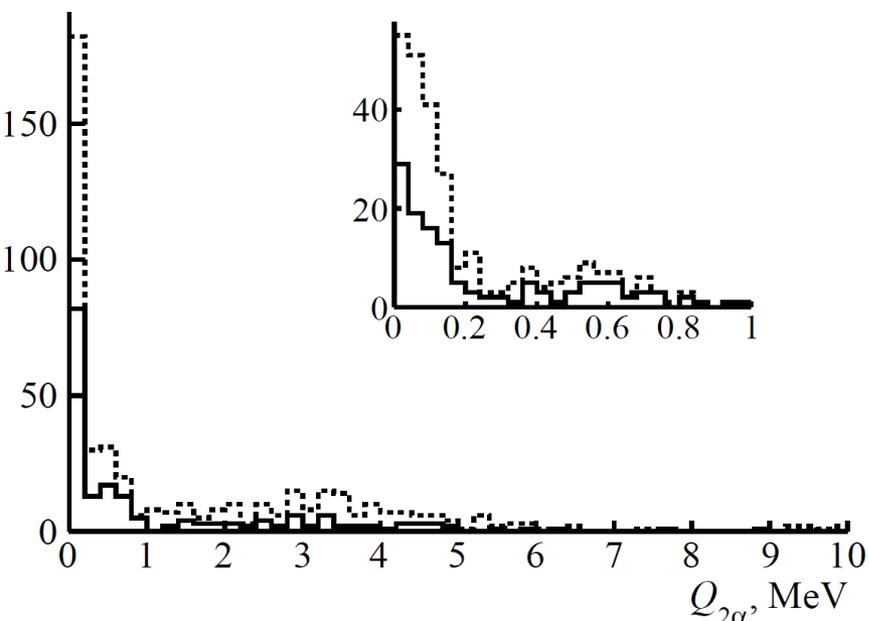
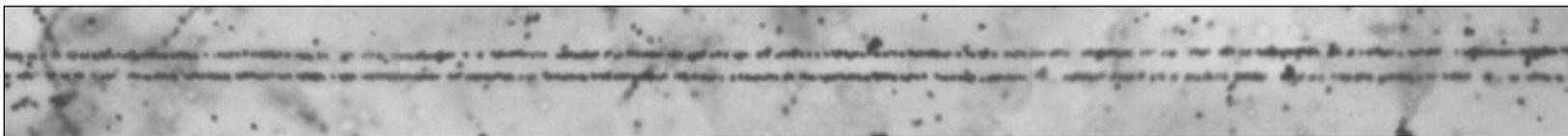
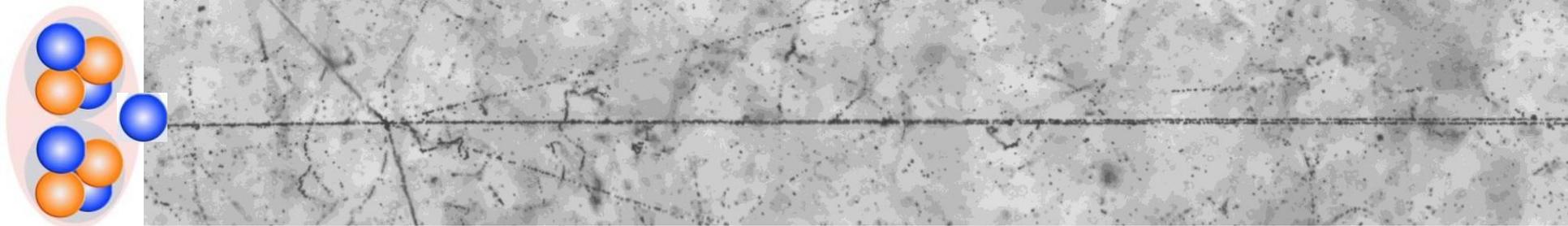
Инвариантная масса системы релятивистских фрагментов определяется как сумма всех произведений 4-импульсов $P_{i,k}$ фрагментов $M^{*2} = \sum(P_i \cdot P_k)$. Вычитание массы начального ядра или суммы масс фрагментов $Q = M^* - M$ является вопросом удобства представления. Компоненты $P_{i,k}$ определяются 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.



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

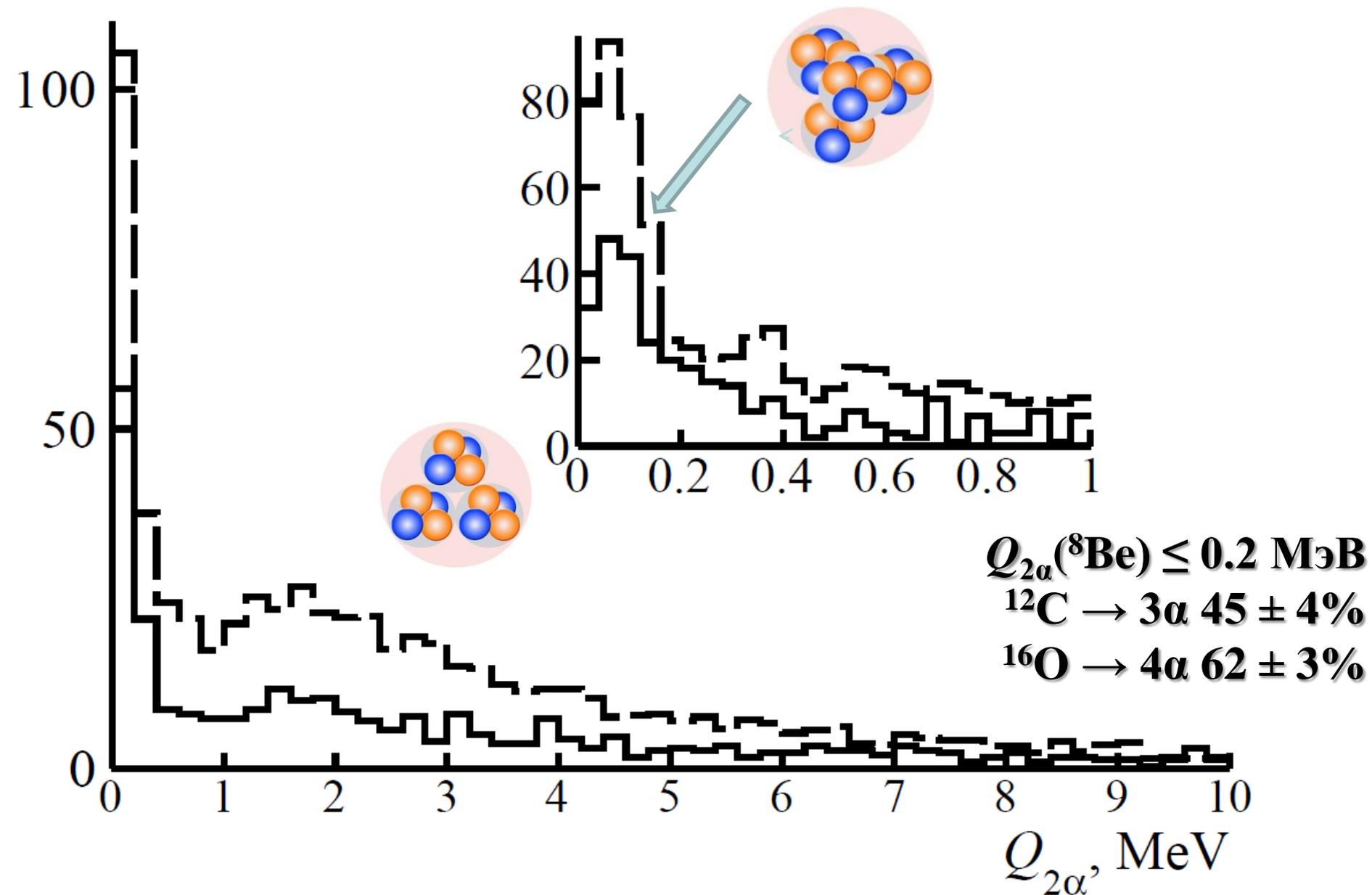


Distributions of fragments He (solid) and H (dotted) over dip and planar angles α and ϕ in events $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ @ 1.2 A GeV.



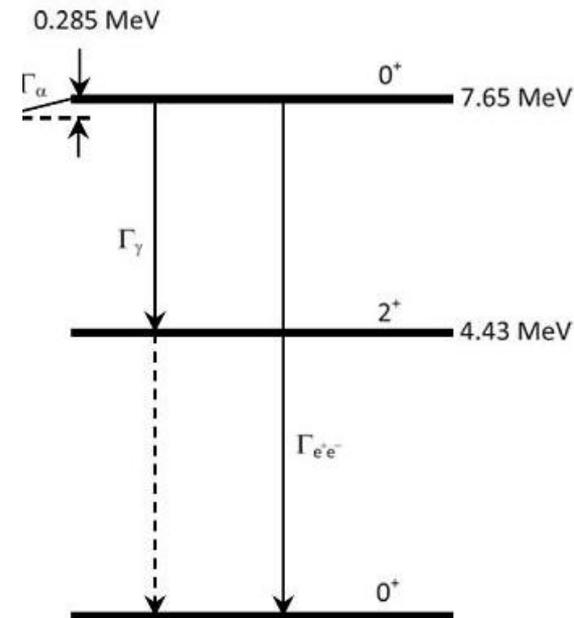
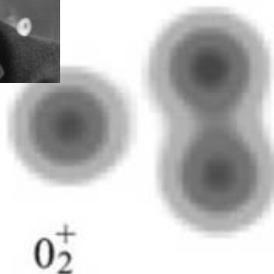
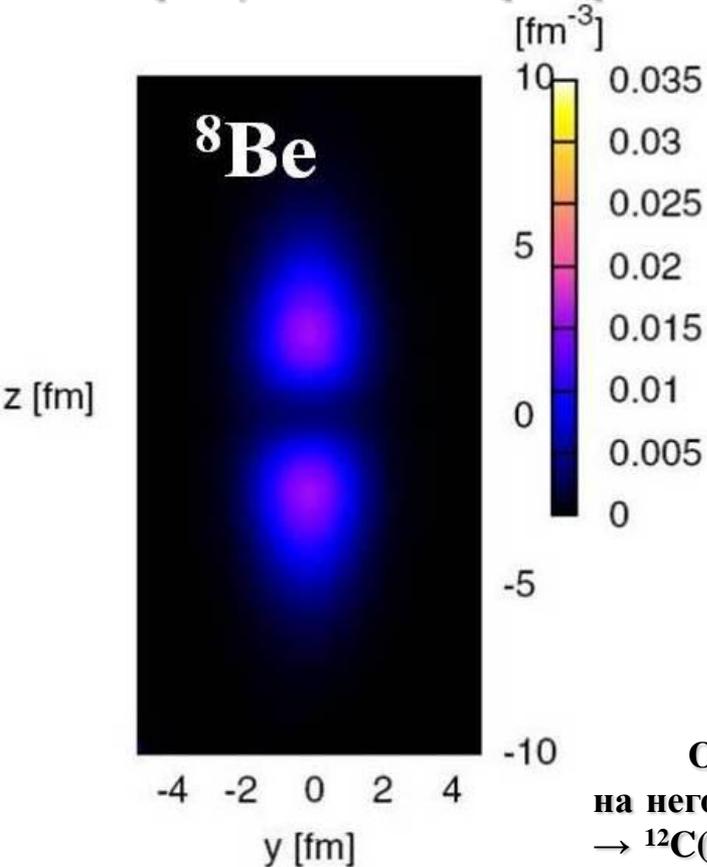
Распределение по $Q_{2\alpha}$ 500 2α -пар, в том числе 198 “белых” (сплошная), указывает на ограничение $Q_{2\alpha}(^8\text{Be}) \leq 0.2$ МэВ. Имеются “наплывы” при $Q_{2\alpha} = 0.6$ и 3 МэВ. Первый отражает возбуждение ^9Be при 2.43 МэВ, а второй – состояние $^8\text{Be} 2^+$.

Распределение числа $2\alpha p$ -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} .

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 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$.



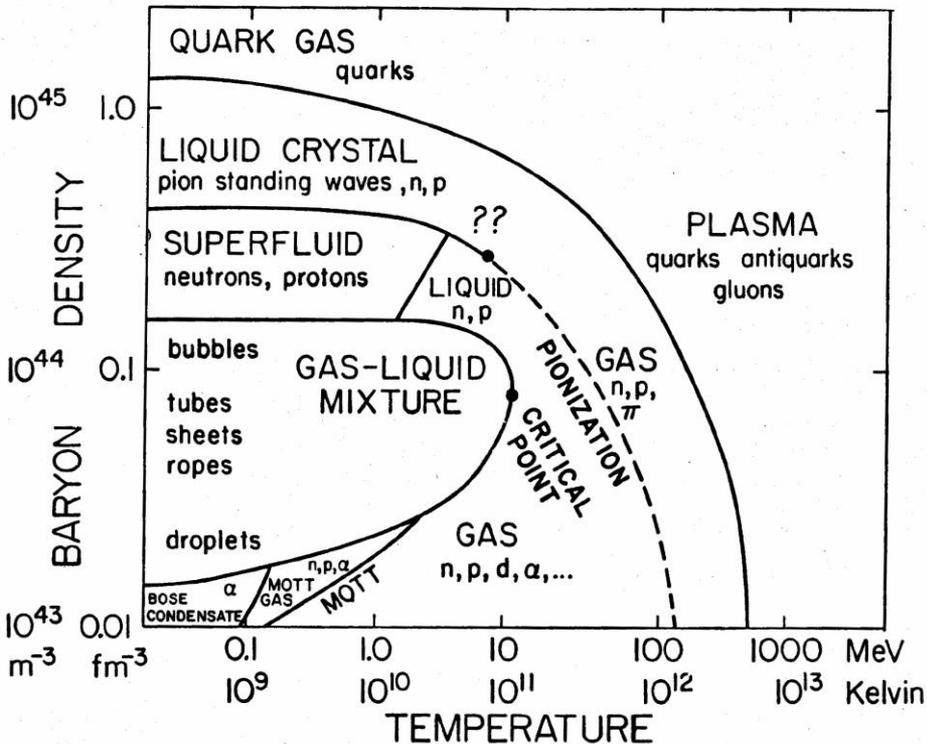
The Hoyle state

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.

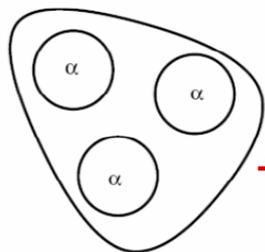
Alpha-Clusters in Nuclear Systems

P. Schuck

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

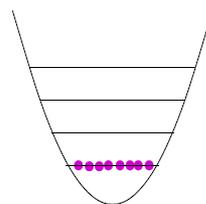


If O_2^+ in ^{12}C dilute α -state

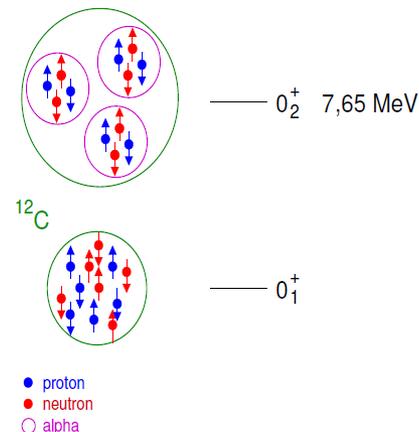


then α -condensate
infinite matter $\rho_{crit} \sim \frac{\rho_0}{3}$

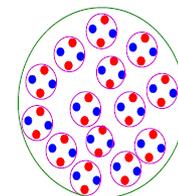
Bosons



Back to nuclei

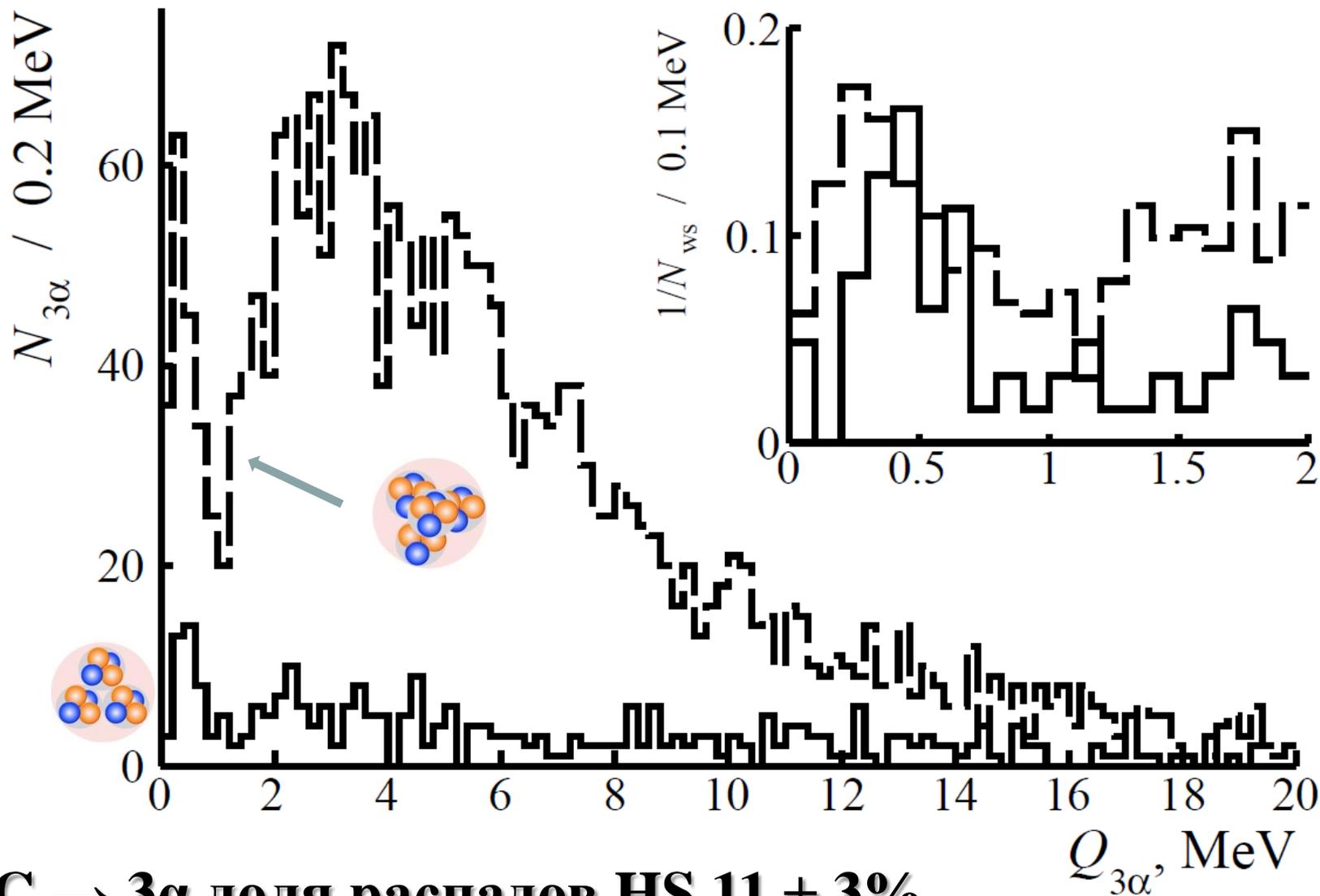


many α 's
 \rightarrow condensate



strong cluster
phenomena in
lighter nuclei

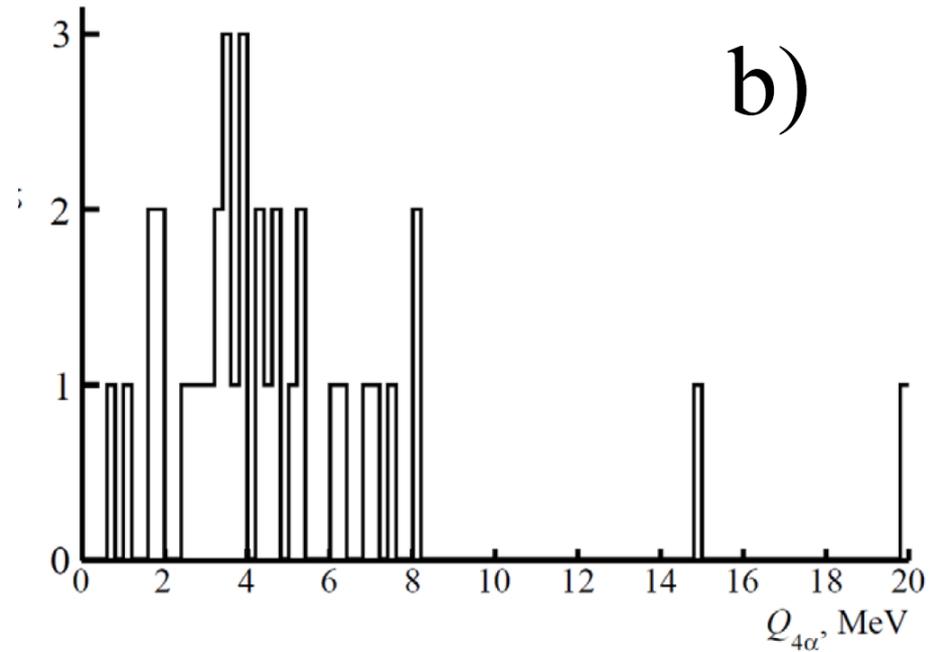
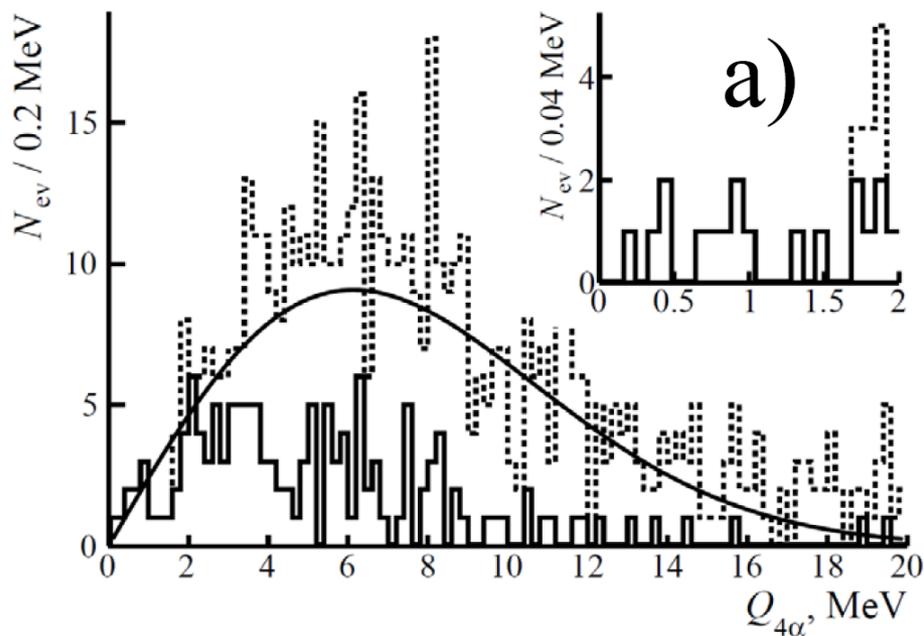
В настоящее время в фокусе исследования находится концепция α -частичного конденсата Бозе-Эйнштейна (α ВЕС) – предельно холодного состояния нескольких S-волновых α -частиц вблизи порогов связи. Нестабильное ядро ^8Be описывается как 2α ВЕС, а возбуждение $^{12}\text{C}(0_2^+)$ или состояние Хойла (HS) 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 $^{16}\text{O}(0_6^+) \rightarrow ^8\text{Be}(0^+)$. 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.



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

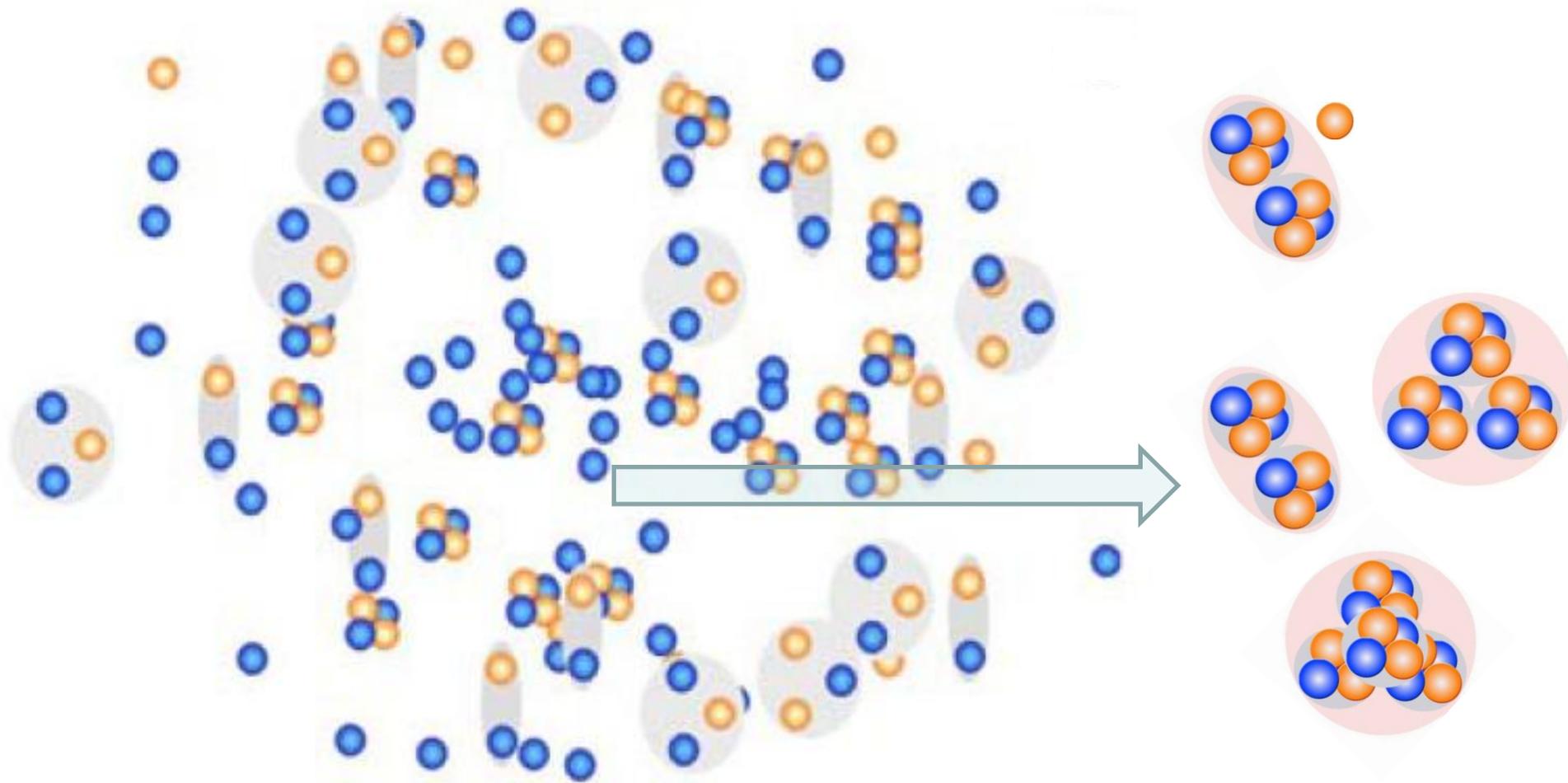
$^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ доля распадов HS $22 \pm 2\%$

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

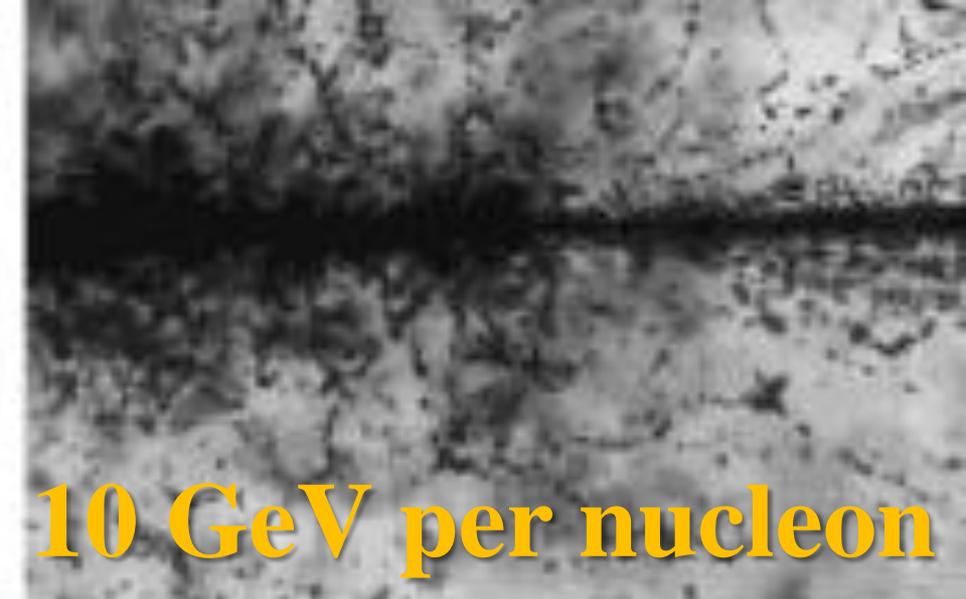


Существует возможность возникновения HS через α -распад $^{16}\text{O}(0^+_{\delta})$. Распределение “белых” звезд $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ по инвариантной массе 4α -квартетов $Q_{4\alpha}$ в основной части описывается распределением Рэля с параметром $\sigma_{Q_{4\alpha}} = (6.1 \pm 0.2)$ 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 $N_{\text{HS}}(^{16}\text{O})$.

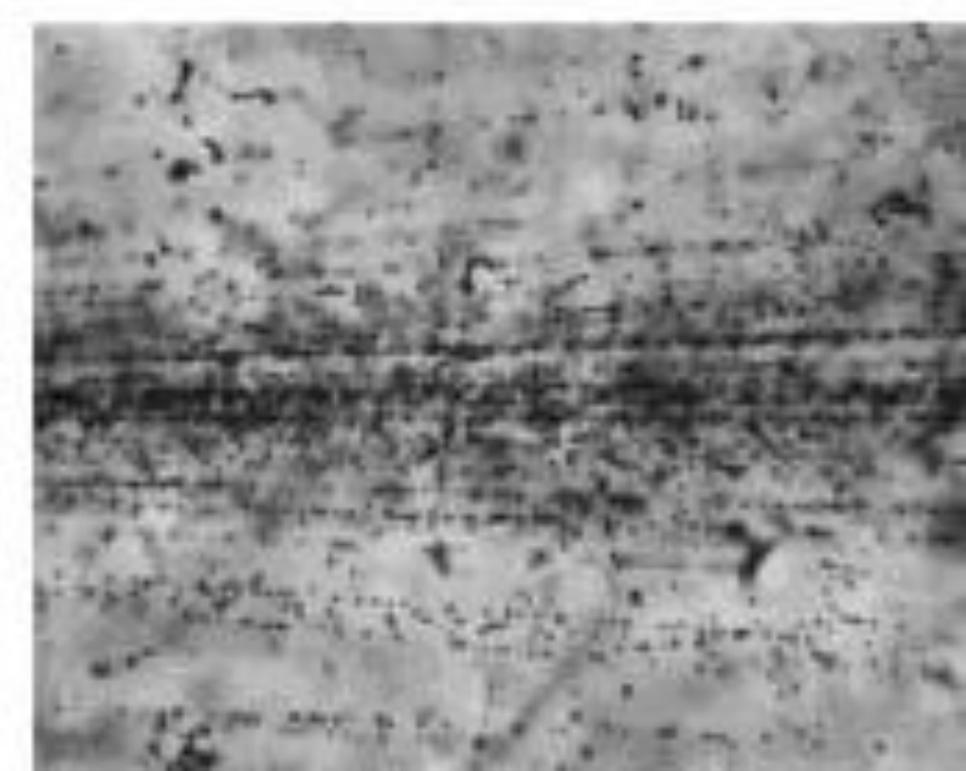
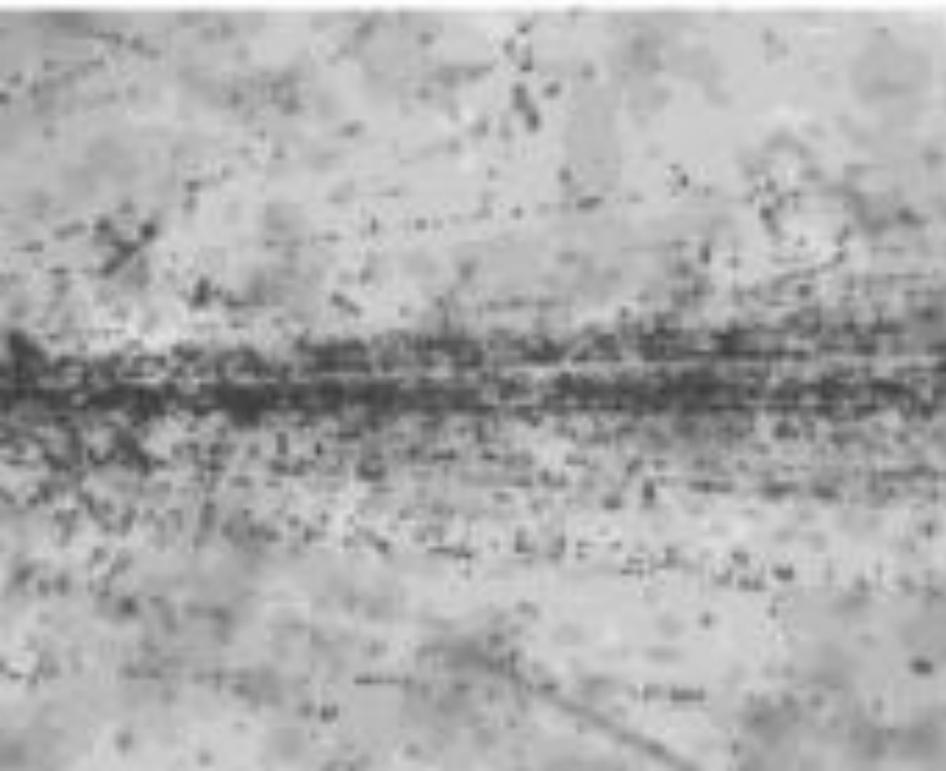
Идентифицированы 33 события $^{16}\text{O} \rightarrow ^{28}\text{Be}$, что составляет $5 \pm 1\%$ “белых” звезд $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$. Тогда статистика $^{16}\text{O} \rightarrow ^{28}\text{Be}$ и $^{16}\text{O} \rightarrow \alpha\text{HS}$ имеет отношение 0.22 ± 0.02 . Распределение по 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 .

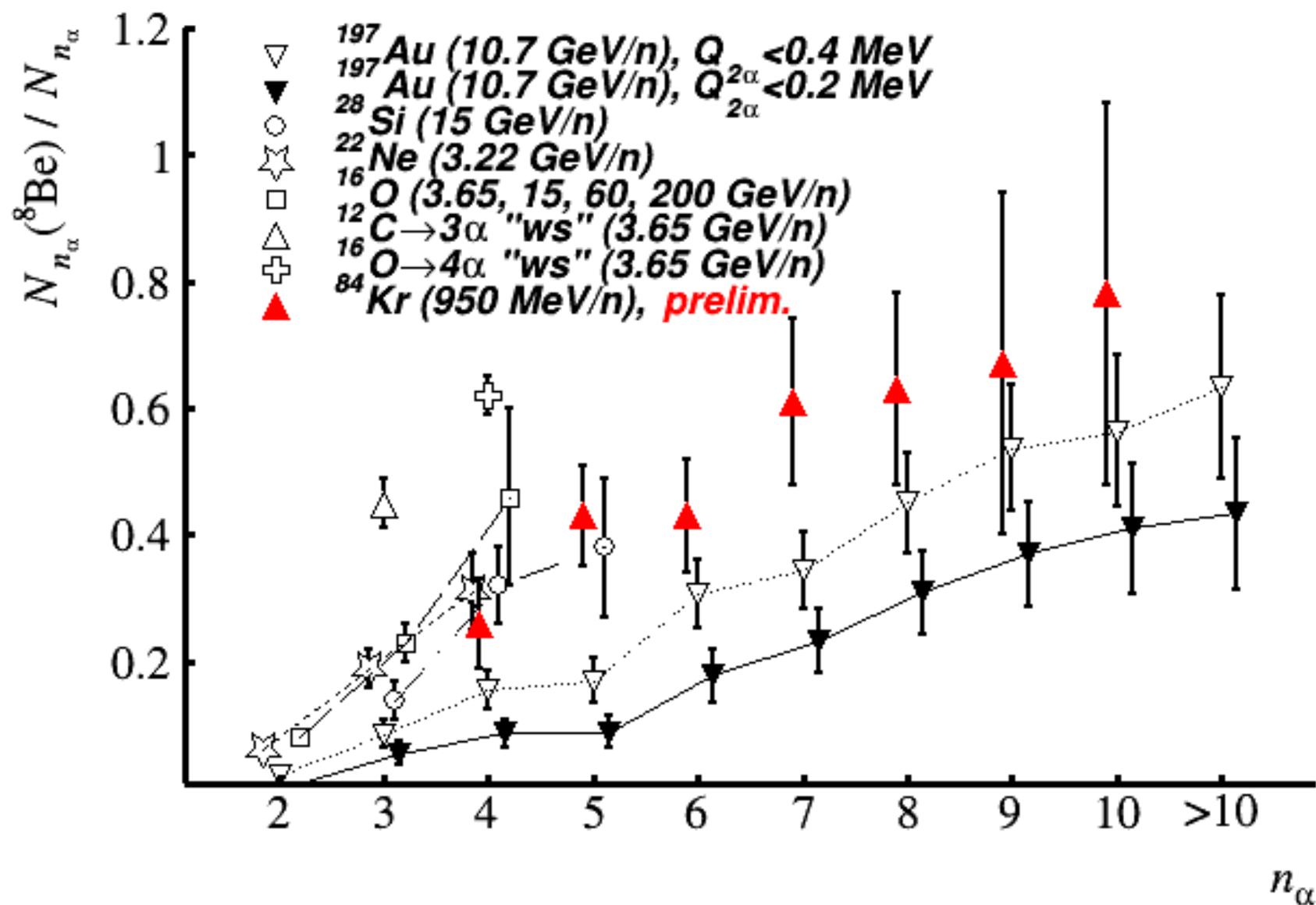


Этот подход стал применяться для идентификации ${}^8\text{Be}$ и HS и поиска более сложных состояний $n\alpha\text{BEC}$ во фрагментации средних и тяжелых ядер. На статистике десятков распадов ${}^8\text{Be}$ обнаружено возрастание вероятности обнаружения ${}^8\text{Be}$ в событии с ростом числа релятивистских 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 αBEC последовательным соединением α -частиц.



BNL AGS 90s Au 10 GeV per nucleon





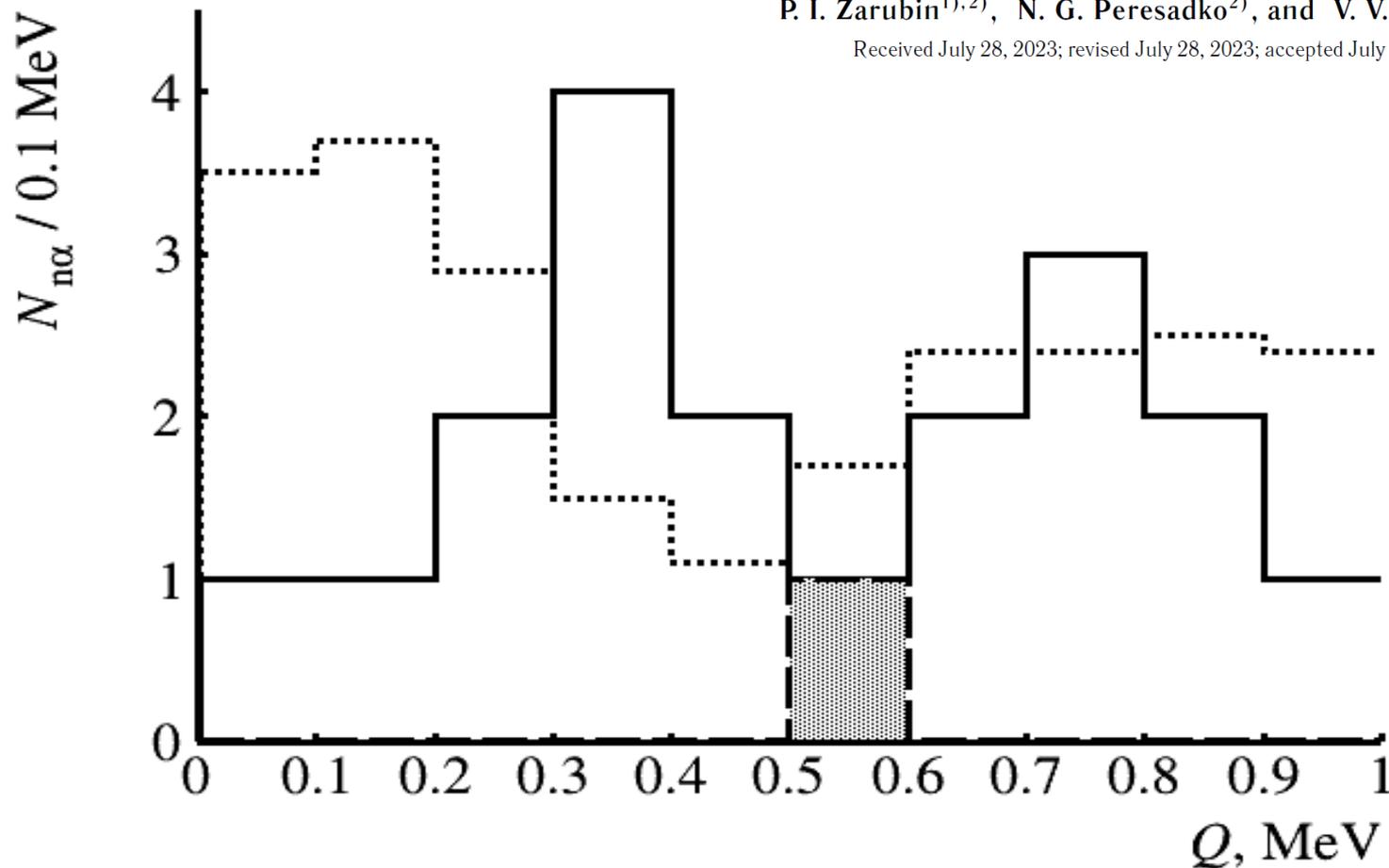
Статистика событий, содержащих не менее одного кандидата в распад ^8Be , HS или ^9B или не менее двух ^8Be при условии $Q_{2\alpha}(^8\text{Be}) \leq 0.4$ МэВ среди N_{na} событий фрагментации ядер ^{197}Au с множественностью n_α ; курсивом выделена суммарная статистика каналов $n_\alpha \geq 11$.

n_α	$N_{na}(^8\text{Be})/N_{na}$ (% N_{na})	$N_{na}(^9\text{B})$ (% $N_{na}(^8\text{Be})$)	$N_{na}(\text{HS})$ (% $N_{na}(^8\text{Be})$)	$N_{na}(2^8\text{Be})$ (% $N_{na}(^8\text{Be})$)
2	3/133 (2 ± 1)	-	-	-
3	14/162 (9 ± 3)	1 (7)	-	-
4	25/161 (16 ± 4)	7 (28 ± 12)	2 (8 ± 6)	-
5	23/135 (17 ± 4)	5 (22 ± 11)	-	1 (4)
6	31/101 (31 ± 7)	9 (29 ± 11)	2 (6 ± 4)	-
7	31/90 (34 ± 7)	6 (19 ± 9)	2 (6 ± 4)	3 (10 ± 6)
8	32/71 (45 ± 10)	8 (25 ± 10)	2 (6 ± 4)	2 (7 ± 5)
9	29/54 (54 ± 13)	9 (31 ± 12)	3 (10 ± 6)	5 (17 ± 8)
10	22/39 (56 ± 15)	4 (18 ± 10)	-	5 (23 ± 12)
11	10/15 (67 ± 27) 19/30 (63 ± 19)	3 (30 ± 20) 7 (37 ± 16)	1 (10) 2 (11 ± 8)	2 (20 ± 16) 6 (32 ± 15)
12	2/5	1	-	1
13	2/4	1	-	1
14	3/3	1	-	1
15	1/1	-	-	-
16	1/2	1	1	1

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

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.

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

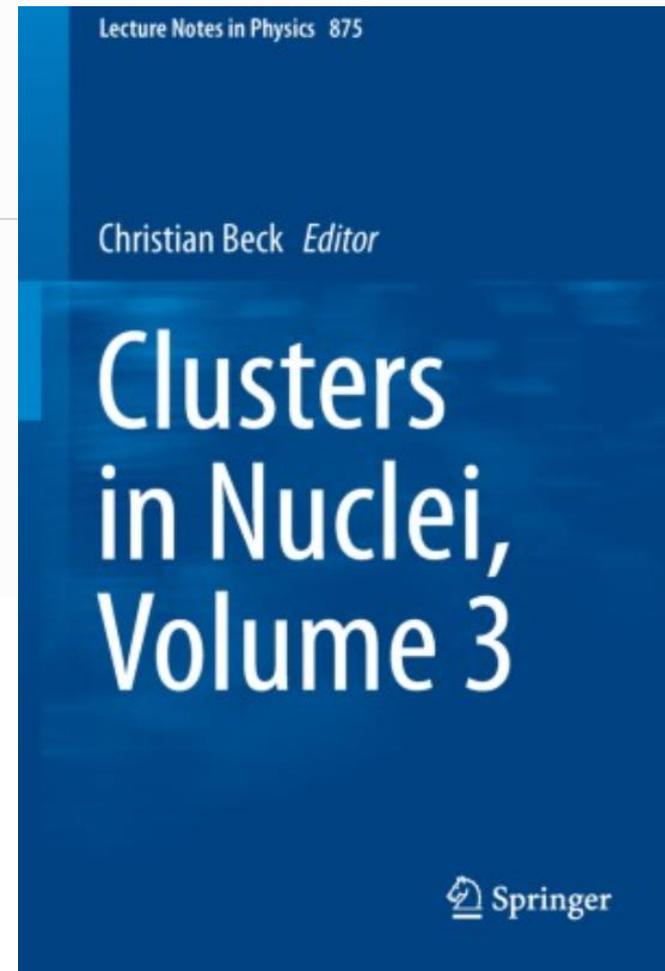
“Tomography” of the Cluster Structure of Light Nuclei via Relativistic Dissociation

Authors

[Authors and affiliations](#)

P. I. Zarubin 

 **1188** Accesses  **21** Citations



The Hoyle State in Relativistic ^{12}C Dissociation

Authors

[Authors and affiliations](#)

D. A. Artemenkov, M. Haiduc, N. K. Kornegrutsa, E. Mitsova, N. G. Peresadko, V. V. Rusakova, R. Stanoeva, A. A. Zaitsev,

P. I. Zarubin , I. G. Zarubina

Conference paper

First Online: 07 January 2020

 1157 Accesses  3 Citations

Springer Proceedings in Physics 238

N. A. Orr
M. Płoszajczak
F. M. Marqués
J. Carbonell *Editors*

FB22

**XXII International Conference on
Few-Body Problems in Physics**

9-13 JULY 2018-Caen, France



**Recent Progress
in Few-Body
Physics**

Proceedings of the 22nd International
Conference on Few-Body Problems in
Physics

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

2-6 September 2019
ECT* - Villa Tambosi



[10 most recent](#)[Browse issues](#)[Topical issues](#)[Reviews](#)[Letters](#)

The European Physical Journal A

Light Clusters in Nuclei and Nuclear Matter: Nuclear Structure and Decay, Heavy Ion Collisions, and Astrophysics

David Blaschke, Hisashi Horiuchi, Masaaki Kimura, Gerd Roepke and Peter Schuck

Regular Article - Experimental Physics | [Published: 06 October 2020](#)

Unstable states in dissociation of relativistic nuclei

Recent findings and prospects of research

[D. A. Artemenkov](#), [V. Bradnova](#), [M. M. Chernyavsky](#), [E. Firu](#), [M. Haiduc](#), [N. K. Kornegrutsa](#), [A. I. Malakhov](#), [E. Mitsova](#), [A. Neagu](#), [N. G. Peresadko](#), [V. V. Rusakova](#), [R. Stanoeva](#), [A. A. Zaitsev](#), [P. I. Zarubin](#)  & [I. G. Zarubina](#)

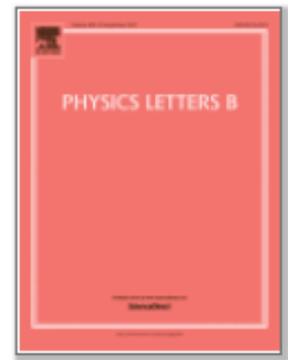
The European Physical Journal A **56**. Article number: 250 (2020) | [Cite this article](#)

 495 Accesses  9 Citations



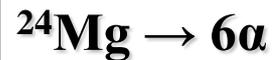
Physics Letters B

Volume 820, 10 September 2021, 136460



Correlation in formation of ^8Be nuclei and α -particles in fragmentation of relativistic nuclei

A.A. Zaitsev ^{a, b}  , D.A. Artemenkov ^a, V.V. Glagolev ^a, M.M. Chernyavsky ^b,
N.G. Peresadko ^b, V.V. Rusakova ^a, P.I. Zarubin ^{a, b}



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.



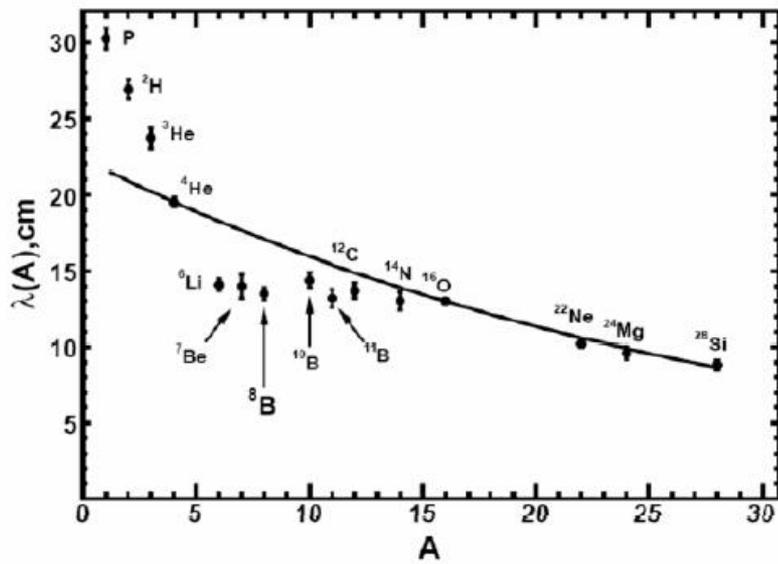


Рис. II.11 Данные по пробегам легких ядер в эмульсии, включая измерения настоящей работы (${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$, ${}^{10,11}\text{B}$, ${}^{14}\text{N}$)

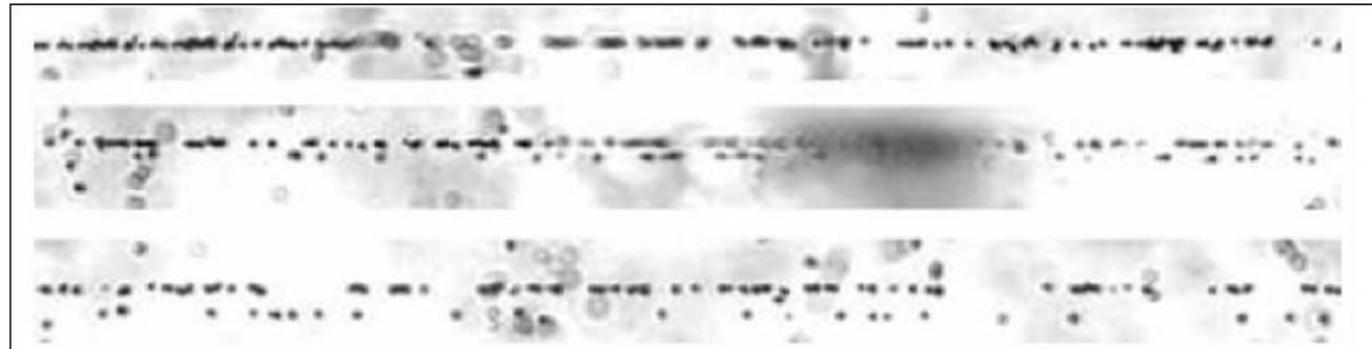
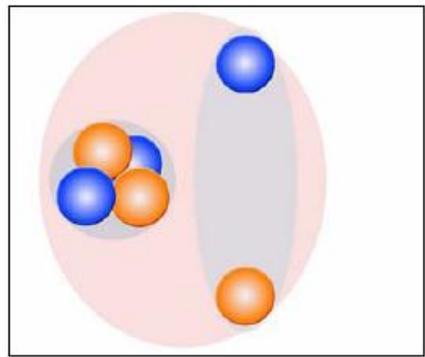
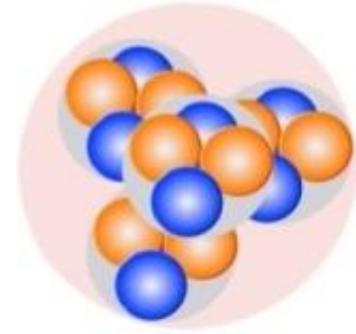
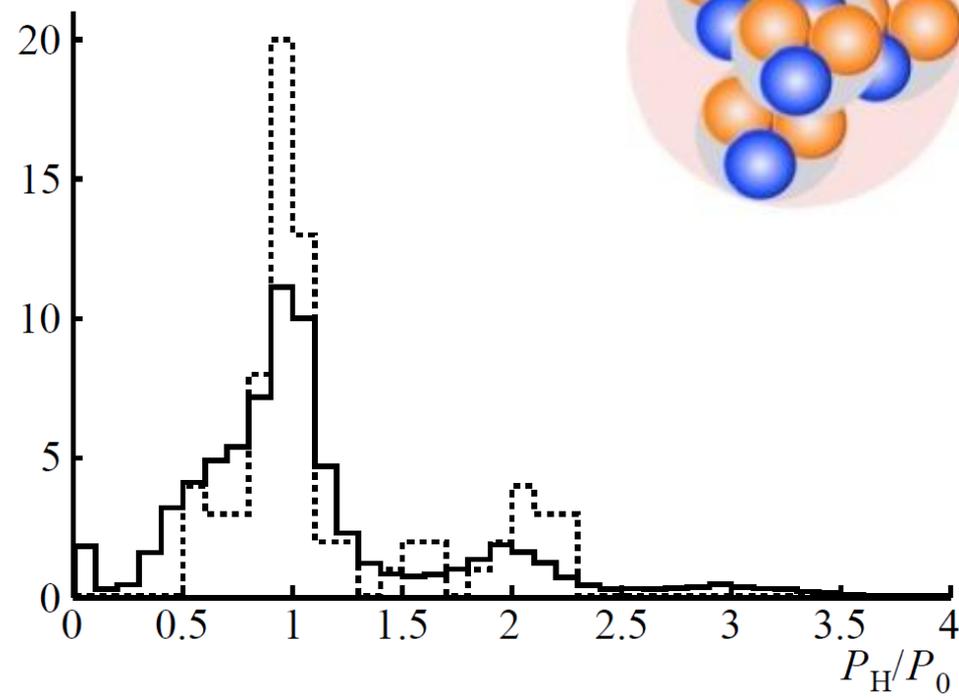
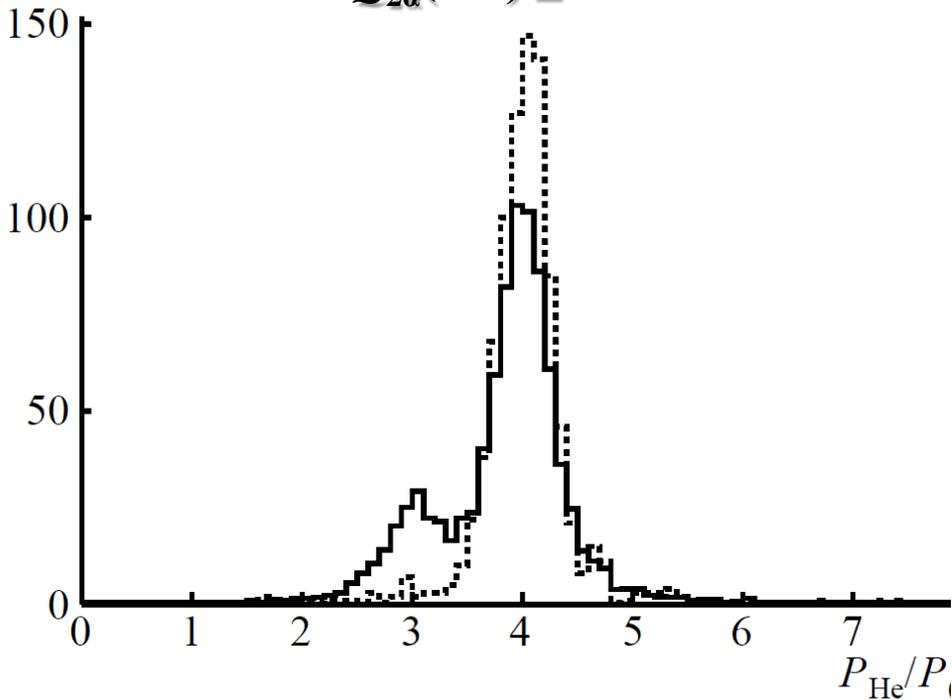


Рис II.12. Фрагментация релятивистского ядра ${}^6\text{Li}$ на одно- и двухзарядный фрагмент в эмульсии; на верхней фотографии видна вершина взаимодействия и узкая струя их двух фрагментов; при смещении вдоль струи фрагментов (нижние фотографии) отчетливо разделяются один однозарядный и один двухзарядный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

$$Q_{2\alpha}({}^8\text{Be}) \leq 0.2 \text{ МэВ}$$



Проверить принятые приближения позволяют данные, полученные при облучении ядрами ${}^{16}\text{O}$ с энергией 2.4 ГэВ/нуклон 1-метровой водородной пузырьковой камеры ОИЯИ (ВПК-100), помещавшейся в магнитное поле. Набор данных включает измерения в полной геометрии векторов импульсов продуктов реакции ${}^{16}\text{O} + p$ в 11104 соударениях всех видов. В этом случае также имеется пик в начальной части распределения по углу разлета 2α -пар $\Theta_{2\alpha}$, соответствующий распадам ${}^8\text{Be}$. Согласно измеренным импульсам фрагментов условие $Q_{2\alpha}({}^8\text{Be}) \leq 0.2 \text{ МэВ}$ удаляет вклад ${}^3\text{He}$, а вклад протонов составляет 90% среди фрагментов H.