



Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ на ускорительном комплексе НУКЛОТРОН/NICA

Д. А. Артеменков^a, В. Браднова^a, Е. Фиру^b, М. Хайдук^b, Н. К. Корнегруца^a,
Э. Мицова^{a,e}, А. Неагу^b, В.В. Русакова^a, Р. Станоева^{c,d}, В. Вартик^a,
А.А. Зайцев^a, И.Г. Зарубина^a, П.И. Зарубин^{a*}

^{a)}Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна, Россия

^{b)}Институт космических исследований, Мэгуреле, Румыния

^{c)}Юго-Западный университет, Благоевград, Болгария

^{d)}Институт ядерных исследований и ядерной энергии, София, Болгария

Явление диссоциации релятивистских ядер, наблюдаемое с уникальной полнотой в ядерной эмульсии (ЯЭ), позволяет изучать ансамбли нуклонов и легчайших ядер, представляющие интерес для ядерной физики и астрофизики. Индивидуальные особенности изучаемых ядер проявляются в вероятностях каналов диссоциации. Достоинства методики ЯЭ включают рекордное разрешение в определении углов вылета релятивистских фрагментов и возможность идентификации среди них изотопов He и H путем измерения многократного рассеяния.

На этой основе в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ на нуклотроне ОИЯИ изучается кластерная структура легких стабильных и радиоактивных изотопов. В частности, по инвариантной массе пар и троек релятивистских фрагментов He и H в диссоциации изотопов ^9Be , ^{10}B , ^{10}C и ^{11}C идентифицированы нестабильные ядра ^8Be и ^9B , а в диссоциации ^{12}C и ^{16}O — состояние Хойла. При решении этих задач подготовлены молодые исследователи, осовременены методы анализа и восстановлено производство ЯЭ. По результатам эксперимента подготовлены докторская диссертация и шесть кандидатских диссертаций и опубликованы обзоры. Следующей проблемой является поиск в диссоциации ядер ^{14}N , ^{22}Ne и ^{28}Si состояния Хойла, а также более сложных ядерно-молекулярных состояний.

Главной перспективой станет применение метода ЯЭ для изучения разреженной барионной материи, возникающей при диссоциации тяжелых ядер. Температура и плотность этого короткоживущего состояния определяются по соотношению релятивистских изотопов H и He и нейтронов и углам их испускания. Слои ЯЭ, облученные в пучках NICA послужат исследовательским материалом, позволяющим исследовать ядерные ансамбли беспрецедентной множественности и разнообразия.

Для понимания механизма множественной диссоциации ядер предлагается провести анализ фрагментации ядер из состава ЯЭ вплоть до их полного разрушения под действием релятивистских мюонов. Облучения ЯЭ мюонами будут выполнены в ЦЕРН.

Эффективное решение поставленных задач требует инвестиций в автоматизированные и компьютеризированные микроскопы, а также совершенствование технологии ЯЭ. Проект послужит основой для обновления традиционного сотрудничества по использованию ЯЭ.

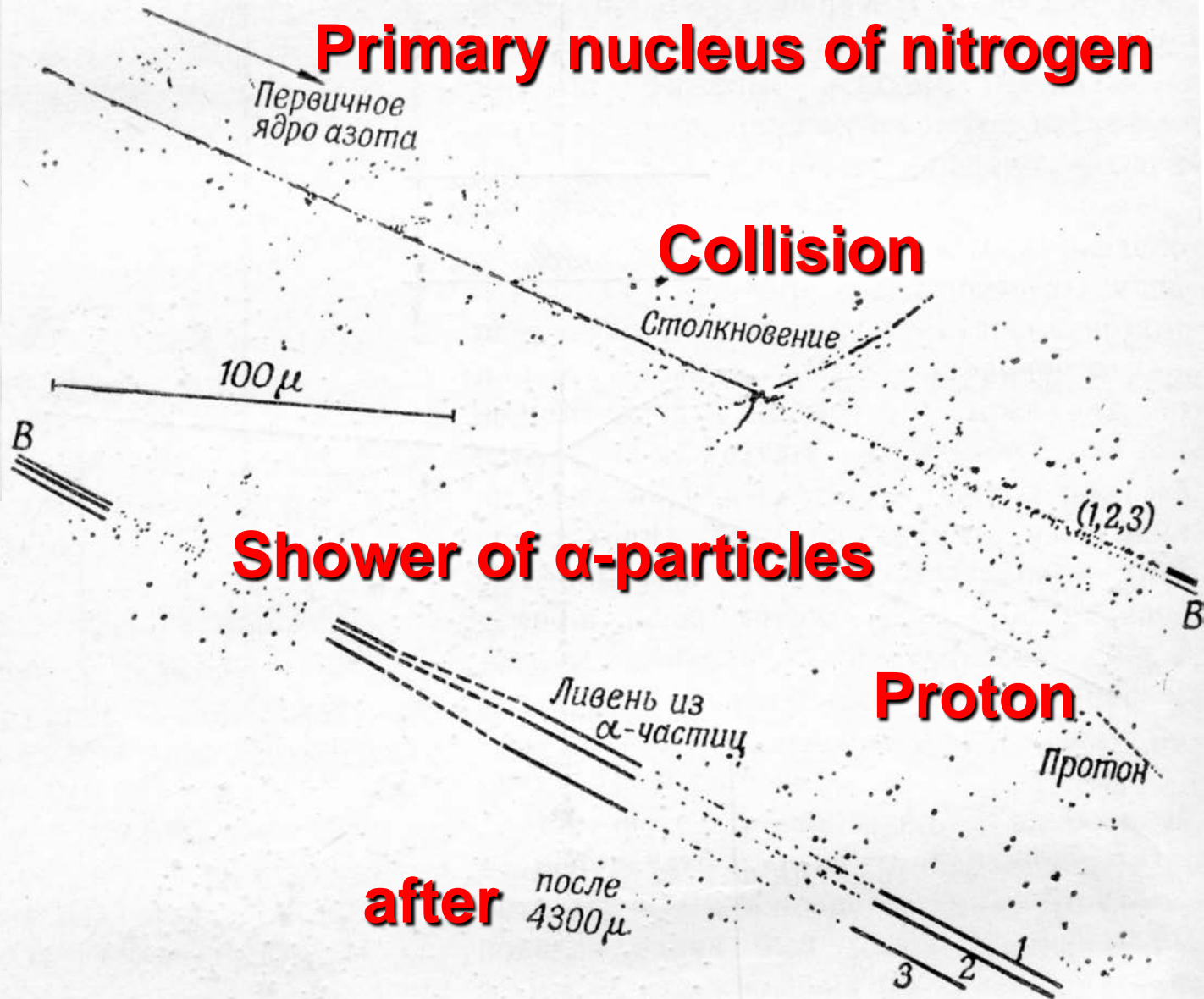
PROGRESS
in
COSMIC RAY PHYSICS

Edited by
J. G. WILSON

Contributors

U. Camerini	L. Michel	G. Puppi
W. O. Lock	B. Peters	N. Dallaporta
D. N. Perkins	H. V. Neher	E. P. George
C. C. Butler	H. Elliot	

AMSTERDAM, 1952



Фиг. 7. Ядро азота столкнулось с ядром эмульсии. Повидимому, произошло скользящее столкновение, при котором заряд первичного ядра уменьшается на единицу. Остаток, представляющий собой возбужденное ядро углерода, распадается затем на 3 α -частицы, которые в лабораторной системе испускаются в узком конусе в направлении движения первичной частицы

PROGRESS
in
COSMIC RAY PHYSICS

Edited by
J. G. WILSON

Contributors

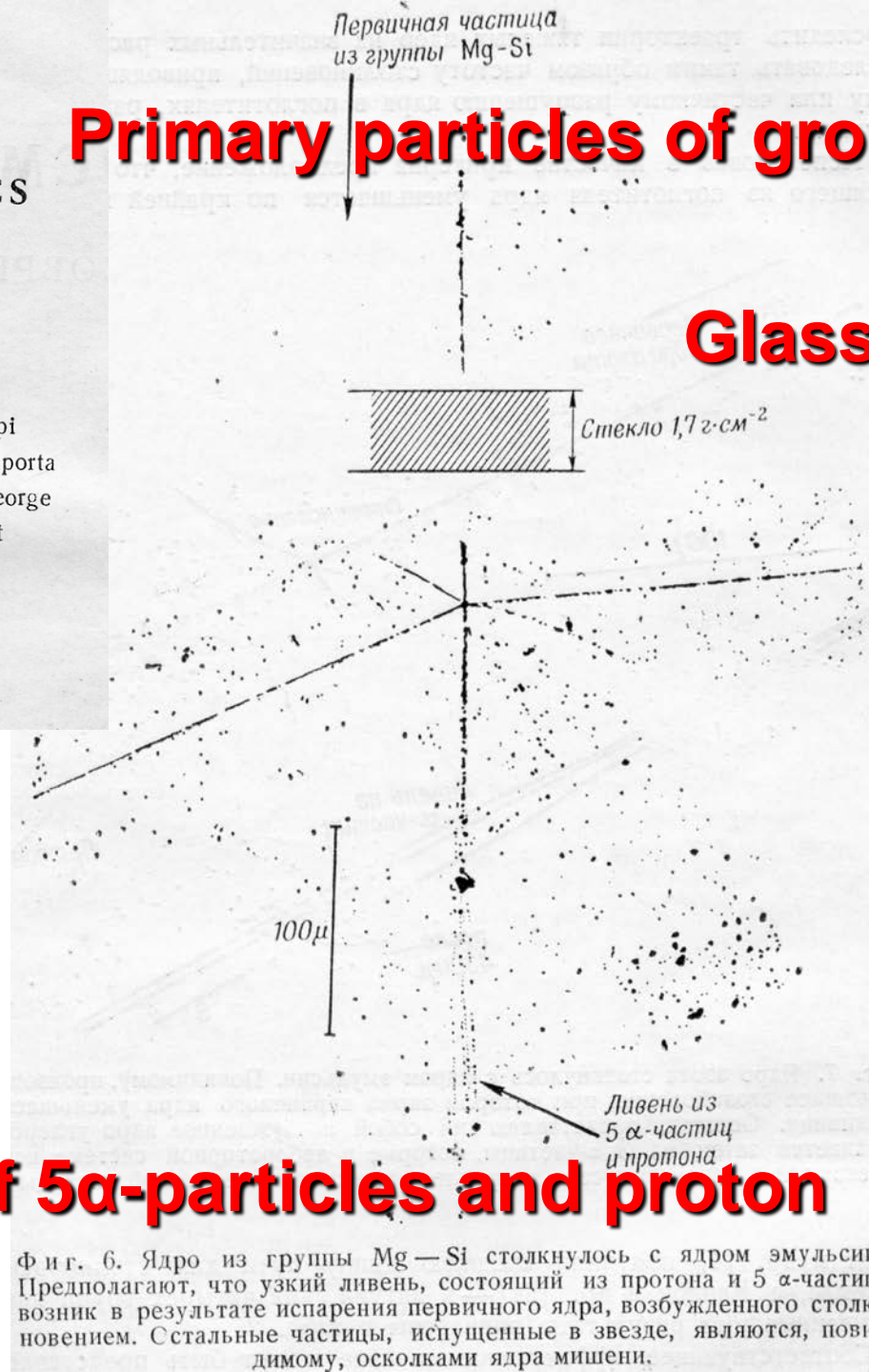
U. Camerini	L. Michel	G. Puppi
W. O. Lock	B. Peters	N. Dallaporta
D. N. Perkins	H. V. Neher	E. P. George
C. C. Butler	H. Elliot	

AMSTERDAM, 1952

Первичная частица
из группы Mg-Si

Primary particles of group Mg-Si

Glass 1.7 g cm⁻²



Shower of 5α-particles and proton

Фиг. 6. Ядро из группы Mg—Si столкнулось с ядром эмульсии. Предполагают, что узкий ливень, состоящий из протона и 5 α-частиц, возник в результате испарения первичного ядра, возбужденного столкновением. Стакльные частицы, испущенные в звезде, являются, повидимому, осколками ядра мишени.



1000 1000 1000
e 314 1
D.L. 23

The Study of Elementary Particles by the Photographic Method

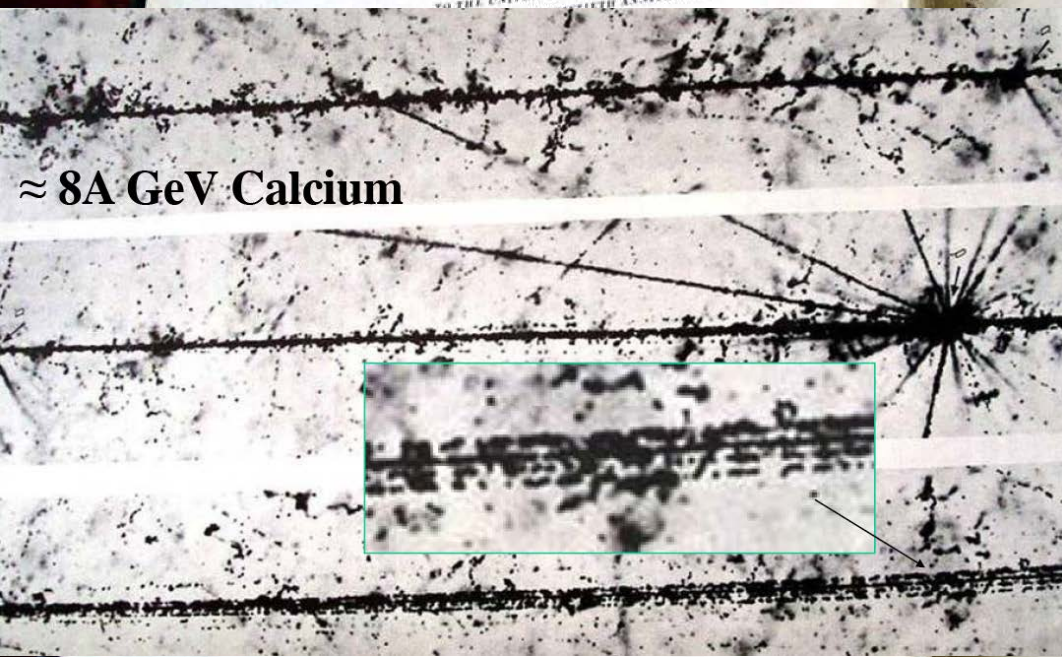
*An account of
The Principal Techniques and Discoveries
illustrated by
An Atlas of Photomicrographs*

BY
C. F. POWELL
P. H. FOWLER and D. H. PERKINS
H. E. WILLS PHYSICAL LABORATORY
UNIVERSITY OF BRISTOL

Объединенный институт
атомной энергии
Библиотека

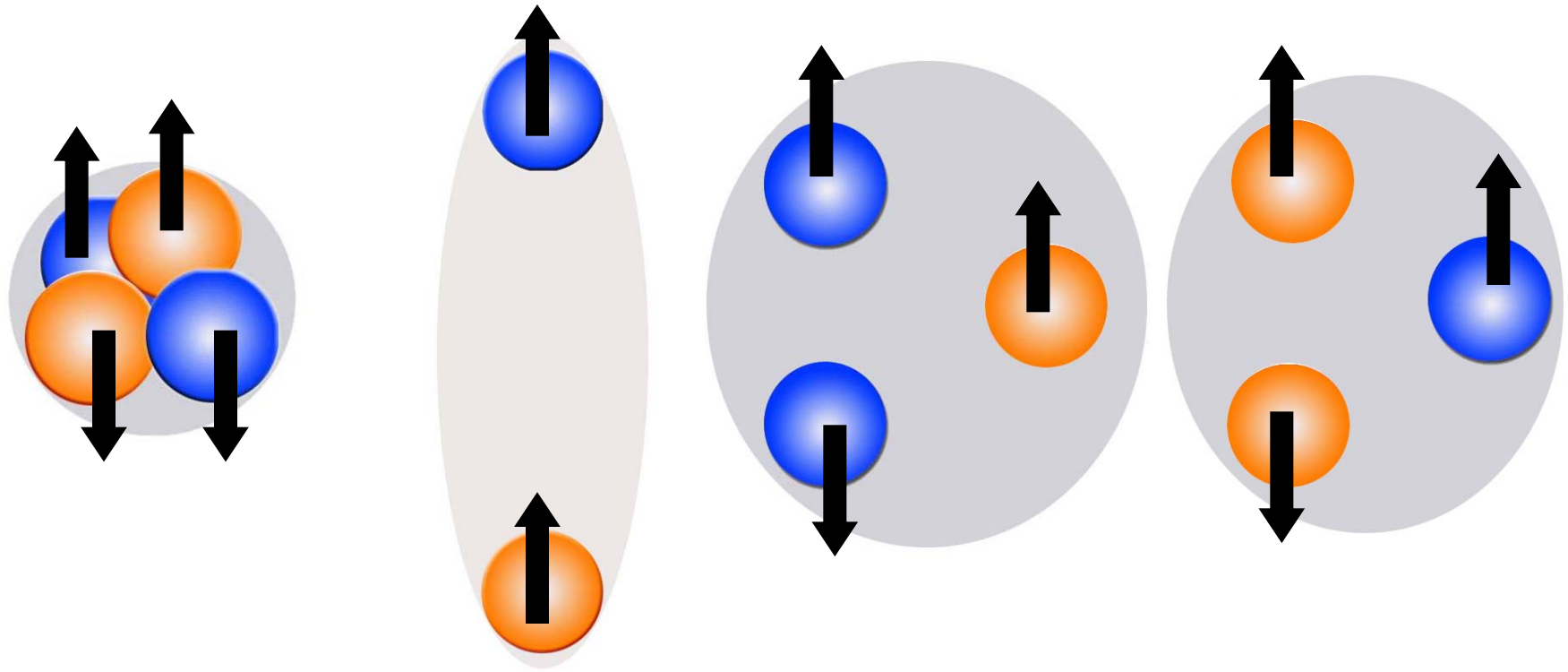


PERGAMON PRESS
LONDON · NEW YORK · PARIS · LOS ANGELES
1959

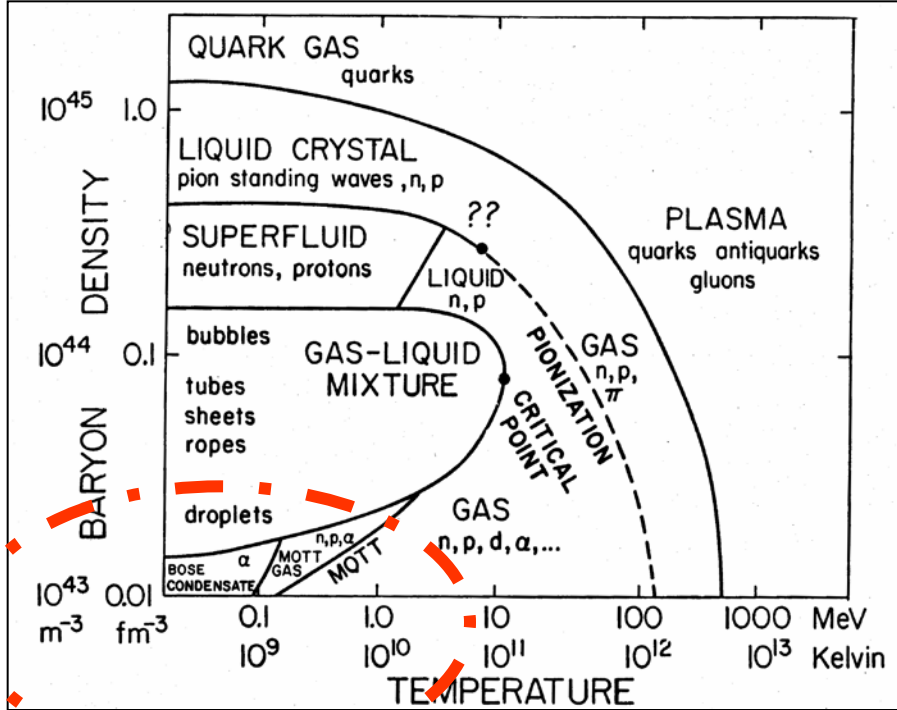


Events of multiple fragmentation of relativistic nuclei were observed as early as the 40s in the NTE exposed to cosmic rays in the stratosphere. Their photographs presented in the classic book by C. H. Powell, P. H. Fowler and D. H. Perkins, among other fundamental observations can serve as a model of clarity in our time. Our research is implemented in keeping with this tradition.

Коллективные степени свободы, в которых группы из нескольких нуклонов ведут себя как составляющие кластеры, являются одним из ключевых аспектов ядерной структуры. Основными «строительными кирпичиками» кластеризации являются легчайшие ядра, не имеющие возбужденных состояний – прежде всего это ядра ^4He (α -частицы), а также дейтроны (d), тритоны (t) и ядра ^3He или *гелионы* (h). Эта особенность отчетливо проявляется в легких ядрах, где число возможных кластерных конфигураций невелико. В кластерной картине легкие ядра представляются как суперпозиции различных конфигураций кластеров и нуклонов. Интерес к таким состояниям над порогами связи связан с предсказанием их свойств, как молекулярно-подобных.



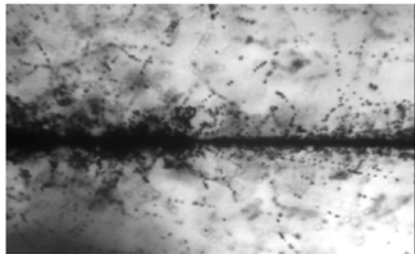
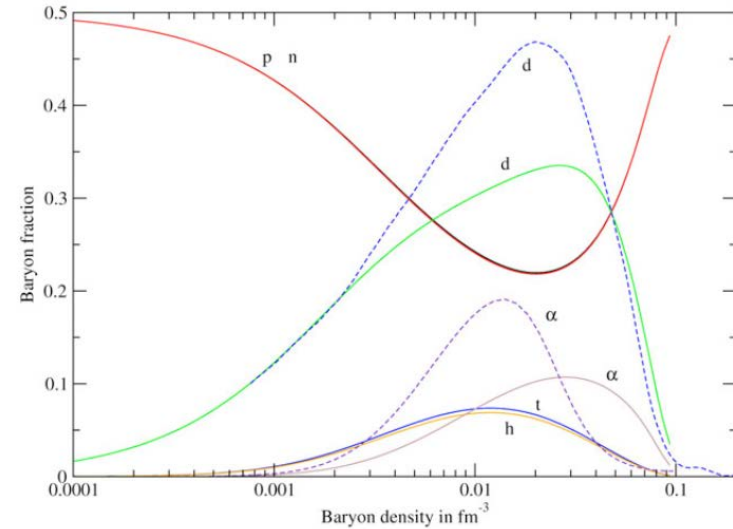
Рассматриваемые в макроскопическом масштабе, когерентные ансамбли кластеров могут играть промежуточную роль в нуклеосинтезе, что придает изучению ядерной кластеризации значение, существенно выходящее за рамки проблем ядерной структуры. На первый взгляд исследования ядерных систем многих тел кажутся невозможными в лабораторных условиях. Тем не менее, они могут быть исследованы непрямым образом в процессах развала ядер при возбуждении несколько выше соответствующего порога.



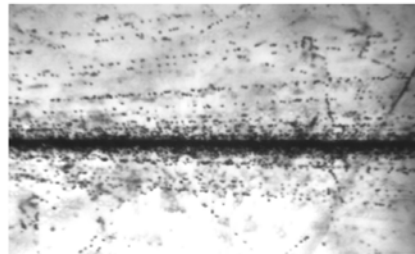
Composition of symmetric nuclear matter

G.Ropke, A.Grigo, K. Sumiyoshi, Hong Shen,
Phys.Part.Nucl.Lett. 2, 275 (2005)

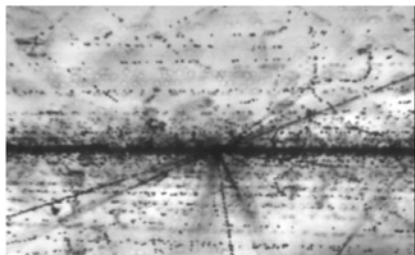
T=10 MeV



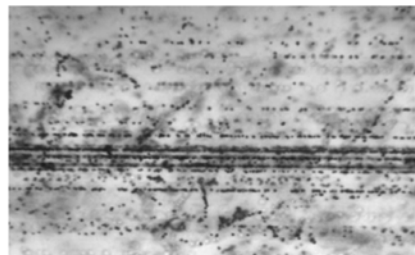
Shot 1



Shot 2



Shot 3



Shot 4

PHYSICAL REVIEW C 72, 048801 (2005)

Multifragmentation reactions and properties of stellar matter at subnuclear densities

A. S. Botvina¹ and I. N. Mishustin^{2,3}

¹Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, RU-117312 Moscow, Russia

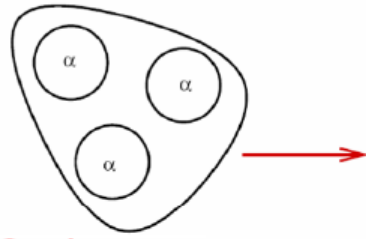
²Frankfurt Institute for Advanced Studies, J.W. Goethe University, D-60438 Frankfurt am Main, Germany

³Kurchatov Institute, Russian Research Center, RU-123182 Moscow, Russia

(Received 20 June 2005; published 24 October 2005)

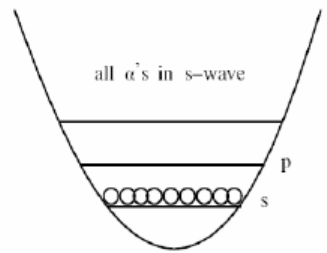
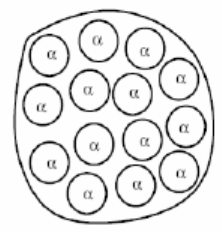
We point out the similarity of thermodynamic conditions reached in nuclear multifragmentation and in supernova explosions. We show that a statistical approach previously applied for nuclear multifragmentation reactions can also be used to describe the electroneutral stellar matter. Then properties of hot unstable nuclei extracted from the analysis of multifragmentation data can be used to determine a realistic nuclear composition of hot supernova matter.

If O_2^+ in ^{12}C dilute α -state

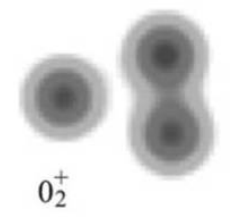
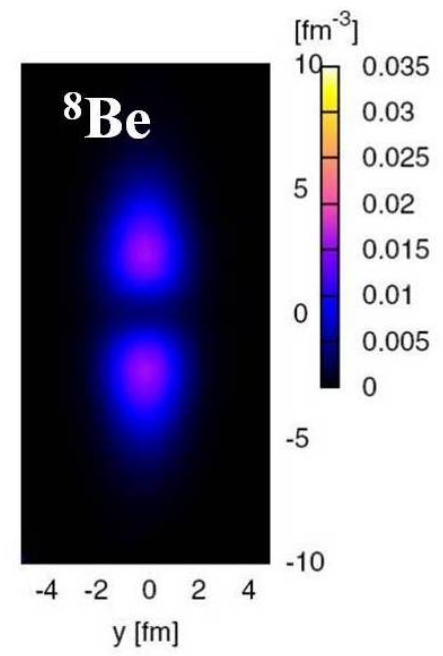


then α -condensate
infinite matter $\rho_{crit} \sim \frac{\rho_0}{3}$

Conjecture: all $n.\alpha$ nuclei possess excited $n\alpha$ condensed state



z [fm]



The Hoyle state

Современный интерес к этой теме мотивирован концепцией α -частичного конденсата Бозе-Эйнштейна]. В качестве наиболее простых форм такого конденсата предложено основное состояние нестабильного ядра 8Be и, вслед за ним, HS. В продолжение ветви 8Be и HS предполагается, что конденсатным 4α -состоянием является 6-е возбужденное состояние 0^+_6 ядра ^{16}O , расположенное на 700 кэВ выше 4α -порога. Тогда распад конденсата мог бы идти в последовательности $^{16}O (0^+_6) \rightarrow ^{12}C (0^+_2) \rightarrow ^8Be (0^+_2) \rightarrow 2\alpha$. Возникает вопрос, а возможно ли существование еще более сложных ядерно-молекулярных систем?

Colloquium: Status of α -particle condensate structure of the Hoyle state

Akihiro Tohsaki

Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

Hisashi Horiuchi

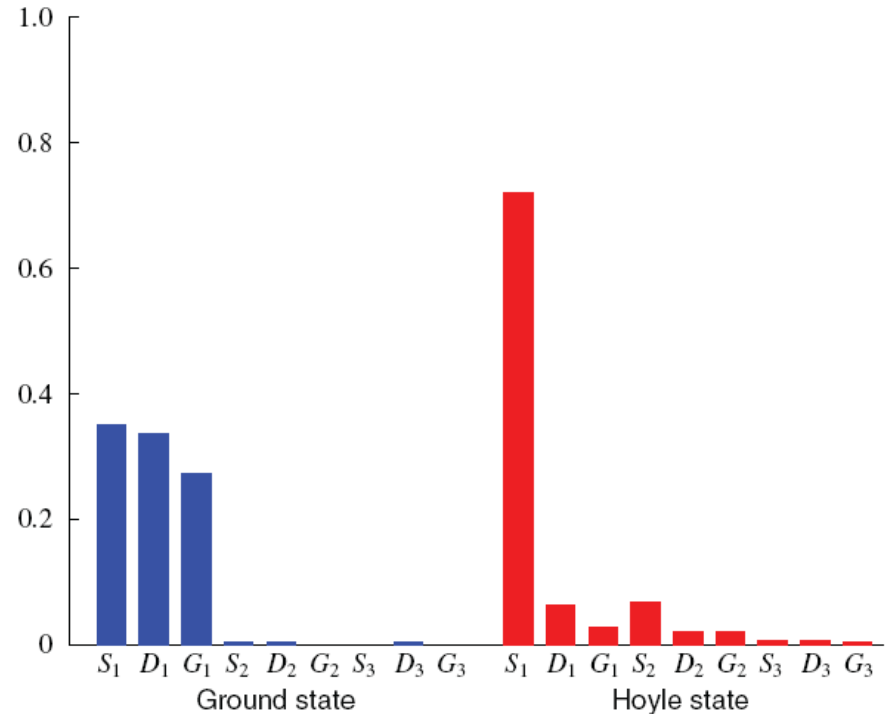
*Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan
and International Institute for Advanced Studies, Kizugawa, Kyoto 619-0225, Japan*

Peter Schuck

*Institut de Physique Nucléaire, IN2P3-CNRS, Université Paris-Sud, F-91406 Orsay Cedex, France,
Université Grenoble-Alpes, LPMCM, BP166, F-38042 Grenoble, France,
CNRS, LPMCM, BP166, F-38042 Grenoble, France*

Gerd Röpke

Institut für Physik, Universität Rostock, Rostock 18051, Germany

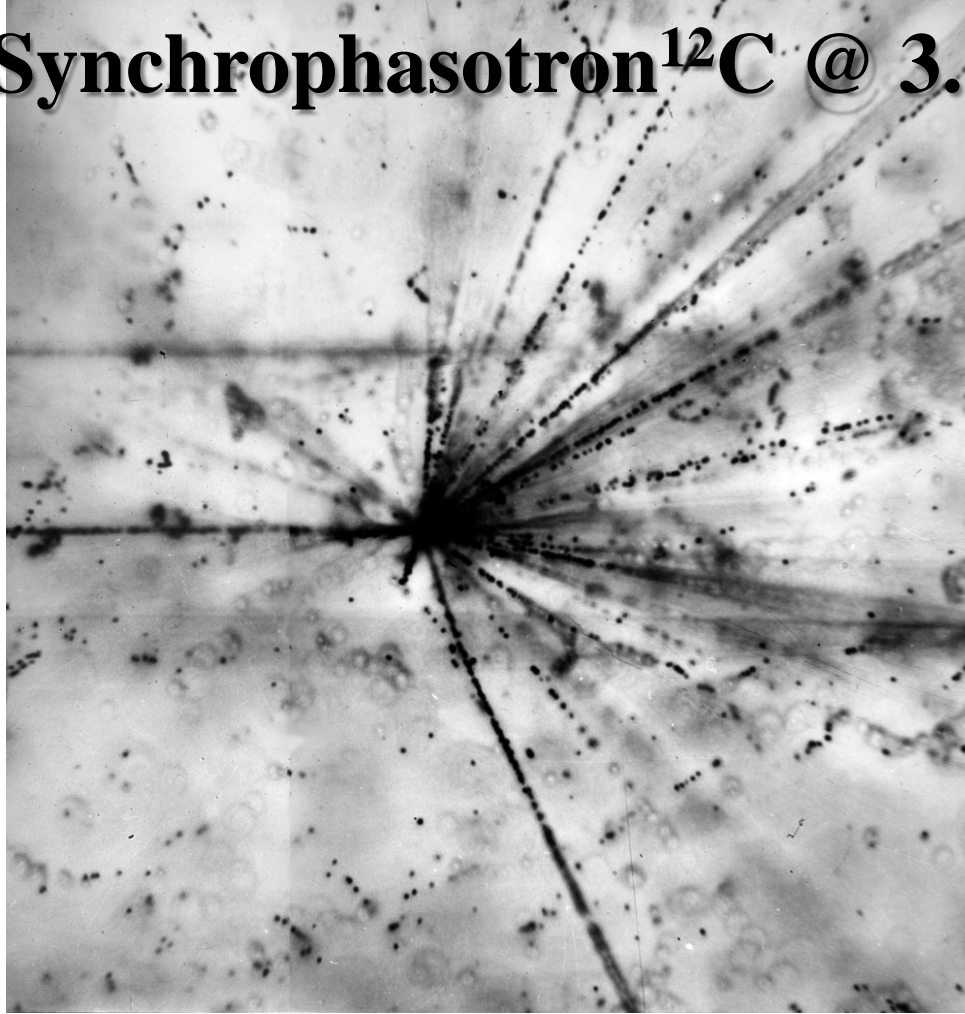


While the size of the individual α -particles remains very close to their free space value ($b \simeq 1.37$ fm), the variationally determined B parameter takes on about three times this value. This entails a quite enhanced value of the rms radius of 3.83 fm of the Hoyle state with respect to the one of the ground state (2.4 fm). This gives a volume (density) of the Hoyle state about a factor 3–4 larger (smaller) than for the ground state. In such a large volume the α 's have space to develop themselves which is not the case in the ground state where they overlap strongly.

Уже два десятилетия развиваются теоретические концепции о разреженной барионной материи, возникающей в результате кластеризации нуклонов в легчайшие ядра в условиях предельно низкой ядерной плотности и температуры. Как аналог атомных квантовых газов рассматривается α -частичный конденсат Бозе-Эйнштейна. Эти разработки выдвигают проблему изучения разнообразных кластерных ансамблей и несвязанных ядер как фундаментальных компонент новых квантовых сред. В астрофизическом масштабе это короткоживущее состояние может служить необходимым этапом на пути синтеза самых тяжелых ядер. Активное развитие теории в этом направлении за последние два десятилетия прослеживается по работам С.Ж. Horowitz, G. Röpke, P. Schuck, A. S. Botvina, I. N. Mishustin и их соавторов. Кластеризация ядер традиционно рассматривается как прерогатива физики ядерных реакций низких энергий. Предназначением проекта БЕККЕРЕЛЬ является применение потенциала одного из разделов физики высоких энергий – релятивистской ядерной физики – для развития концепций ядерной кластеризации.

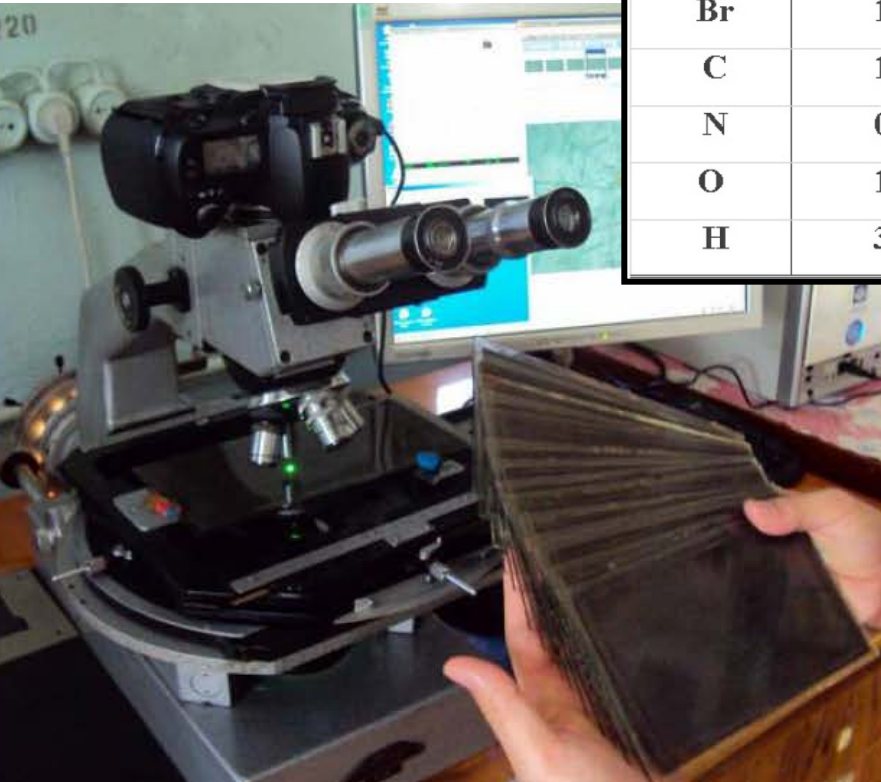
Явление периферической диссоциации релятивистских ядер имеет скрытый потенциал «лаборатории» для проверки современных концепций ядерной физики и ядерной астрофизики. В диссоциации тяжелых ядер может воссоздаваться ядерная материя, сходная по термодинамике и изотопическому составу с взрывами сверхновых. Пучки ядер, формируемые для коллайдера NICA, откроют перспективу систематических исследований в этом направлении методом ядерной эмульсии (ЯЭ). Проект направлен на выявление состава фрагментных ансамблей, а также вклада нейтронов при фрагментации тяжелых ядер. Благодаря уникальному разрешению и чувствительности метода ЯЭ, будут обеспечены наиболее точные измерения углов испускания релятивистских изотопов H и He, идентифицируемых методом многократного рассеяния, а также нейтронов, идентифицируемых по вторичным вершинам. Будучи получены в обратной кинематике, данные о выходах нейтронов послужат ориентиром при проектировании гибридных систем «реактор + ускоритель».

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

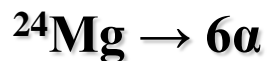


Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ опирается на культуру применения ЯЭ в проблемах физики высоких энергий, развивавшуюся с начала 50-х гг. и не утратившую ценность поныне. Облучения ЯЭ во впервые создававшихся пучках релятивистских ядер начались в 70-х гг. на синхрофазотроне ОИЯИ и Бевалаке (LBL). В 90-е гг. подобные облучения продолжились на BNL AGS и CERN SPS. В духе традиций, возникших еще в пионерский период исследования космических лучей, стопки слоев ЯЭ, проявившихся в ЛФВЭ ОИЯИ, передавались во многие научные центры и университеты, способствуя широкому успеху нового направления. Полнота наблюдения в ЯЭ следов заряженных частиц легла в основу классификации ядро-ядерных столкновений. Особое внимание привлекли наиболее разрушительные соударения, как отвечающие наибольшей концентрации материи и энергии. Последующее развитие в этом направлении широко известно. Вместе с тем результаты, полученные в 70–90-х гг. методом ЯЭ, как и сами облученные слои, и соответствующие файлы данных, сохраняют уникальность в аспекте фрагментации налетающих ядер. В максимально доступной степени это научное наследие сохранено и доступно в ЛФВЭ. На сайте проекта БЕККЕРЕЛЬ накапливается коллекция макро-видеозаписей изучавшихся периферических взаимодействий релятивистских ядер.

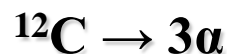
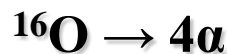
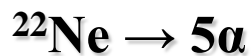
BR-2	10^{22} cm^{-3}
Ag	1.0
Br	1.0
C	1.4
N	0.4
O	1.1
H	3.0

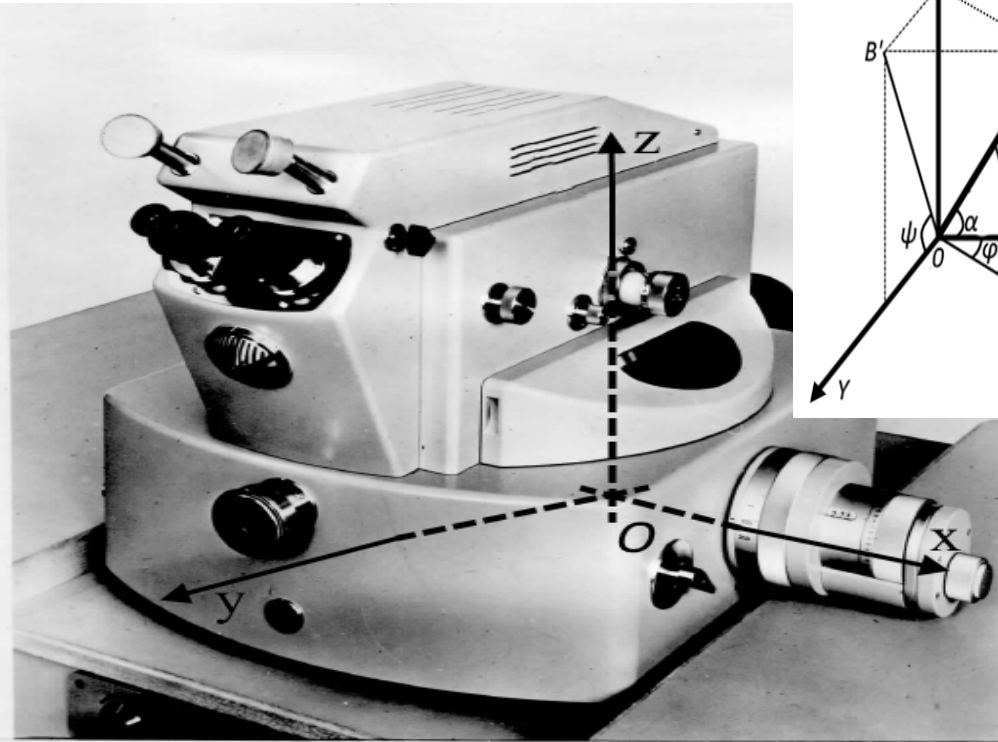


The foundations of required methods of measurements on microscopes in exposure NTE layers were laid at the beginning of studies on the physics of cosmic rays and, then, used widely when beams of relativistic nuclei became available. For these purposes three microscopes KSM-1 manufactured by Carl Zeiss (Jena) about half of century ago and still functioning well are applied in JINR. Each microscope is equipped with apochromatic and achromatic lenses providing an increase of 15 and 50x, two eyepieces 12.5x and a tube lens 2x which together give an image magnification 375-1250x. The maximum error due to manufacturing tolerances does not exceed $0.05 \mu\text{m}$.



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.





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

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

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

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

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

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

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

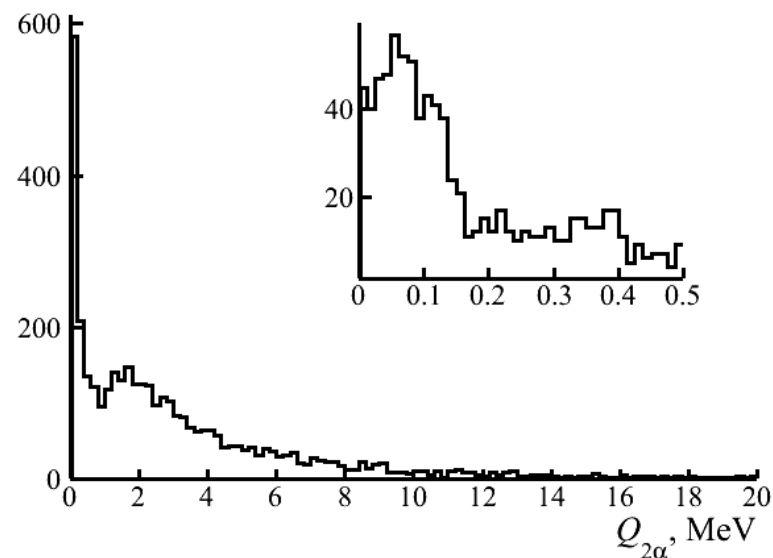
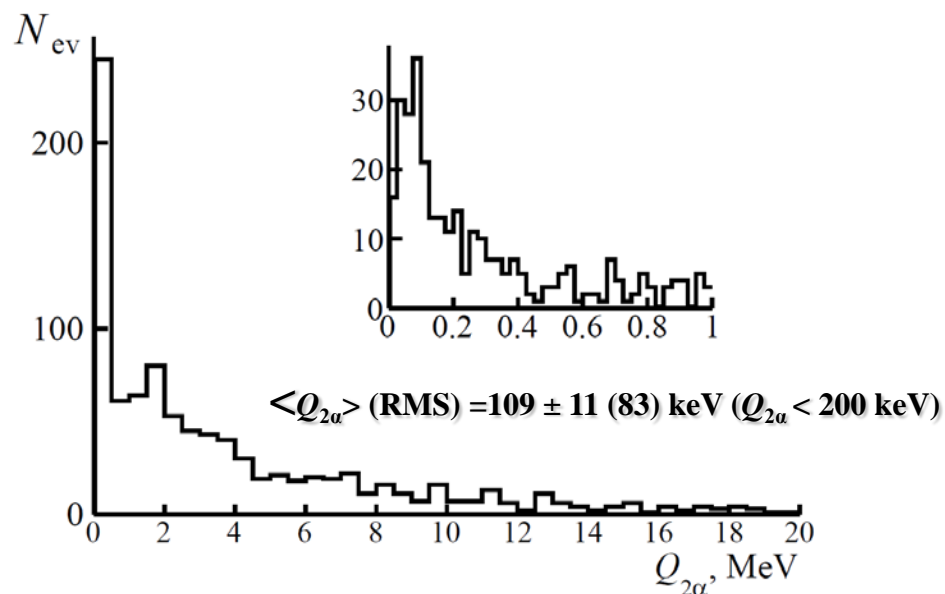
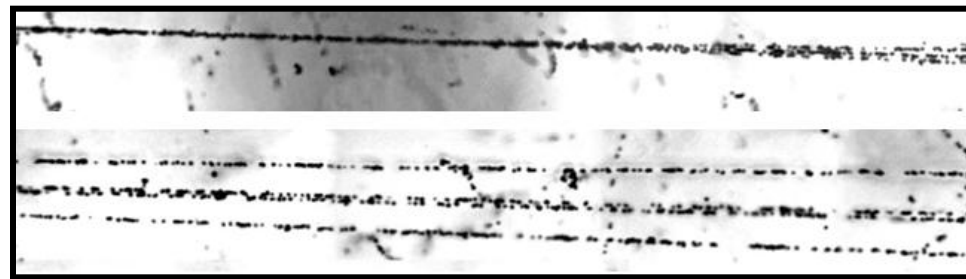
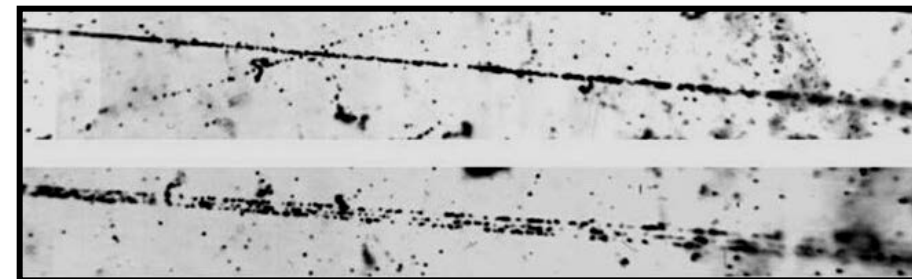
$$Q_{2\alpha} = \sqrt{2 \cdot [m_\alpha^2 + E_\alpha^2 - \vec{P}_{\alpha 1} \cdot \vec{P}_{\alpha 2}]} - 2 \cdot m_\alpha$$

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

Relativistic fragments are concentrated in the cone $\sin \theta_{fr} = p_{fr}/p_0$, where $p_{fr} = 0.2 \text{ GeV}/c$ is the measure of the nucleon Fermi momentum in the projectile nucleus, and p_0 is its momentum per nucleon. The invariant mass of the system of relativistic fragments is defined as the sum of all products of 4-momenta $P_{i,k}$ of the fragments $M^{*2} = \sum (P_i \cdot P_k)$. Subtracting the mass of the initial nucleus or the sum of the fragments $Q = M^* - M$ is a matter of convenience of presentation. The components $P_{i,k}$ are determined in the approximation of the p_0 conservation.

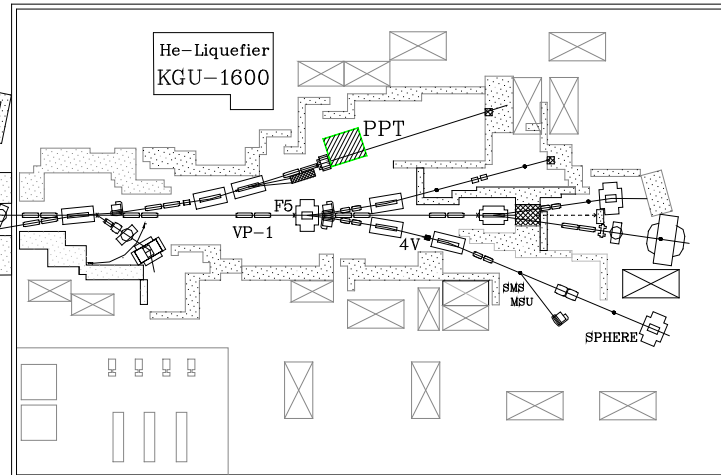
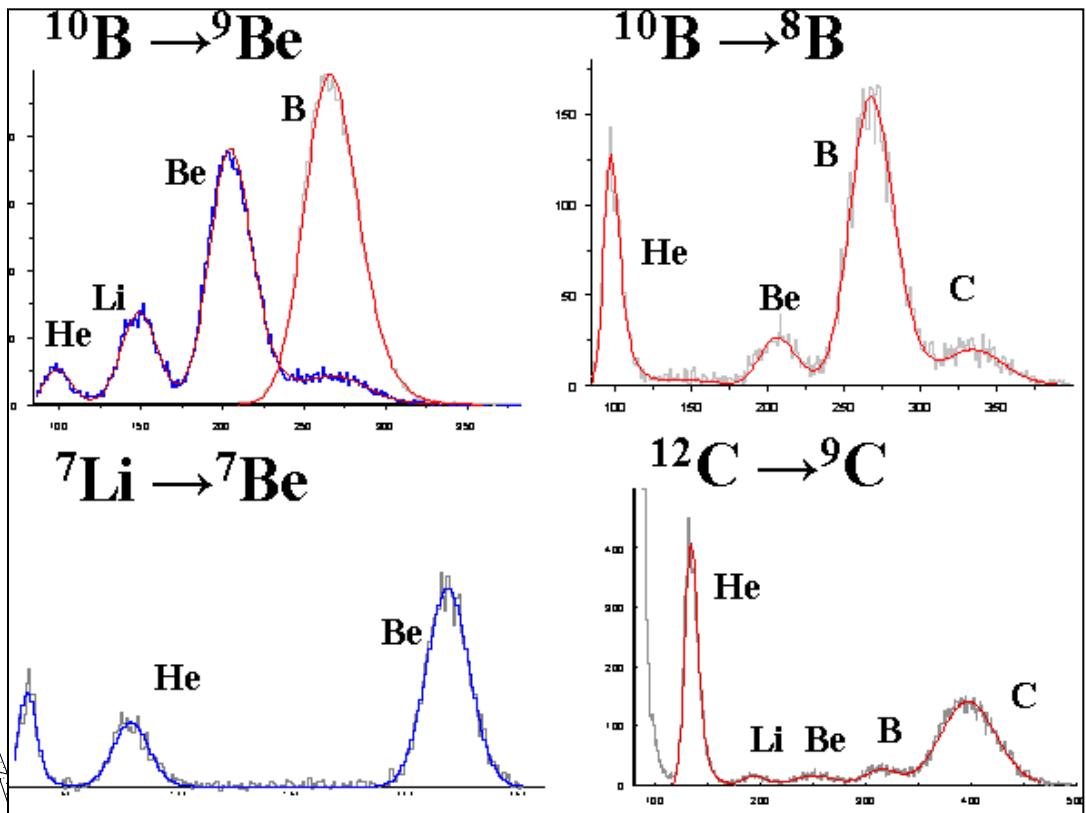
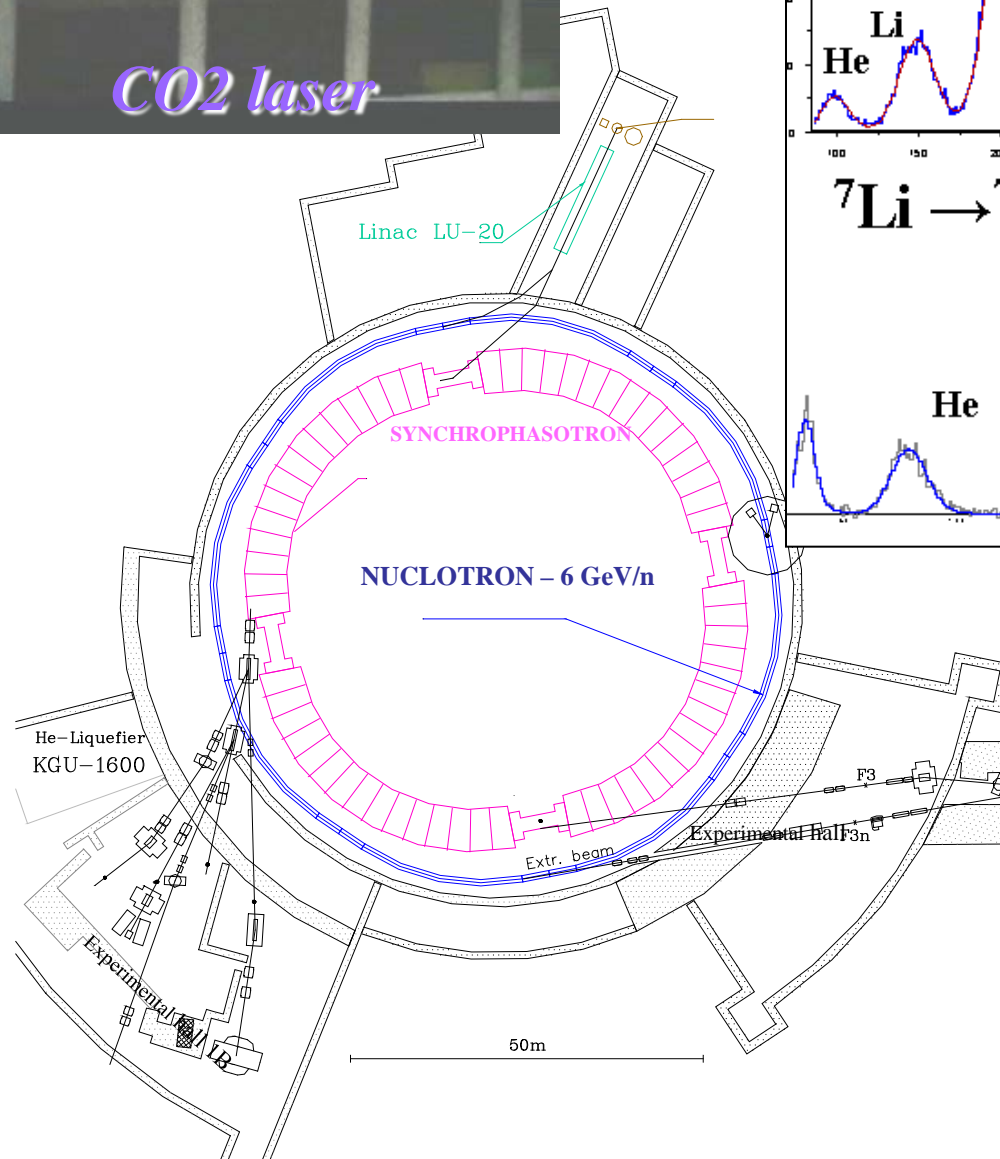
316 “white” stars $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$

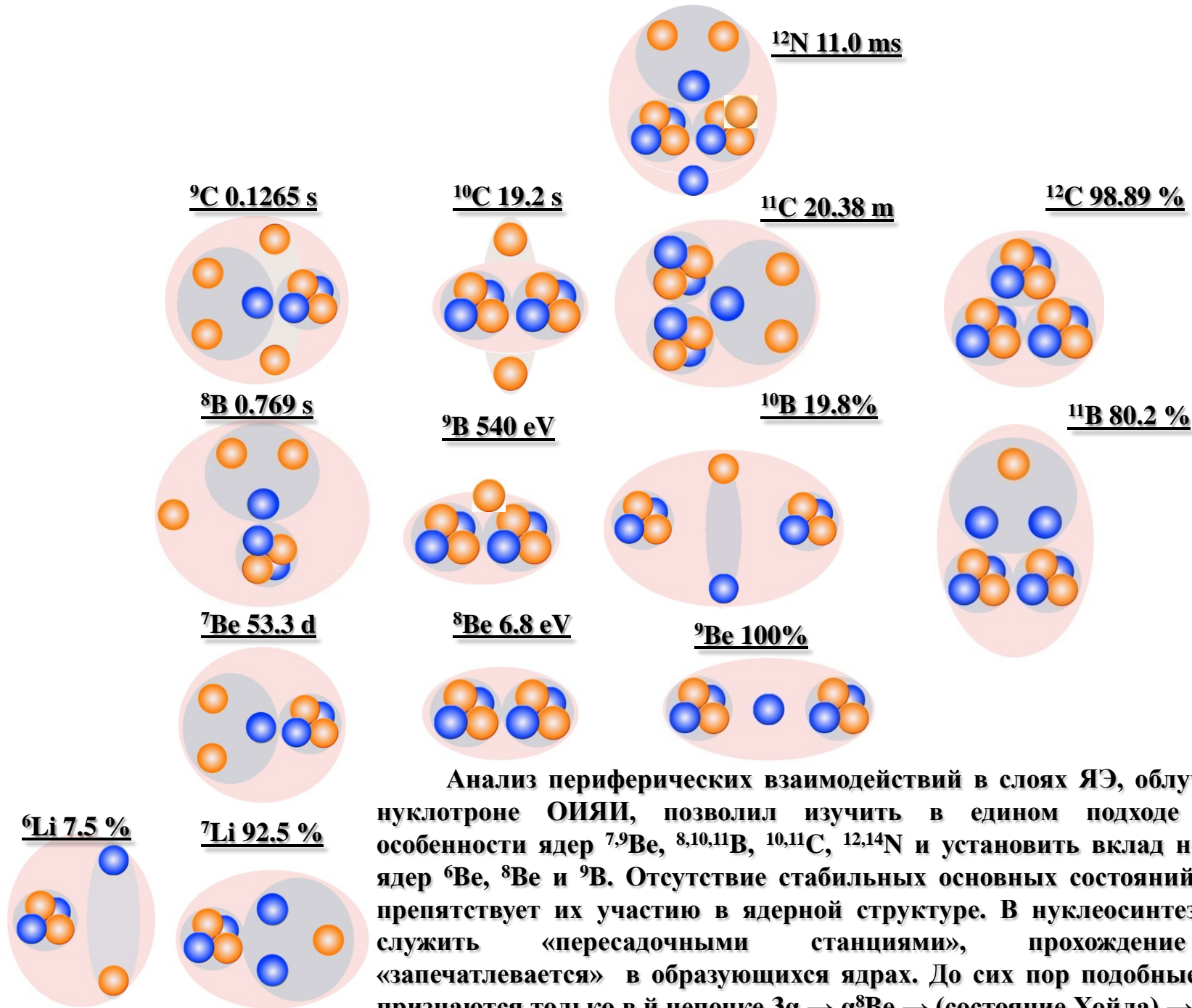
641 “white” stars $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$



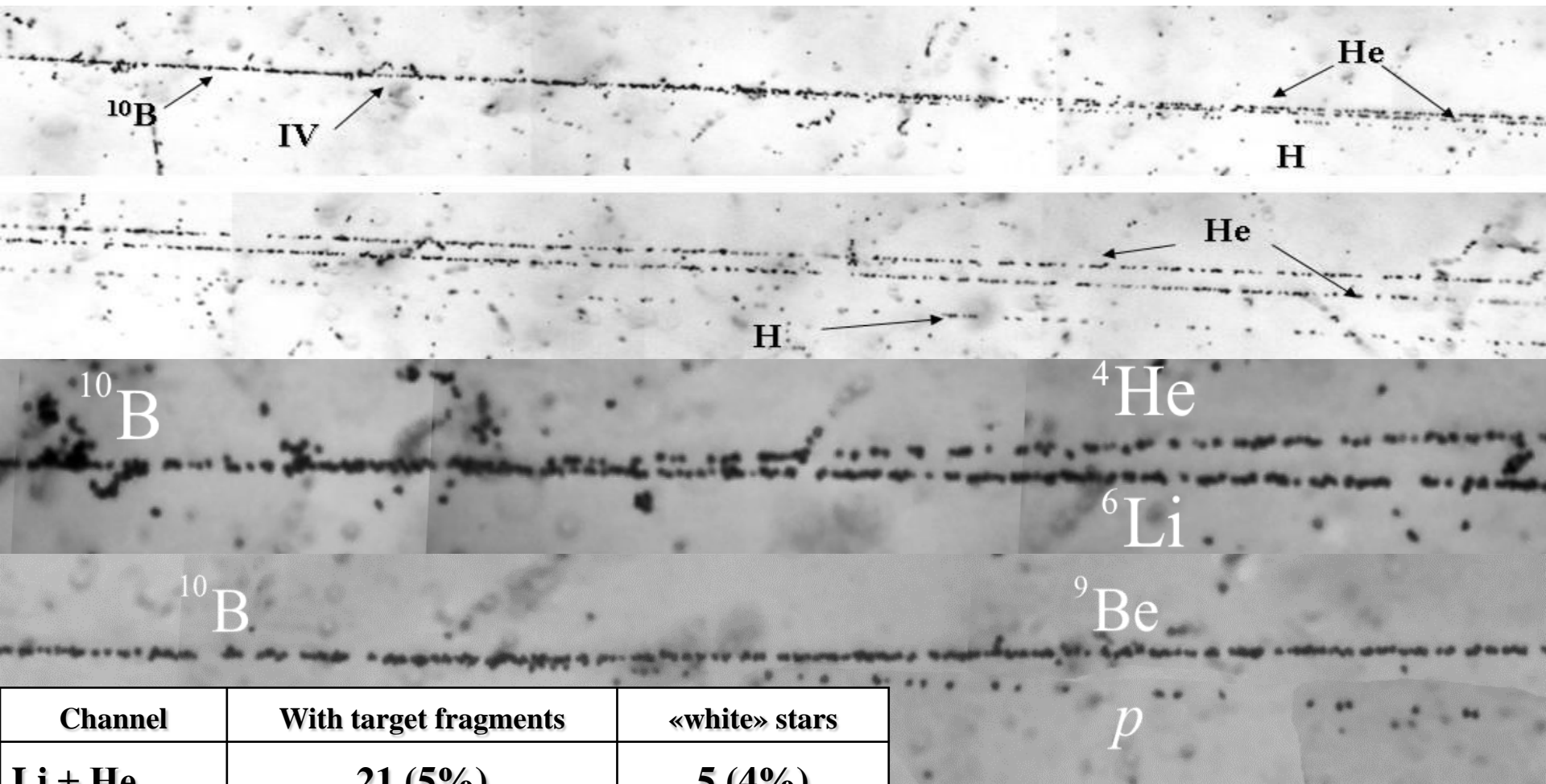
For the ^{12}C nucleus at an energy of 3.65 A GeV there are measurements of emission angles of α -particles made in the groups of G. M. Chernov (Tashkent) at 72 and A. Sh. Gaitinov (Alma-Ata) in 114 “white” stars $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$. The left figure shows the distribution over the invariant mass of α -pairs $Q_{2\alpha}$. In the $Q_{2\alpha} < 0.2$ MeV region, the contribution of the ^8Be decays is $17 \pm 1\%$.

The distribution $Q_{2\alpha}$ for all 2α combinations in 641 “white” stars $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ presented in the right figure. As in the case $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$, for $Q_{2\alpha} < 0.2$ MeV there is a contribution of ^8Be decays which manifests itself in $15 \pm 1\%$ of events.

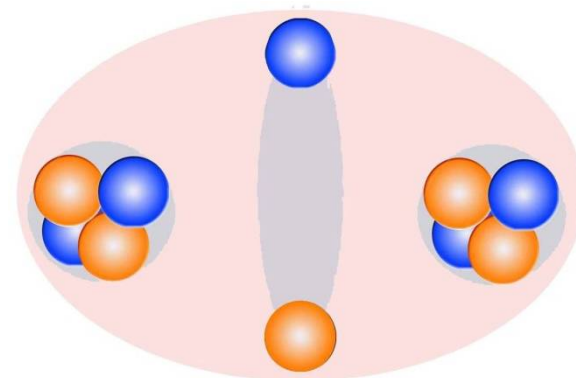


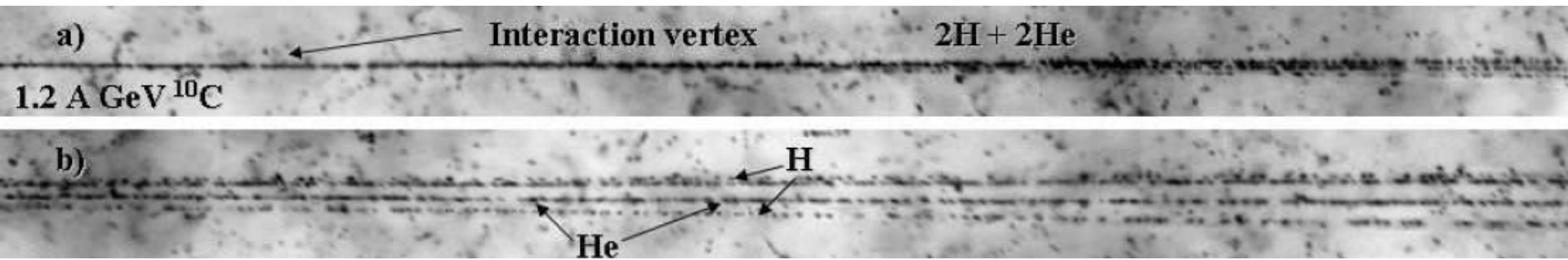


Анализ периферических взаимодействий в слоях ЯЭ, облучавшихся на нуклотроне ОИЯИ, позволил изучить в едином подходе кластерные особенности ядер $^7,9\text{Be}$, $^{8,10,11}\text{B}$, $^{10,11}\text{C}$, $^{12,14}\text{N}$ и установить вклад нестабильных ядер ^6Be , ^8Be и ^9B . Отсутствие стабильных основных состояний ^8Be и ^9B не препятствует их участию в ядерной структуре. В нуклеосинтезе они могут служить «пересадочными станциями», прохождение которых «запечатлевается» в образующихся ядрах. До сих пор подобные участники признаются только в й цепочке $3\alpha \rightarrow \alpha^8\text{Be} \rightarrow (\text{состояние Хойла}) \rightarrow ^{12}\text{C}$.



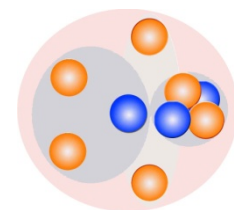
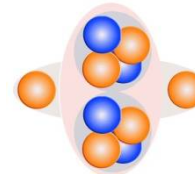
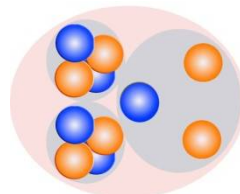
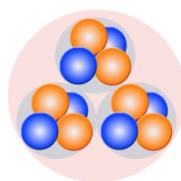
Channel	With target fragments	«white» stars
Li + He	21 (5%)	5 (4%)
Li + 2H	32 (8%)	5 (4%)
He + 3H	120 (32%)	18 (13%)
2He + H	182 (48%)	103 (76%)
5H	24 (6%)	2 (1%)
Be + H	1 (< 1%)	2 (1%)

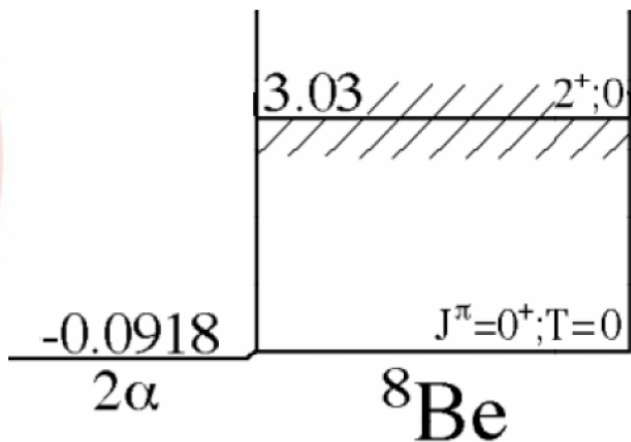
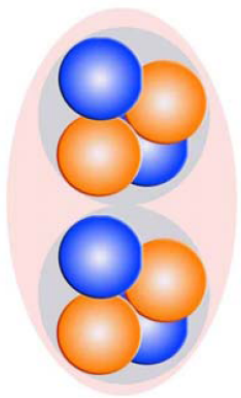




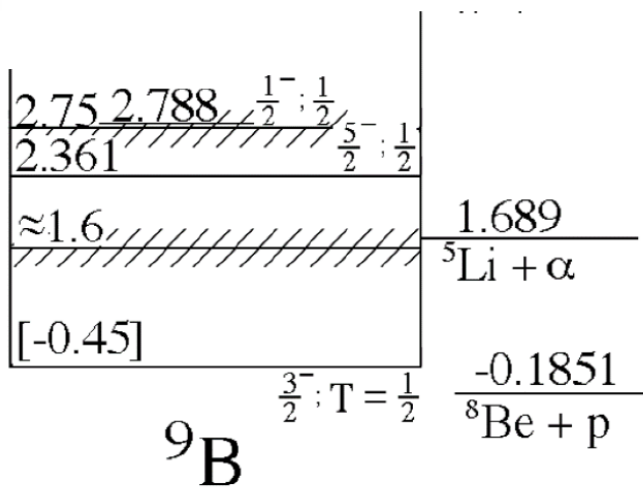
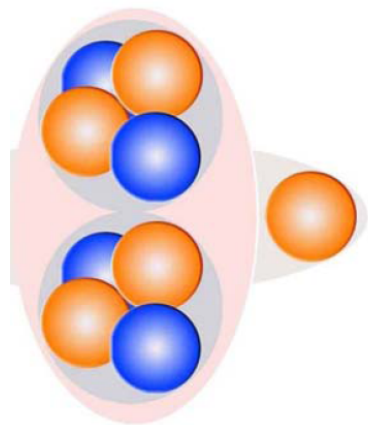
Charge topology of “white” stars

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 %)



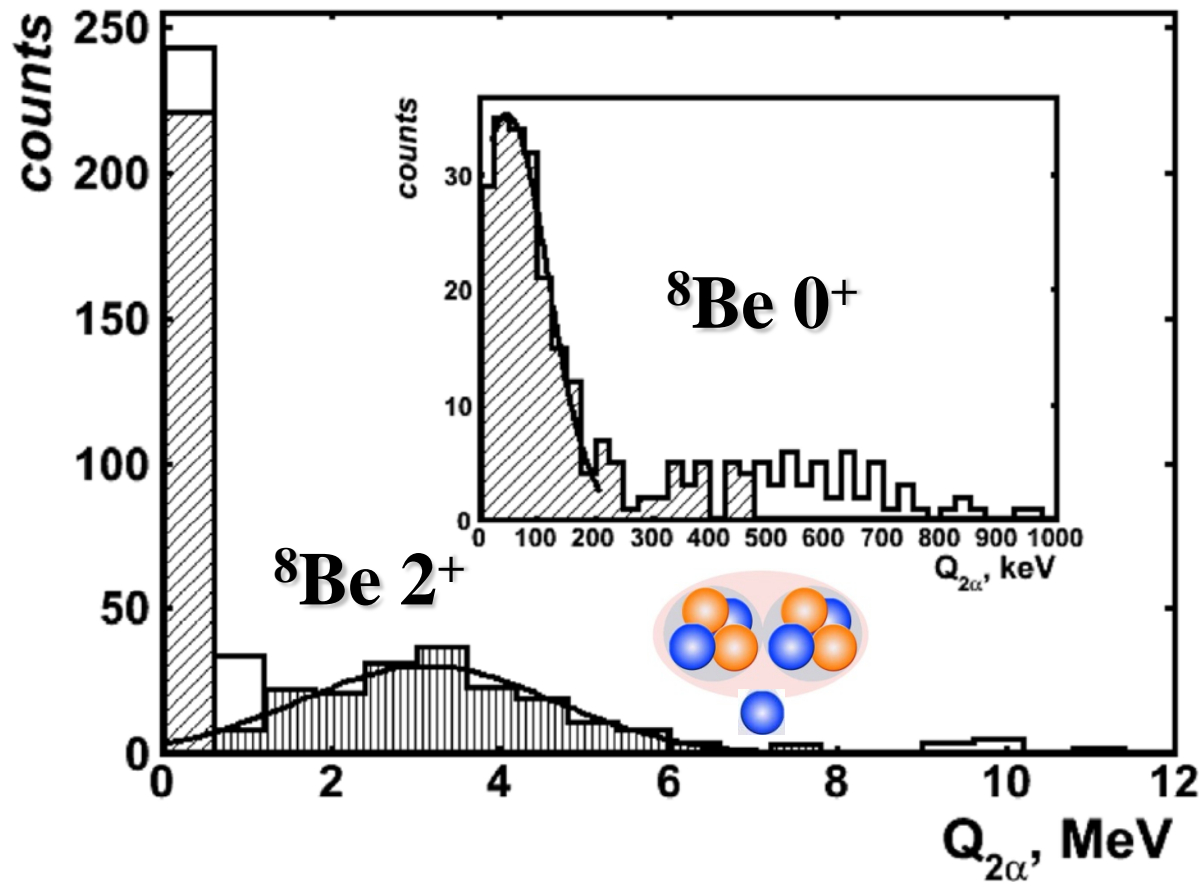


E_x (MeV \pm keV)	$J^\pi; T$	Γ_{cm} (keV)	Decay
g.s.	$0^+; 0$	$5.57 \pm 0.25 \text{ eV}^i$	α
3.03 ± 10^i	$2^+; 0$	1513 ± 15^i	α
ij 11.35 ± 150^i	2^+ $4^+; 0$	$\approx 3500^b$	α

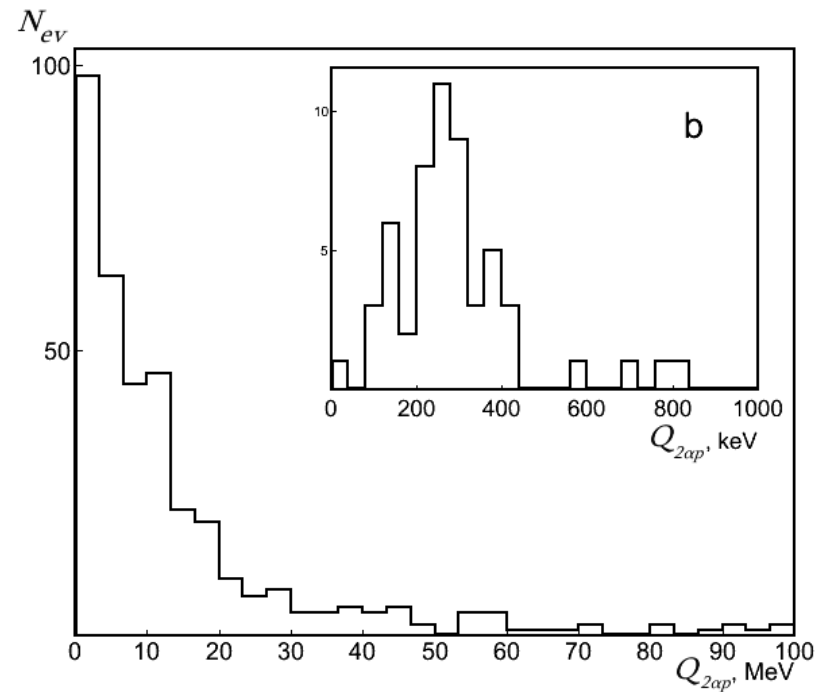
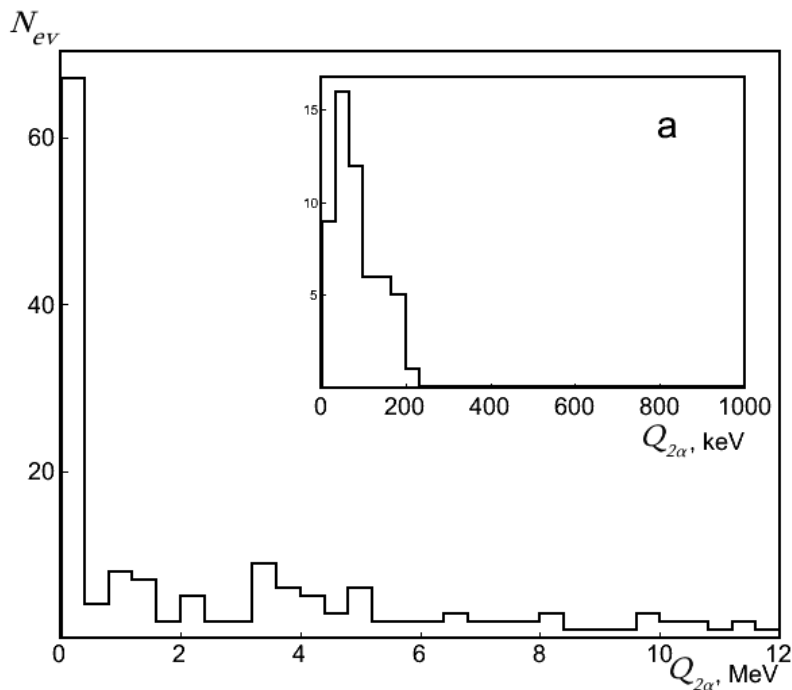
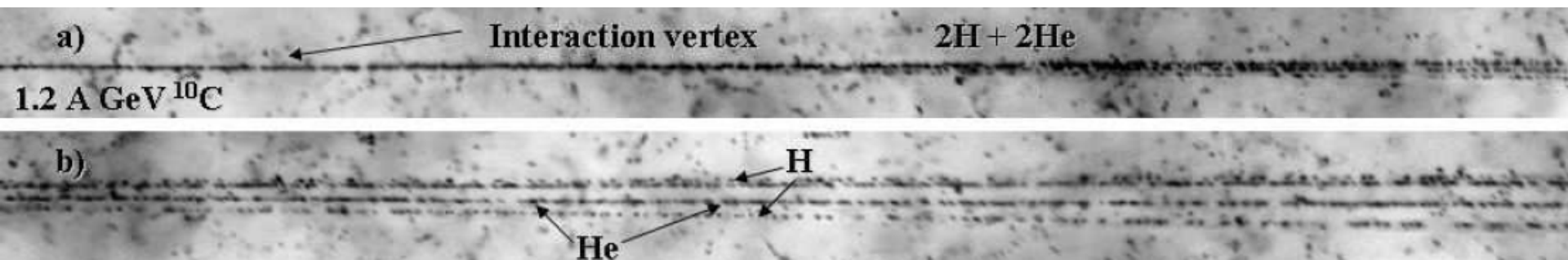


E_x^a (MeV \pm keV)	$J^\pi; T$	$\Gamma_{\text{c.m.}}$ (keV)	Decay
g.s.	$\frac{3^-; \frac{1}{2}}$	0.54 ± 0.21	p
$\approx 1.6^b$			p, (α)
2.361 ± 5	$\frac{5^-; \frac{1}{2}}$	81 ± 5	p, α
2.75 ± 300^c	$\frac{1^-; \frac{1}{2}}$	3130 ± 200	p
2.788 ± 30	$\frac{5^+; \frac{1}{2}}$	550 ± 40	p, α
4.3 ± 200^d		1600 ± 200	
6.97 ± 60	$\frac{7^-; \frac{1}{2}}$	2000 ± 200	p
11.65 ± 60^e	$(\frac{7}{2})^-; \frac{1}{2}$	800 ± 50	n

The secondary ${}^9\text{Be}$ beam was obtained by fragmentation of accelerated ${}^{10}\text{B}$ nuclei. When scanning the exposed emulsion 500 events ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ in a fragmentation cone of 0.1 rad have been found. About 81% α -pairs form roughly equal groups on $\Theta_{2\alpha}$: “narrow” ($0 < \Theta_n < 10.5$ mrad) and “wide” ($15.0 < \Theta_w < 45.0$ mrad) ones. The Θ_n pairs are consistent with ${}^8\text{Be}$ decays from the ground state 0^+ , and pairs Θ_w - from the first excited state 2^+ . The Θ_n and Θ_w fractions are equal to 0.56 ± 0.04 and 0.44 ± 0.04 . These values are well corresponding to the weights of the ${}^8\text{Be}$ 0^+ and 2^+ states $\omega_{0^+} = 0.54$ and $\omega_{2^+} = 0.47$ in the two-body model $n - {}^8\text{Be}$, used to calculate the magnetic moment of the ${}^9\text{Be}$ nucleus.

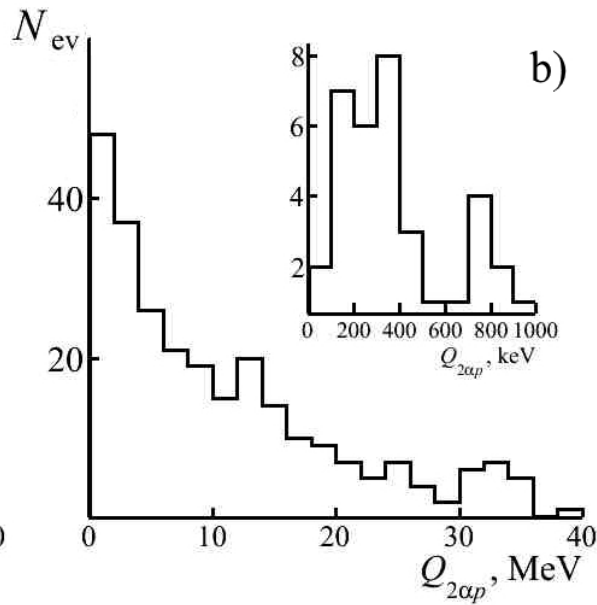
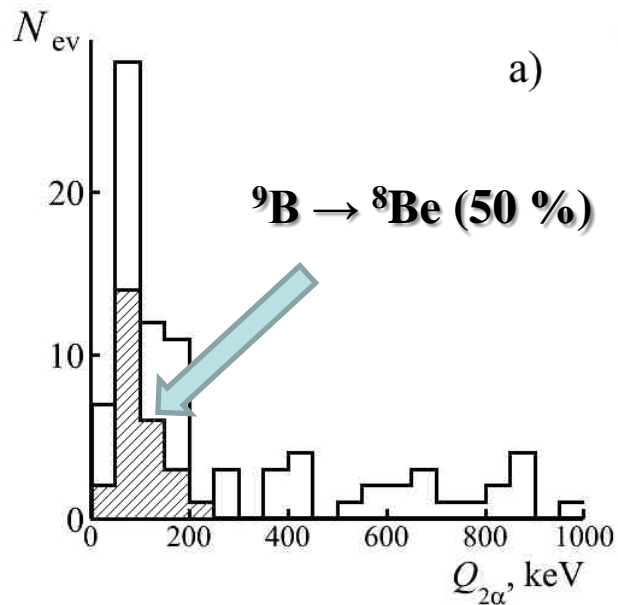


${}^9\text{Be}$
 $J^\pi = 3/2^-$



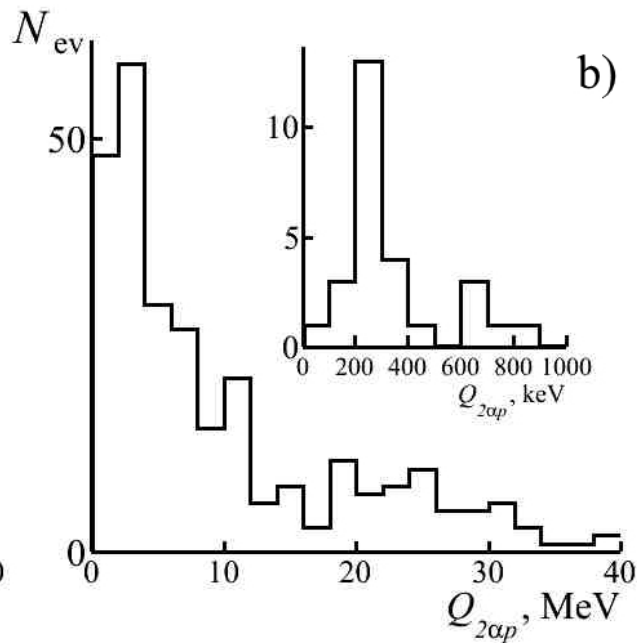
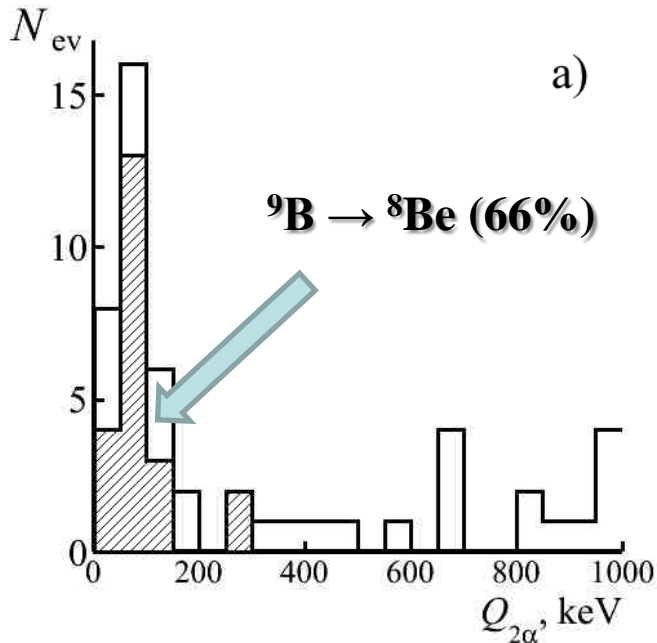
The distribution of 68 “white” stars $^{10}\text{C} \rightarrow 2\alpha + 2p$ over $Q_{2\alpha}$ and Q_{2ap} is shown in Figures *a* and *b*. The distribution $Q_{2\alpha}$ with an average $\langle Q_{2\alpha} \rangle = (63 \pm 30)$ keV allows concluding that the ^8Be formation is observed. In turn, the distribution Q_{2ap} indicates that the dissociation $^{10}\text{C} \rightarrow 2\alpha + 2p$ is accompanied by the ^9B formation. The average value $\langle Q_{2ap} \rangle = (254 \pm 18)$ keV corresponds to decay $^9\text{B} \rightarrow ^8\text{Be} + p$. A complete correspondence $Q_{2\alpha}$ to Q_{2ap} points to the cascade $^{10}\text{C} \rightarrow ^9\text{B} \rightarrow ^8\text{Be}$. The ^9B nucleus manifests itself with a probability of 30 ± 4 % in the ^{10}C structure.

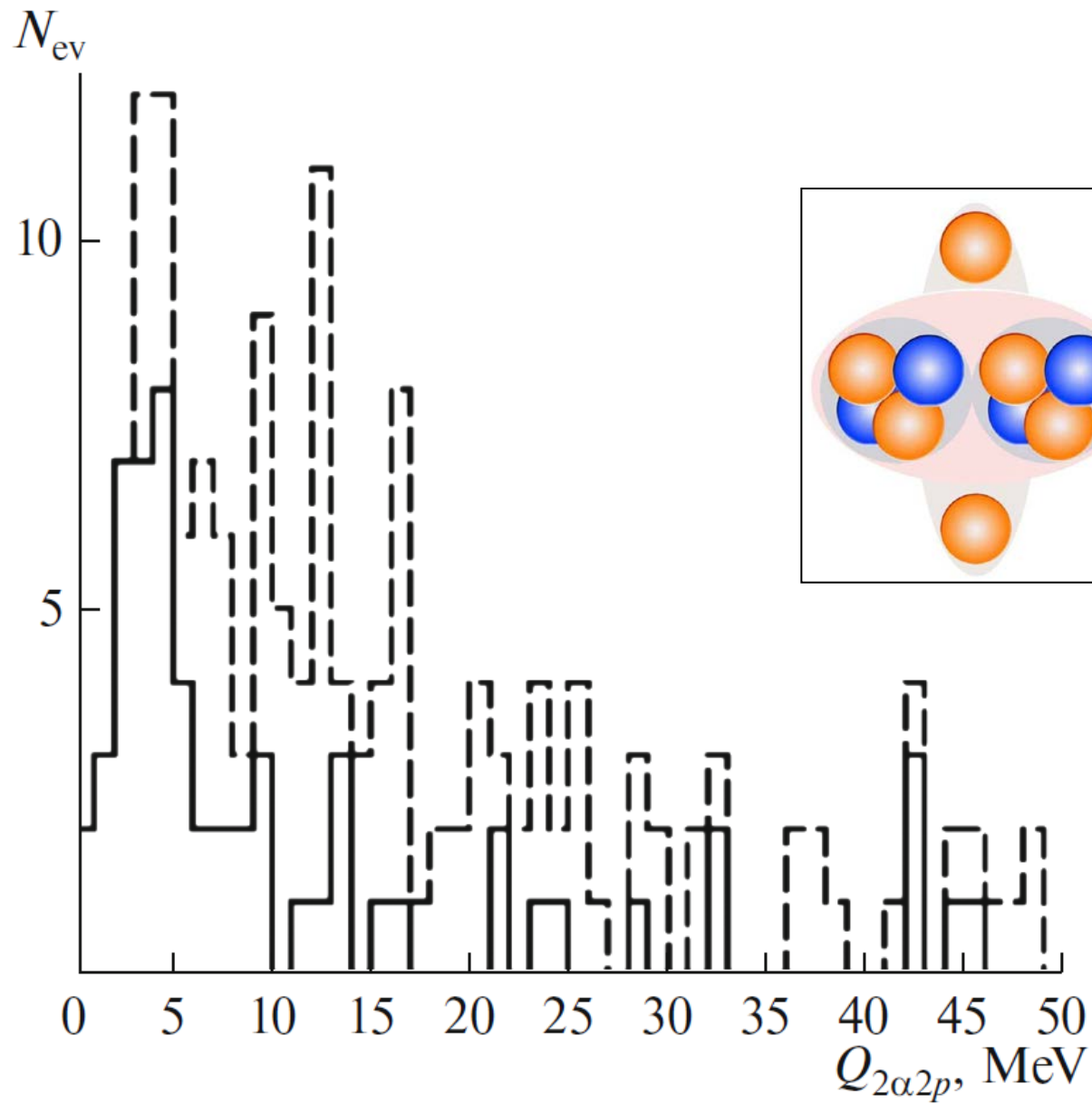
“White” stars $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ @ 1.6 A GeV/c



$$\frac{^{9}\text{B} + n}{^{9}\text{Be} + p} \approx 6$$

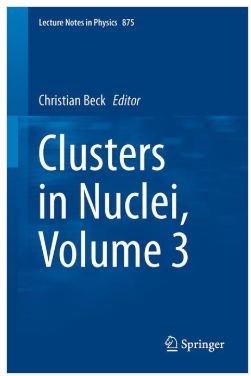
“White” stars $^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$ @ 2.0 A GeV/c





Возможно рассмотрение и роли более сложных ядерно-молекулярных систем. Например, в когерентной диссоциации ядра ^{10}C получено указание на резонанс в канале ^9Br при 4 МэВ. Его изучение продолжается на 4-кратно возросшей статистике.

Return to Bookmetrix summary



ABOUT THIS PAGE

SHARE

ABOUT AFFILIATION

AUTHORS P. I. Zarubin
 DOI 10.1007/978-3-319-01077-9_3

SHOW ACTIVITY FOR:

SUMMARY Combined activity for all chapters 51 0 23 4.19K 0

CHAPTER 1 Faddeev Equation Approach for Three-Cluster Nuclear Reactions 2 0 2 681

CHAPTER 2 Electromagnetic Transitions as a Probe of Nuclear Clustering 3 0 2 667

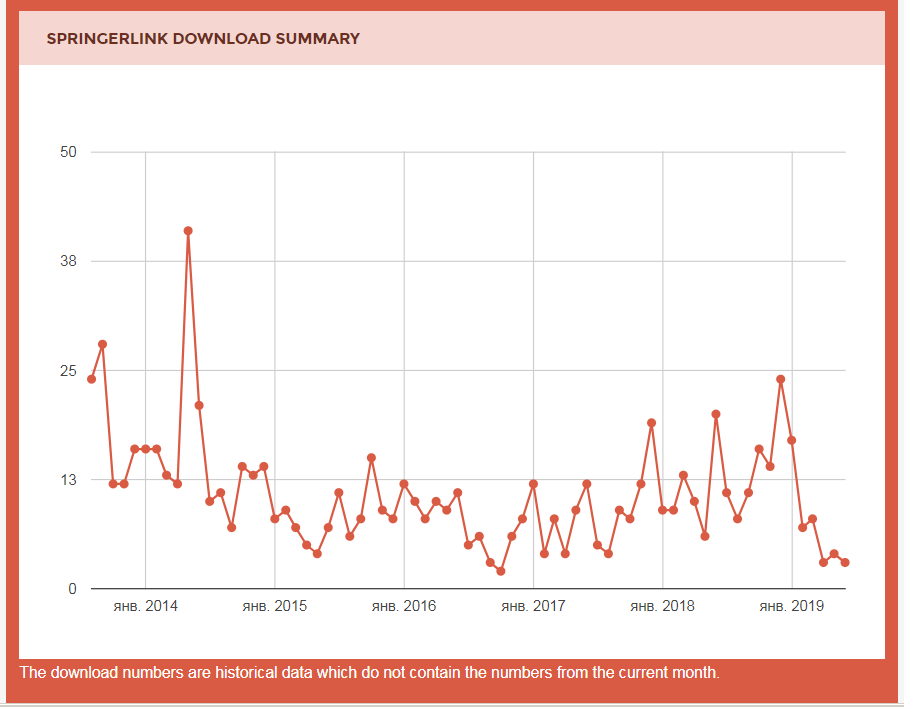
CHAPTER 3 “Tomography” of the Cluster Structure of Light Nuclei via Relativistic Dissociation 14 0 2 784

CHAPTER 4 From Light to Hyper-heavy Molecules and Neutron-Star Crusts in a Dynamical Mean-Field Approach 7 0 8 708

CHAPTER 5 Covalent Binding on the Femtometer Scale: Nuclear Molecules 4 0 2 657

CHAPTER 6 Clusterization in Ternary Fission 14 0 0 691

CITATIONS 14 MENTIONS 0 READERS 2 DOWNLOADS 784



Устойчивый интерес к теме можно проследить по числу загрузок обзора, суммировавшего результаты первого этапа эксперимента. По-существу, эксперимент БЕККЕРЕЛЬ, опираясь на фрагментацию релятивистских ядер в ЯЭ, удерживает «мировую монополию» в части детальной информации о многочастичных ядерных ансамблях. С 2016 года под пристальным вниманием находится возможность наблюдения состояния Хойла (HS) в релятивистской диссоциации легких ядер.

Главное затруднение, уже в значительной степени преодоленное, состояло в том, что производство слоев ЯЭ, в течение четырех десятилетий ведшееся в Москве, прервалось в середине 2000 гг. Тем самым история метода ЯЭ казалась завершенной. Однако, отвечая на запрос эксперимента БЕККЕРЕЛЬ, компания "Славич" (г. Переславль Залесский) возобновила с 2012 г. производство слоев ЯЭ толщиной от 50 до 200 мкм на стеклянной основе. Образцы ЯЭ использовались в экспериментах, в которых имелось все разнообразие следов ионизации – от медленных тяжелых ионов до релятивистских частиц. В настоящее время восстанавливается производство слоев ЯЭ толщиной 500 мкм без подложки.

Таким образом, применение ЯЭ не остановилось. Напротив, был проведен исследовательский цикл по структуре целого семейства легких ядер, осовременена технология, методы измерений и подготовлены молодые исследователи. Развитый подход к исследованию множественных ядерных ансамблей имеет исследовательскую перспективу в отношении легких и средних ядер.

Качество ЯЭ, произведенной цехом МИКРОН ОАО «Компания Славич» (г. Переславль Залесский) испытывалось в серии экспериментов, проведенных с 2012 г.

При измерениях распадов ядер ^8He , имплантированных в ЯЭ, были проверены возможности α -спектрометрии и был установлен эффект дрейфа атомов ^8He .

Корреляции α -частичных троек изучены в расщеплениях ядер ^{12}C из состава ЯЭ нейтронами с энергией 14.1 МэВ.

Угловые корреляции ядер ^7Li и ^4He , рожденных в развале ядер ^{10}B тепловыми нейтронами изучены в ЯЭ, обогащенной бором.

Проанализированы достаточные площади ЯЭ, облученной источником ^{252}Cf с подходящей плотностью следов α -частиц и осколков спонтанного деления.

В настоящее время развивается исследование тройного деления, возбуждаемого тепловыми нейтронами в эмульсии, пропитанной соединением урана.

Образцы ЯЭ калибровались на в ЛЯР на пучках ионов Kr и Xe с энергией 1.2 и 3 А МэВ.

Программа ImageJ, широко используемая для распознавания объектов на оцифрованных изображениях, применялась для массивованного счета и определения направлений и длин следов

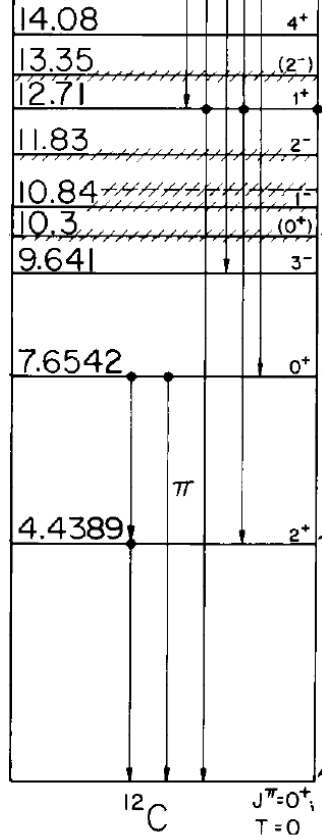
Для исследования ядерной мультифрагментации ЯЭ облучалась мюонами с энергией 160 ГэВ в ЦЕРН (май 2017 г.) и около 2.5 ГэВ в «мюоном факеле» ускорителя У-70 ИФВЭ (весь сеанс апреля 2018 г.).

В декабре 2013 г во вторичном пучке релятивистских ядер ^{11}C нуклотрона ОИЯИ выполнено облучение серии опытных образцов, изготовленных путем полива ЯЭ слоями около 200 μm на стеклянные подложки размером 9 × 12 cm^2 .

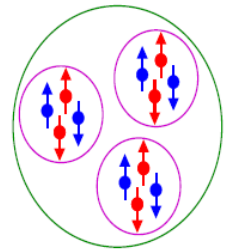
С 2016 г. проводятся облучения ЯЭ ядрами ^{12}C с энергией 450 А МэВ в ИФВЭ.

В декабре 2018 слои ЯЭ продольно облучались в эксперименте NA61 в пучке вторичных ядер с отношением веса к заряду равном 2. Этот пучок формировался путем фрагментации ядер Pb , ускоренных на SPS ЦЕРН до энергии 13 А ГэВ. Кроме того, слои ЯЭ облучались на большой поперечной площади за установкой NA61, что позволило определить область выхода пучка, а также область концентрации релятивистских нейтронов, рожденных при фрагментации ядер на мишени.

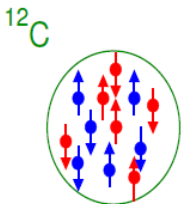
Таким образом, продольно и поперечно облученные слои ЯЭ могут применяться для офф-лайн диагностики пучков НИКА, начиная с инжектора.



E_x in ^{12}C (MeV \pm keV)	$J^\pi ; T$	$\Gamma_{\text{c.m.}}$ (keV)	Decay
g.s	$0^+ ; 0$	-	stable
4.43891 ± 0.31	$2^+ ; 0$	$(10.8 \pm 0.6) \times 10^{-6}$	γ
7.6542 ± 0.15	$0^+ ; 0$	$(8.5 \pm 1.0) \times 10^{-3}$	γ, π, α

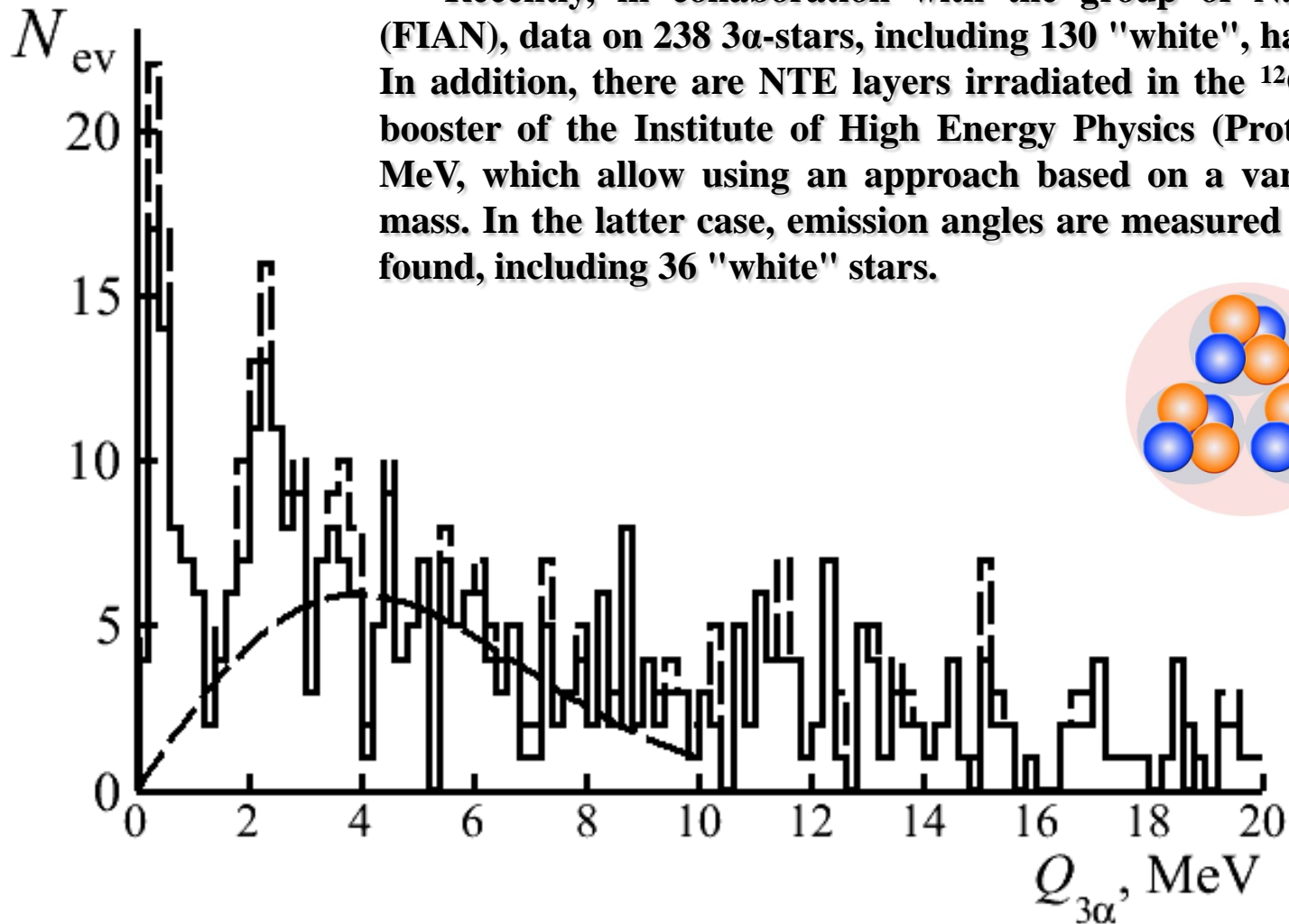


— 0_2^+ 7,65 MeV

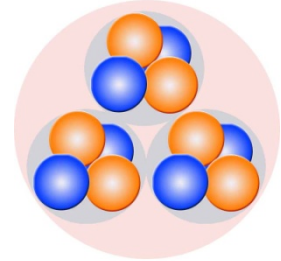


— 0_1^+

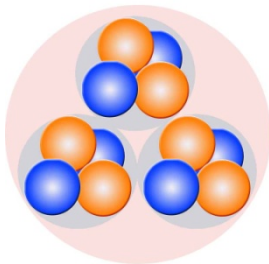
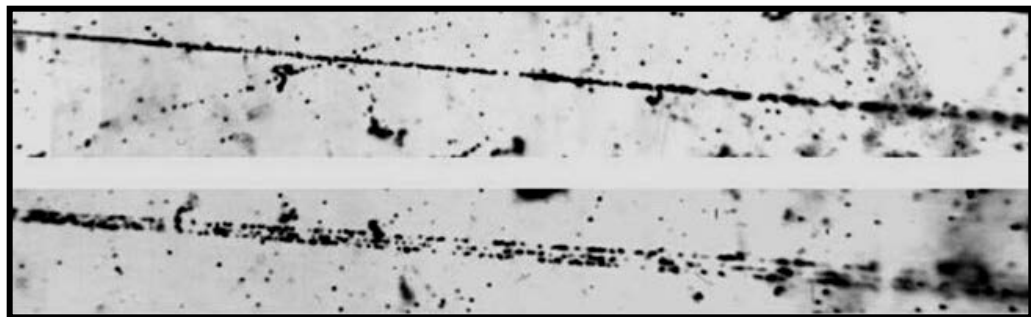
Успешная реконструкция распадов ^8Be и ^9Be позволяет сделать следующий шаг – выполнить поиск в релятивистской диссоциации $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ троек α -частиц в состоянии Хойла (HS). Это состояние является вторым (и первым несвязанным) возбуждением 0_2^+ ядра ^{12}C . Ядро ^8Be является неизменным продуктом распадов HS. Такие особенности HS как обособленность в начальной части спектра возбуждения ^{12}C , предельно малые значения энергии и ширины распада (378 кэВ и 8.5 эВ) указывают на его сходство с ядром ^8Be (91 кэВ и 5.6 эВ). Оба они могут быть отнесены к квазистабильным состояниям ядерно-молекулярного типа.



Recently, in collaboration with the group of N. G. Peresadko (FIAN), data on 238 3α -stars, including 130 "white", have been added. In addition, there are NTE layers irradiated in the ^{12}C beam of the booster of the Institute of High Energy Physics (Protvino) at 420 A MeV, which allow using an approach based on a variable invariant mass. In the latter case, emission angles are measured in 86 3α -events found, including 36 "white" stars.



The distribution $Q_{3\alpha}$ for all 510 stars is shown in Figure. The region $Q_{3\alpha} < 10$ MeV covering the ^{12}C excitations below the nucleon separation thresholds is described by the Rayleigh distribution with the parameter $\sigma_{Q_{3\alpha}} = (3.9 \pm 0.4)$ MeV. There is a peak in the region $Q_{3\alpha} < 1$ MeV (51 stars) where the HS signal is expected. For events at 3.65 A GeV contributed to this peak the average value $\langle Q_{3\alpha} \rangle$ (RMS) is 397 ± 26 (166) keV, and at 420 A MeV, 346 ± 28 (85) keV, respectively. According to the condition $Q_{3\alpha} < 0.7$ MeV 42 of 424 events at 3.65 A GeV can be attributed to HS decays, and 9 at 420 A MeV (out of 86) including 5 "white" stars (out of 36). As a result, the contribution of HS decays to $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ dissociation is $10 \pm 2\%$.

N_{ev} **316 “white” stars $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$** 

10

5

0

0

2

4

6

8

10

12

14

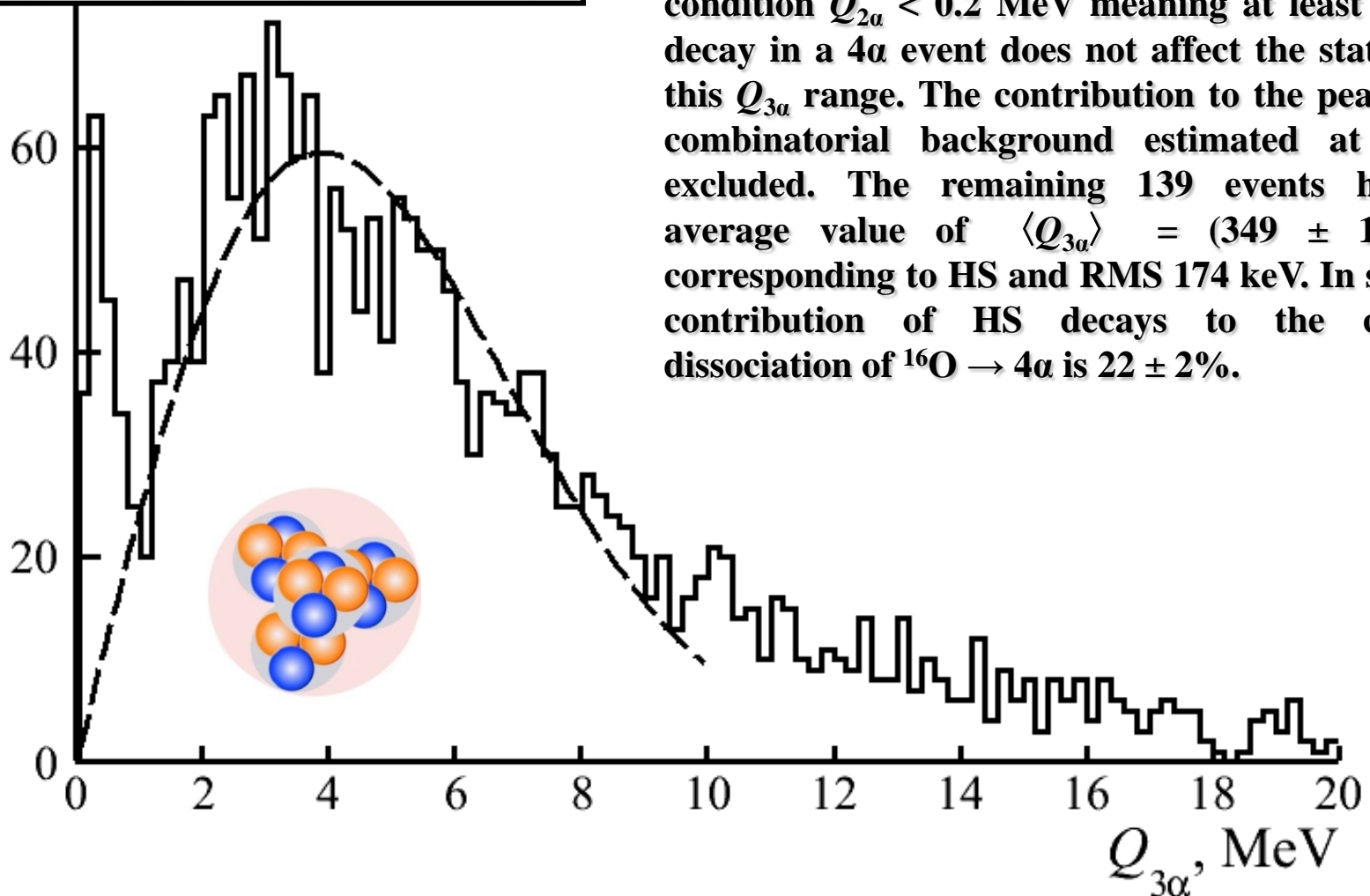
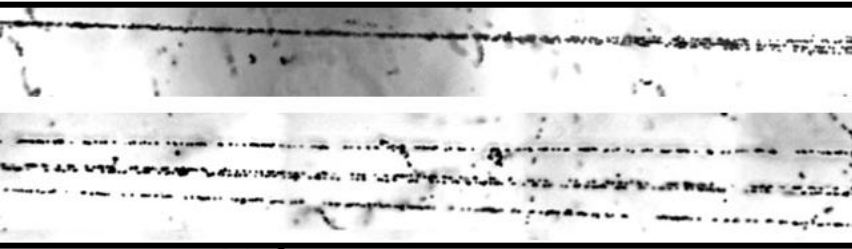
16

18

20

 $Q_{3\alpha}$, MeV

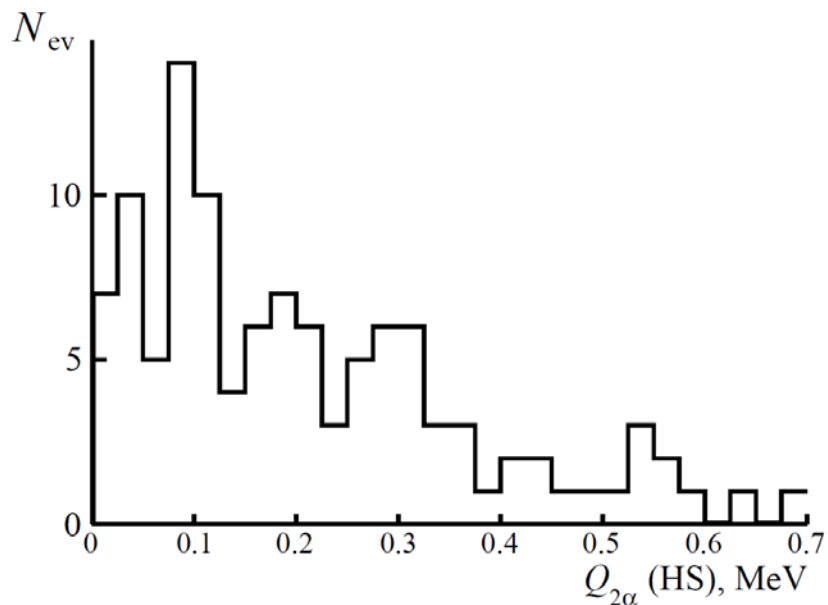
641 “white” stars $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$



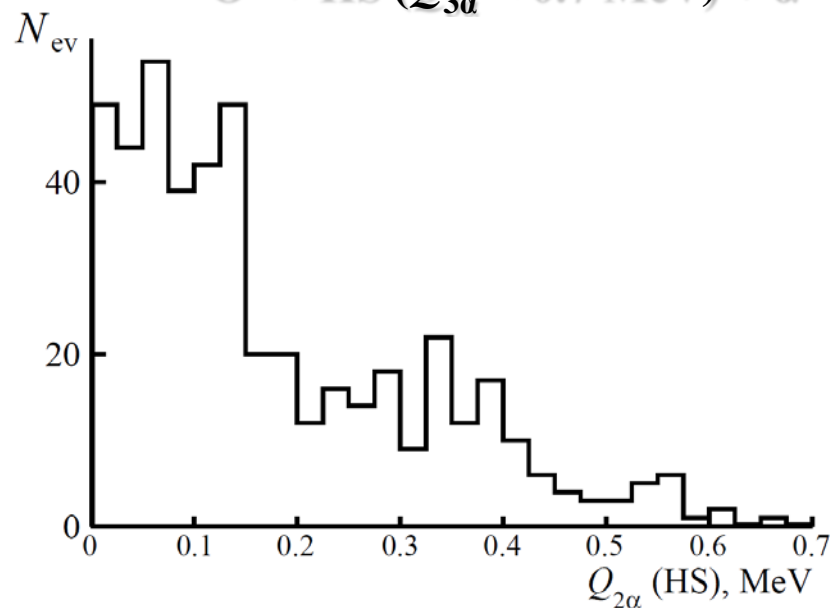
HS decays can manifest themselves in the dissociation $^{16}\text{O} \rightarrow ^{12}\text{C}^* (\rightarrow 3\alpha) + \alpha$. The figure shows the $Q_{3\alpha}$ distribution of all 3α combinations. As in the ^{12}C case, its main part with $Q_{3\alpha} < 10$ MeV is described by the Rayleigh distribution with the parameter $\sigma_{Q_{3\alpha}} = (3.8 \pm 0.2)$ MeV.

It also has a peak at $Q_{3\alpha} < 0.7$ MeV. The condition $Q_{2\alpha} < 0.2$ MeV meaning at least one ^8Be decay in a 4α event does not affect the statistics in this $Q_{3\alpha}$ range. The contribution to the peak of the combinatorial background estimated at 8% is excluded. The remaining 139 events have an average value of $\langle Q_{3\alpha} \rangle = (349 \pm 14)$ keV corresponding to HS and RMS 174 keV. In sum, the contribution of HS decays to the coherent dissociation of $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ is $22 \pm 2\%$.

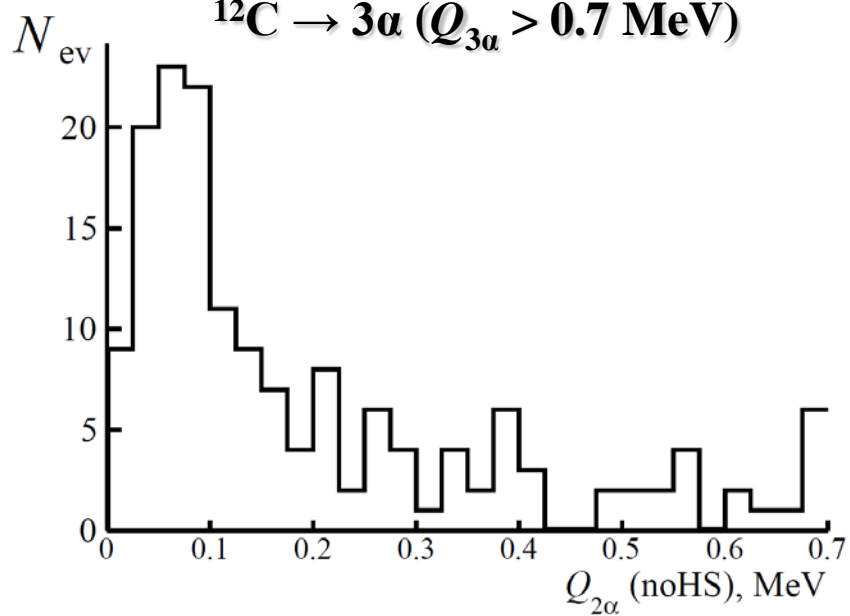
$^{12}\text{C} \rightarrow \text{HS} (Q_{3\alpha} < 0.7 \text{ MeV})$



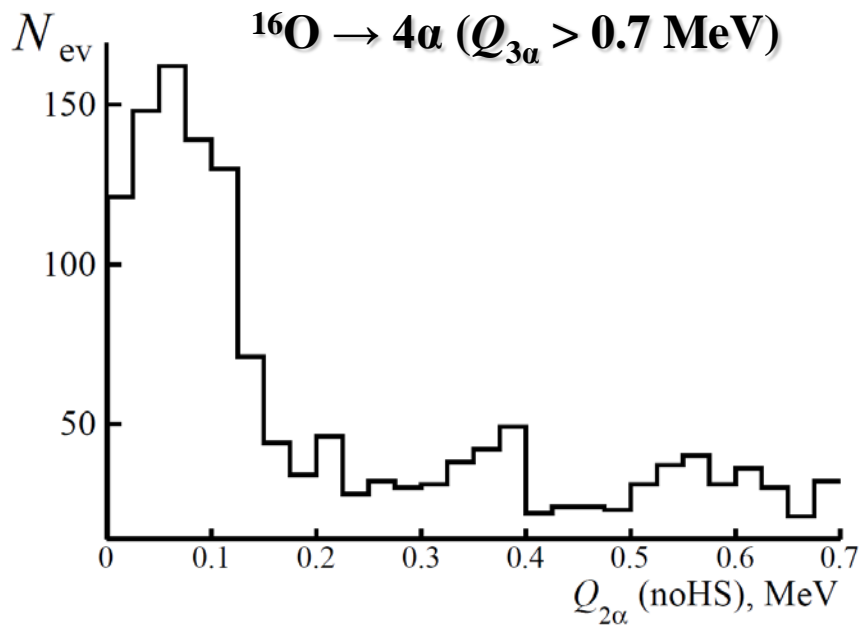
$^{16}\text{O} \rightarrow \text{HS} (Q_{3\alpha} < 0.7 \text{ MeV}) + \alpha$



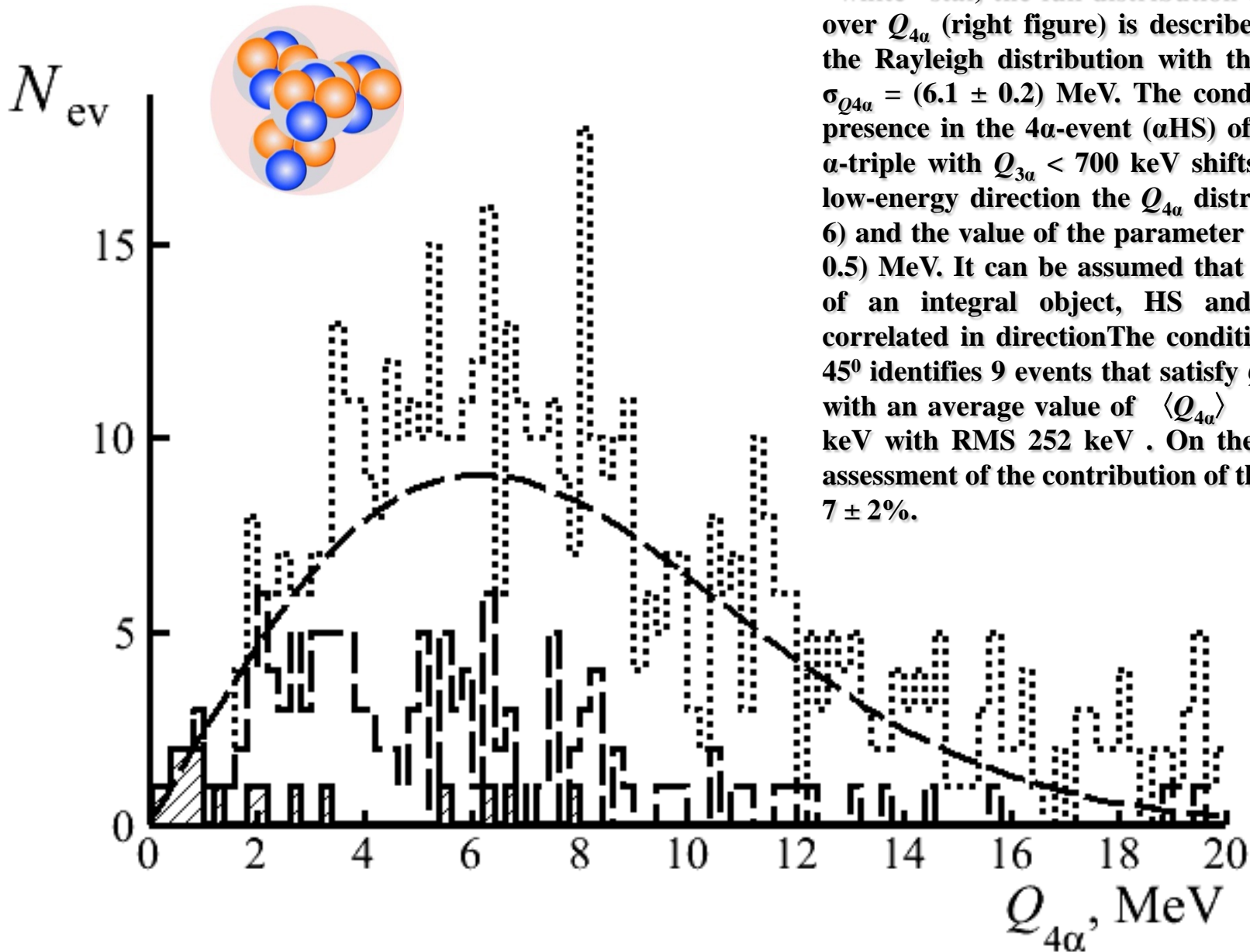
$^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha (Q_{3\alpha} > 0.7 \text{ MeV})$



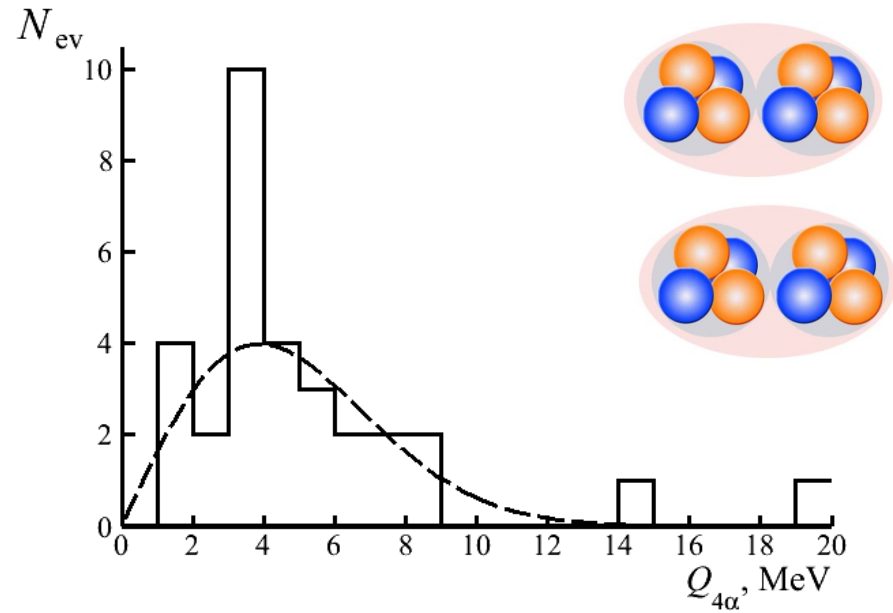
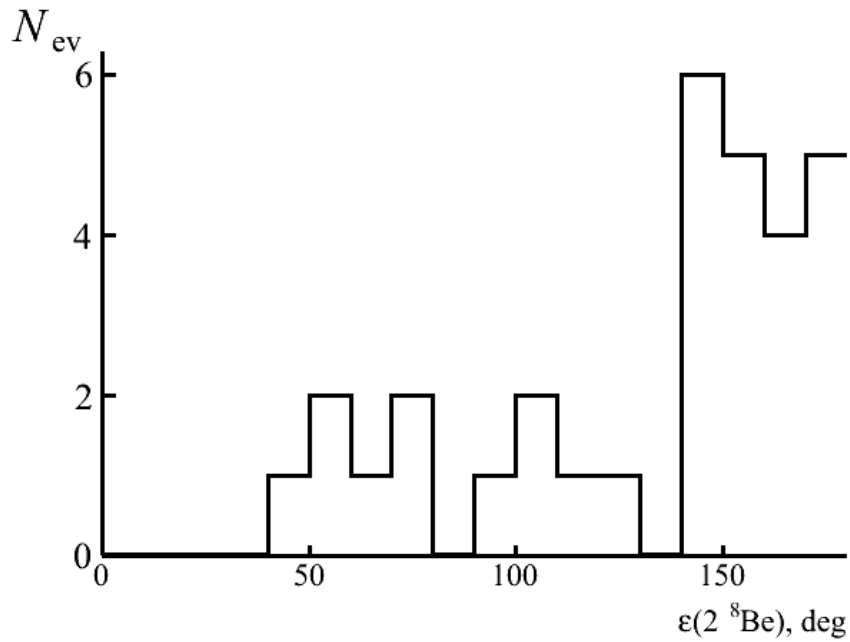
$^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha (Q_{3\alpha} > 0.7 \text{ MeV})$



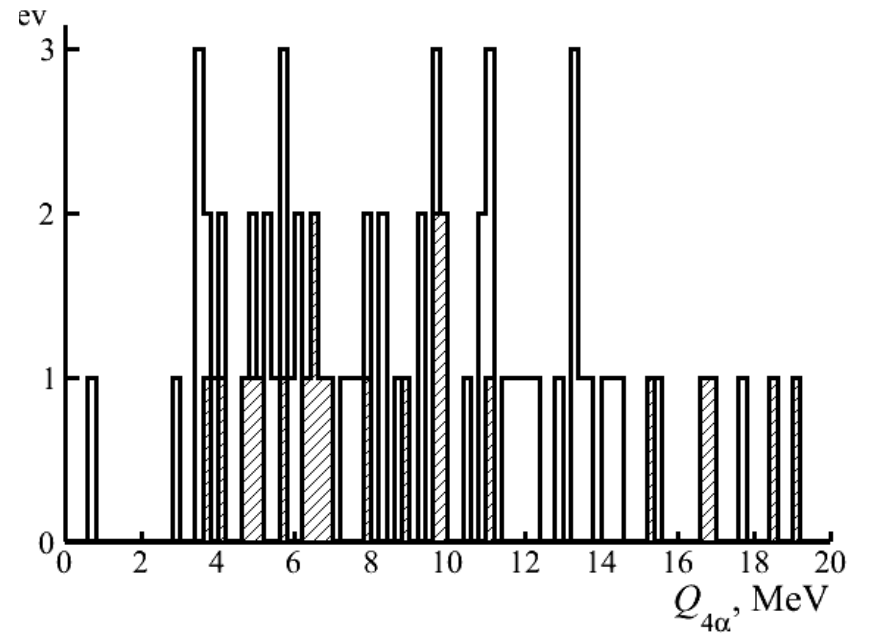
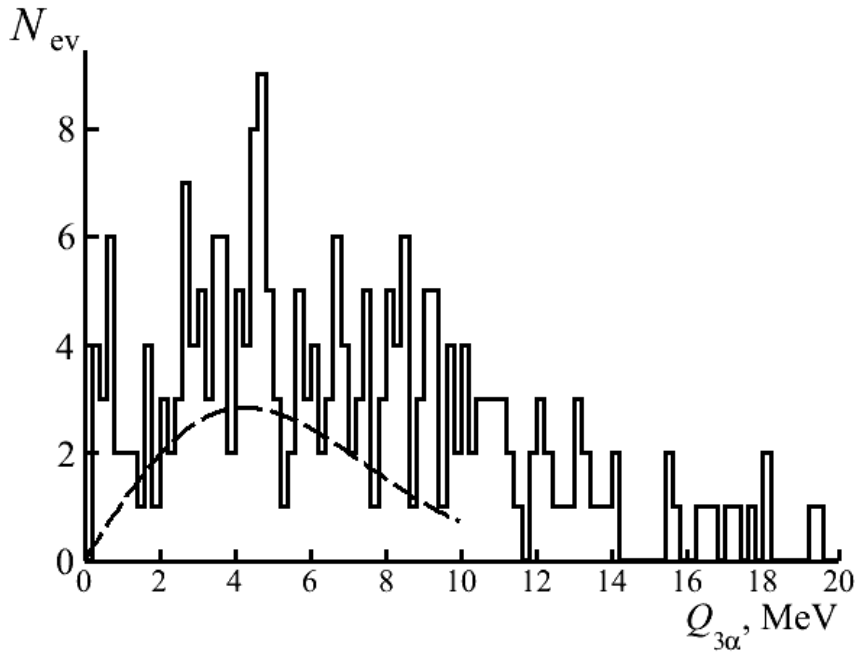




HS can arise as a decay product of the excited state 0^+_6 of the ^{16}O nucleus (by analogy with the decay of HS into $^8\text{Be} + \alpha$). In the 641 “white” star, the full distribution of α -quartets over $Q_{4\alpha}$ (right figure) is described mainly by the Rayleigh distribution with the parameter $\sigma_{Q_{4\alpha}} = (6.1 \pm 0.2) \text{ MeV}$. The condition for the presence in the 4α -event (αHS) of at least one α -triple with $Q_{3\alpha} < 700 \text{ keV}$ shifts toward the low-energy direction the $Q_{4\alpha}$ distribution (Fig. 6) and the value of the parameter $\sigma_{Q_{4\alpha}} = (4.5 \pm 0.5) \text{ MeV}$. It can be assumed that in the decay of an integral object, HS and α will be correlated in direction. The condition $\varepsilon(\alpha\text{HS}) < 45^\circ$ identifies 9 events that satisfy $Q_{4\alpha} < 1 \text{ MeV}$ with an average value of $\langle Q_{4\alpha} \rangle = (624 \pm 84) \text{ keV}$ with RMS 252 keV. On their basis, the assessment of the contribution of the 0^+_6 state is $7 \pm 2\%$.



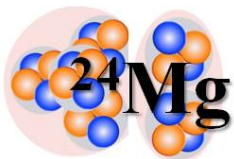
Among the 641 "white" stars $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$, 33 events were selected, in which two ^8Be fragments ($Q_{2\alpha} < 0.2$ MeV) are present. The directions of expansion along the azimuth angle ε (2^8Be) show anti-correlation (left) which indicates the binary formation of these fragments. In 31 events 2^8Be there are no triples of α -particles that satisfy the condition HS ($Q_{3\alpha} < 0.7$ MeV) which gives an estimate of the contribution of the $^{16}\text{O} \rightarrow 2^8\text{Be}$ channel is equal to $5 \pm 1\%$. The distribution of pairs to their full transverse momentum $P_T(2^8\text{Be})$ is described by the Rayleigh distribution with the parameter $\sigma_{P_T}(2^8\text{Be}) = (161 \pm 2)$ MeV/c. The right figure shows the distribution over $Q_{4\alpha}$ for 2^8Be events for which the Rayleigh parameter is (4.3 ± 1.2) MeV. The number of events in the channels $^{16}\text{O} \rightarrow \alpha\text{HS}$ and $^{16}\text{O} \rightarrow 2^8\text{Be}$ has a ratio 4.5 ± 0.4 which means that the first of them is clearly leading.



Distribution over $Q_{3\alpha}$ for $^{22}\text{Ne} \rightarrow 4\alpha$. In the region $Q_{3\alpha} < 1$ MeV $\langle Q_{3\alpha} \rangle = (557 \pm 51)$ keV and RMS 195 keV close to the HS value. The number of candidates for HS decays (and their share) in the 3α , 4α and 5α channels is 3 ($1.2 \pm 0.7\%$), 12 ($15 \pm 4\%$) and 1 (10%). Thus, only in the 4α -channel there is a significant indication of HS. The shift $\langle Q_{3\alpha} \rangle$ compared with cases of ^{12}C and ^{16}O requires better accuracy.

Distribution over $Q_{4\alpha}$ for $^{22}\text{Ne} \rightarrow 4\alpha$ and 5α . In the 4α channel there is a single event with the value $Q_{4\alpha} = 791$ keV in which all α -triples meet the condition HS $Q_{3\alpha} < 1$ MeV. This α -quartet can correspond to the decay of the $^{16}\text{O} 0^+_6$ state.

Состояние Хойла в диссоциации легких ядер



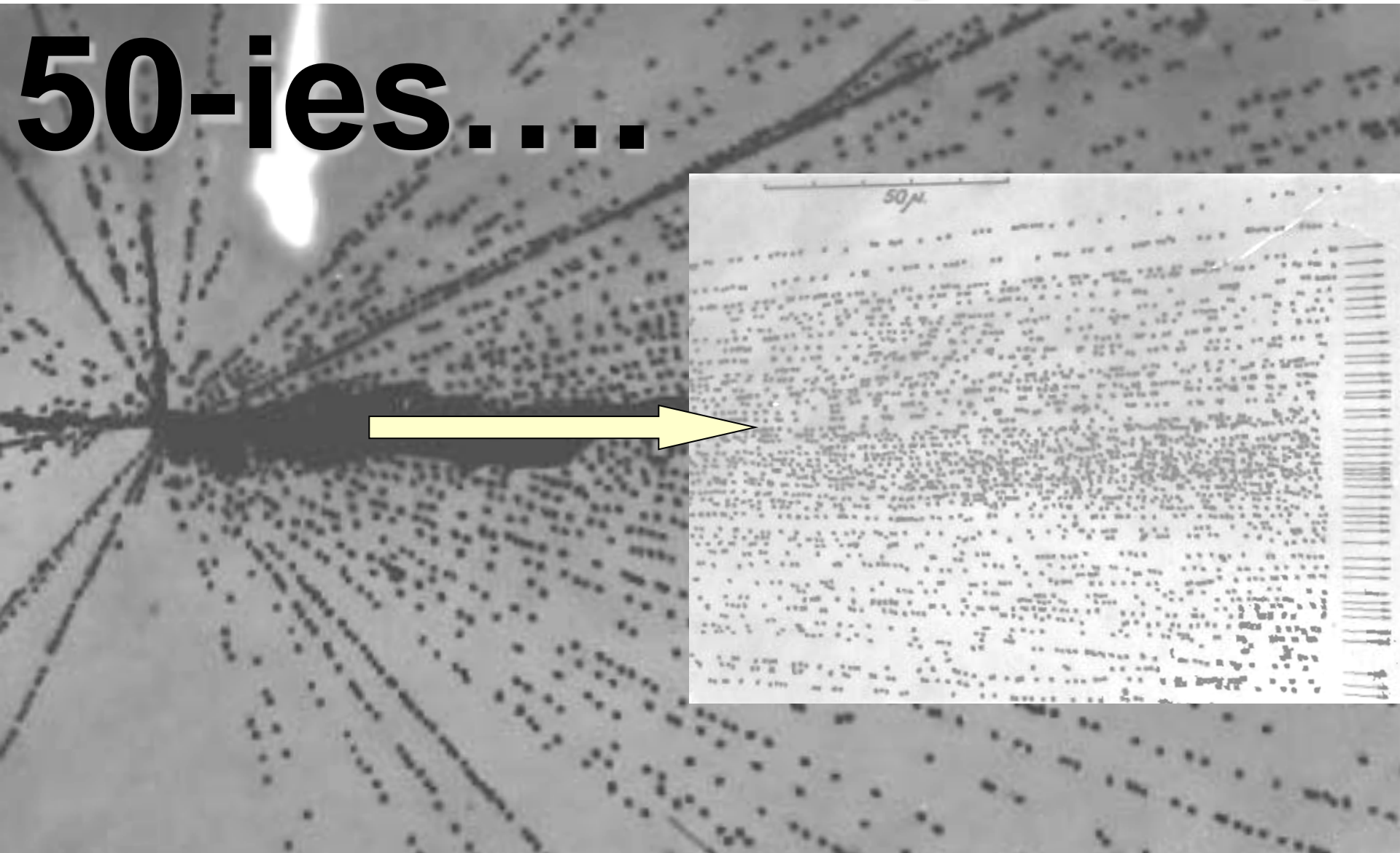
*3.65 A GeV ^{28}Si along track
paths 61.3 m 6252 stars
Among them 6 α (12), 5 α (67), 4 α
(170), 2 fragments (101), 14H (2)*

Применение этих наблюдений состоит в проверке универсальности HS и поиске более тяжелых α -конденсатных состояний в имеющих слоях ЯЭ, облученных соседними ядрами. В этих случаях можно идентифицировать распады ^8Be и, следовательно, HS. Несмотря на прошедшие десятилетия, этот экспериментальный материал прекрасно сохранился. Ближайшим источником HS является периферическая диссоциация ядра ^{14}N , в которой лидирует канал $3\text{He} + \text{H}$ с вкладом распадов ^8Be около 25%. Анализ слоев ЯЭ, облученных релятивистскими ядрами ^{14}N , возобновлен в контексте проблемы HS, а также роли нестабильного ядра ^9Be . Подобный анализ будет осуществлен в слоях ЯЭ, которые облучались релятивистскими ядрами ^{22}Ne и ^{28}Si и использовались для обзорного анализа.

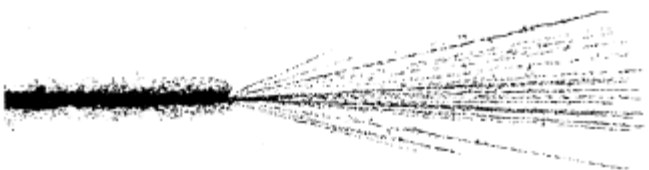
Кроме того, существует достаточное количество слоев ЯЭ, облученных на CERN SPS ядрами ^{32}S энергией 200 A GeV. И в этом случае возможна идентификация распадов ^8Be , а, значит, и HS. Статистика составит десятки событий, в которых могут присутствовать распады HS. Потенциально, решение вопроса об универсальности HS откроет горизонт поиска более сложных систем с участием HS и ^8Be . Ранее, образование ^8Be было установлено при облучении ЯЭ ядрами Pb на CERN SPS. В этой связи представляет интерес изучение возможности образования HS и в случае диссоциации тяжелых ядер.

Lebedev PI (FIAN)

50-ies....



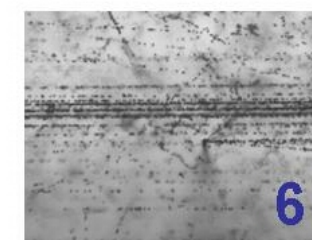
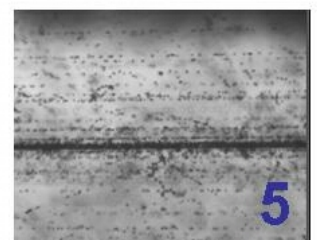
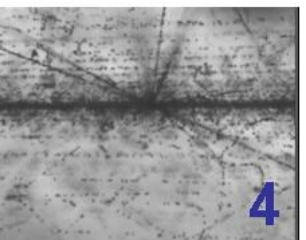
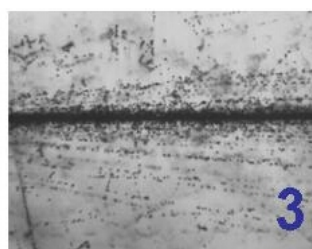
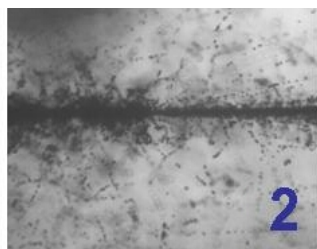
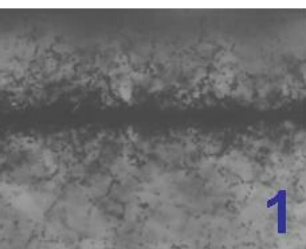
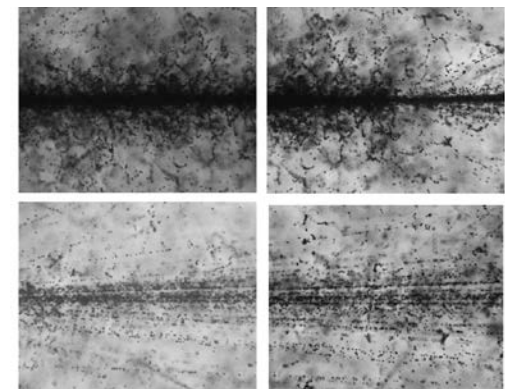
Состав диссоциации тяжелых ядер



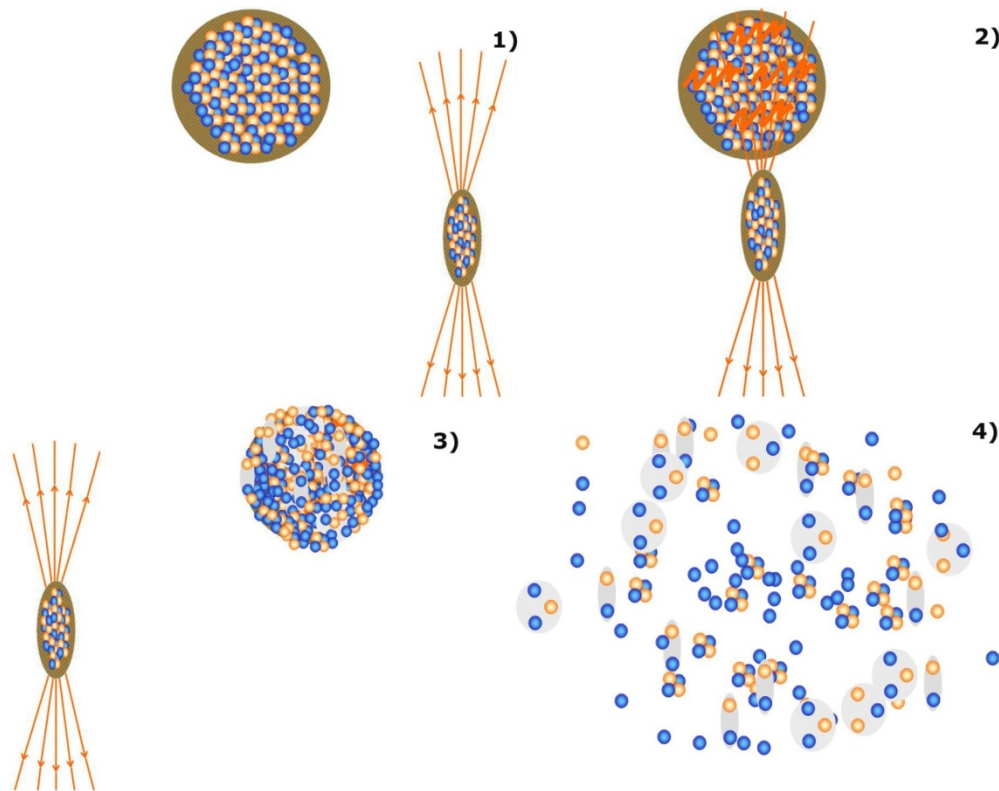
U 1 A ГэВ

Au 10 A ГэВ

Pb 160 ГэВ



Исследования легких ядер являются ступенями к изучению сложнейших ансамблей $He - N - n$, возникающих в диссоциации тяжелых ядер. Примеры событий множественной когерентной диссоциации представленных на фотографиях, указывают на ступенчатый «срыв» ионизации. Именно такие события в ЯЭ наблюдаются наилучшим образом, а их распределение по различным каналам заряженных фрагментов, интерпретируется наиболее полно. Стоит задаться вопросом, какая физика лежит в основе событий «катастрофического» разрушения тяжелых ядер,?



События множественной фрагментации релятивистских ядер вплоть до полного разрушения на легчайшие ядра и нуклоны без видимого возбуждения ядер мишени надежно наблюдались в ядерной эмульсии для ядер Au и Pb и даже U. Существование этого явления не вызывает сомнения. Заряды тяжелых ядер делают возможными многофотонные обмены и переходы в многочастичные состояния. Альтернативный сценарий когерентной диссоциации состоит в обмене виртуальными мезонами. Возможна интерференция электромагнитного и сильного взаимодействия.

Диссоциация тяжелых ядер ведет к появлению многочастичных состояний с кинематическими характеристиками, которые представляют ядерно-астрофизический интерес и которые невозможно сформировать в других лабораторных условиях. Обращение «стрелы времени» в таких событиях наводит на идею о синтезе элементов через фазу нуклонов и легчайших ядер. Масштаб энергии фрагментов в системе родительского ядра охватывает температуру 10^8-10^{10} К от красного гиганта до сверхновой. В таких разреженных нуклонных ансамблях радикально ослабляется кулоновское отталкивание. Будучи рассмотрена в макроскопическом масштабе, такая «ядерная упаковка» может служить источником гравитационных волн.

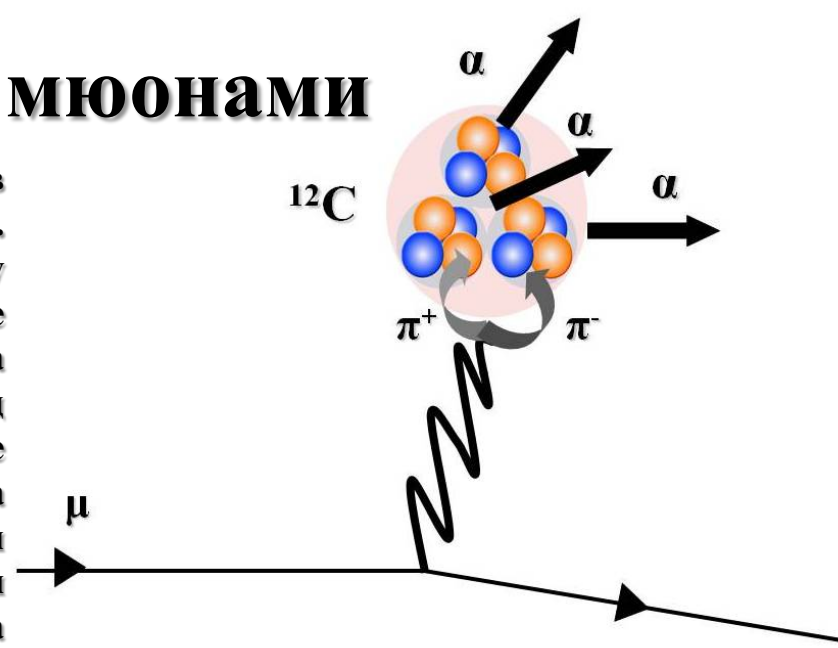
Предлагается использовать уникальные и, вместе с тем, хорошо проверенные возможности метода ЯЭ для углубленного исследования периферической диссоциации тяжелых ядер с энергией несколько ГэВ на нуклон. Для характеристики возникающего состояния определяется соотношение релятивистских нейтронов и изотопов ${}^1,2,3\text{H}$ и ${}^3,4\text{He}$, а по углам эмиссии их поперечные импульсы. Будучи возможным в принципе, трудоемкий анализ изотопического состава релятивистских фрагментов методом рассеяния не применялся в 90-е годы при пионерских облучениях ядрами Au при 10 А ГэВ. Хотя образование вторичных звезд нейтронами в конусе фрагментации было замечено, задачи их исследования поставлены не были. Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ будет сосредоточен на этих вопросах.

В релятивистской диссоциации тяжелых ядер происходит образование легких фрагментов с большим отношением заряда к массовому числу, чем у первичного ядра, обуславливая возникновение ассоциированных нейтронов. Средний пробег нейтронов в ЯЭ около 32 см. Эти нейтроны должны обнаруживать себя в конусе фрагментации по вторичным звездам, не содержащим входящего следа. Частота таких «нейтронных» звезд должна расти с ростом числа легчайших ядер в конусе фрагментации. Достигая десятков, множественность нейтронов в событии может быть оценена по пропорциональному уменьшению среднего пробега до образования «нейтронных» звезд на длинах порядка нескольких сантиметров. Координаты вершины взаимодействия определяются с точностью характерной для ЯЭ (не хуже 0.5 μm), что позволяет восстановить углы эмиссии нейтронов с наилучшей точностью. Измерения соседних следов могут быть использованы для компенсации возможной дисторсии. В случае полной диссоциации тяжелого ядра число нейтронов может оцениваться по изотопическому составу релятивистских фрагментов H и He. Значителен ли выход дейтронов и тритонов, связывающих нейтроны? Ответ на этот вопрос может иметь также и прикладное значение.

На начальном этапе анализируются имеющиеся слои ЯЭ толщиной 500 μm на статистике десятков периферических взаимодействий ядер Kr (2 А ГэВ, GSI), Au (10 А ГэВ, BNL) и Pb (159 А ГэВ, ЦЕРН) с целью определения зависимости вклада нейтронов от степени диссоциации этих ядер. В первую очередь будет вестись детальный анализ «золотых» событий когерентной диссоциации тяжелых ядер. Обоснованность выводов будет определяться числом найденных нейтронных вершин, а также числом измеренных и идентифицированных следов H и He.

Фрагментация вызванная мюонами

Механизм диссоциации релятивистских ядер в периферических взаимодействиях остается не проясненным. Возможно, что проявляется многофотонный обмен между ядрами пучка и мишени. Альтернатива состоит в обмене виртуальными мезонами. В качестве критичного теста может служить фрагментация ядер из состава ЯЭ под действием релятивистских мюонов. В этом случае фрагментация может возникать в результате перехода обменных фотонов в пары виртуальных мезонов. Такая комбинация обеспечивает дальное действие при эффективном разрушении ядер и может быть распространена на периферические взаимодействия релятивистских ядер. В этой связи следует провести поиск возможно более полного разрушения тяжелых ядер из состава ЯЭ (Ag и Br) под действием релятивистских мюонов.



Фрагментация ядер мишени на три α -частицы наиболее вероятна для развала $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$. В этих событиях на основе координатных измерений следов определяются пробеги и углы эмиссии α -частиц. Значения энергии α -частиц извлекаются из сплайн-интерполяции расчета энергия-пробег по известной модели SRIM. На этой основе можно получить распределения по инвариантной массе, а также по полному импульсу пар и троек α -частиц. Предварительно установлено, что распределению по полному поперечному импульсу троек α -частиц, рожденных, расщеплениях ядер ^{12}C отвечает не электромагнитная, а ядерная дифракция.

В мюонном пучке эксперимента COMPASS примесь адронов не превышает 10^{-6} , и возможно краткое облучение приемлемой плотности в дефокусированном пучке. Для эффективного наблюдения вторичных следов облучаемая стопка будет состоять из бесподложечных слоев толщиной 500 μm . Облучение будет выполнено согласно плану эксперимента COMPASS.

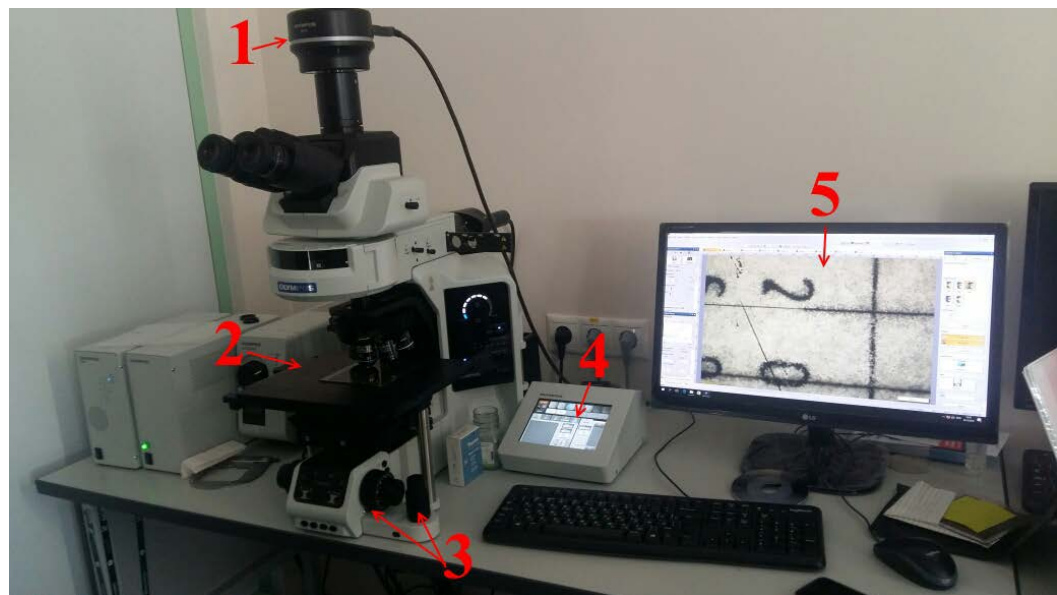
Определение сечения 3α -расщепления имеет значение для геофизики, поскольку позволит проверить гипотезу о генерации гелия в глубинах земной коры космическими мюонами

Обновление микроскопов и технологии ЯЭ

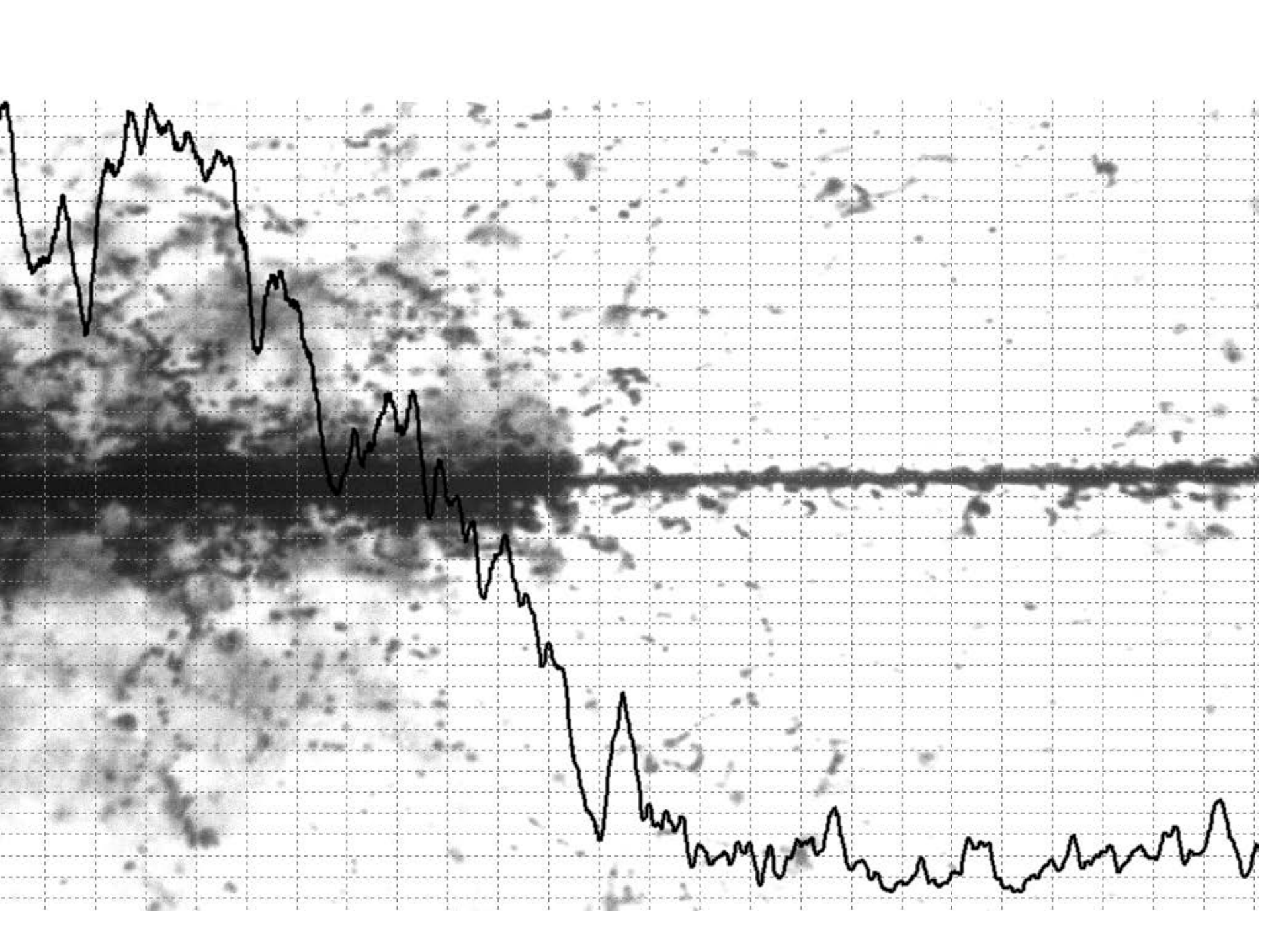
Проект направлен на интенсификацию в применении апробированного подхода на основе автоматизации измерений, обеспечиваемой микроскопами современного уровня. Однако, такие микроскопы являются весьма дорогостоящими. В этом аспекте состоит основной запрос бюджета проекта.

Координатные измерения в ЯЭ ведутся на трех прецизионных микроскопах KSM, произведенных полвека назад Carl Zeiss, Jena. Благодаря квалифицированному обслуживанию, эти уникальные приборы находятся в рабочем состоянии. Такие микроскопы имеются в Каире, Бухаресте и Праге. Назрела необходимость их модернизации в части автоматического считывания трех измеряемых координат. Эта разработка ведется в Отделе радиационной дозиметрии (Прага) по проекту «Ядерная эмульсия в прикладных задачах» (Проект Беккерель) в рамках программы сотрудничества ОИЯИ-Чешская республика. Ее стоимость составляет около 5000 \$, Тиражирование этого изделия требует первоочередного финансирования.

Поставленные задачи и накопленная методическая культура заслуживают обновления на основе моторизованного микроскопа VX63 фирмы Олимпус. Такой прибор может быть средством коллективного использования. Его ориентировочная цена – 80000 \$. Для работы на столь совершенном приборе необходима подготовка нового поколения исследователей. Представлена фотография этого микроскопа, работающего в Институте эндокринологии (г. Москва). Под объективом установлен слой ЯЭ на стекле, который продольно облучен ядрами криптона.



На монитор выведена часть изображения 1 мм маркировочной сетки, нанесенной на слой ЯЭ. На экране виден горизонтально ориентированный след ядра криптона и фрагменты, порожденные им. На микроскопе VX63 возможен автоматический поиск вершин периферической диссоциации по эффекту срыва ионизации («ступеньке»). Смена объектива делается поворотом револьвера в ту же точку без вмешательства оператора. Дальнейшие измерения координат делаются автоматически при визуальном прослеживании следов фрагментов.



Ожидаемые результаты и их значимость

Недавние достижения участников эксперимента БЕККЕРЕЛЬ в исследованиях с легкими релятивистскими ядрами и сохраненная микроскопная и химико-технологическая основа дают основания ожидать в перспективе около трех лет следующих физических и методических результатов:

Легкие ядра Будет получен ответ на вопрос об универсальном характере образования троек α -частиц в состоянии Хойла в диссоциации ядер ^{14}N , ^{22}Ne и ^{28}Si будет исследована возможность существования более сложных α -частичных состояний ядерно-молекулярного типа.

Тяжелые ядра В имеющихся слоях ЯЭ, облученных ядрами Kr, Au и Pb будут отобраны и документированы несколько десятков событий множественной диссоциации. В отобранных взаимодействиях будет установлено распределение по зарядовой топологии легчайших фрагментов, сопровождаемое их идентификацией, восстановлено распределение по поперечному импульсу нейтронов и оценено их число.

Мюоны Будет выполнено облучение стопок ЯЭ в чистом пучке мюонов в ЦЕРН и начат анализ фрагментации ядер из состава ЯЭ.

Результаты начального этапа позволят представить структуру диссоциации ядер с уникальной детальностью, а также уточнить предложения по применению метода ЯЭ на пучках НИКА. На этой основе будет подвергнута проверке гипотеза о возможности исследования разреженной ядерной материи в диссоциации тяжелых ядер. Результаты эксперимента позволят сделать вывод об изотопном составе и температуре разреженной ядерной материи, возникающей в момент диссоциации тяжелого ядра. Измерения углов эмиссии нейтронов позволят оценить их пространственные распределения на периферии тяжелых ядер (нейтронная «кожа»). В более широком плане, эти результаты важны для проверки в важном секторе модельных представлений о взаимодействиях релятивистских ядер.

Важным аргументом в пользу метода ЯЭ является возможность «физики на расстоянии», т.е. анализа облученных и проявленных слоев в институтах, обладающих подходящими микроскопами и подготовленным персоналом. Проект будет способствовать сохранению метода ЯЭ и подготовке молодых ученых для широкого применения в практике ядерного эксперимента, дозиметрии, радиационной медицине и экологии. Особенно важно активное применение этого метода в связи с перспективным развитием автоматических микроскопов и прогрессом программ распознавания изображений (искусственного интеллекта). В отношении ядерного эксперимента такое развитие будет базироваться на классическом методе ЯЭ.

1. Zarubin P.I.: “Tomography” of the cluster structure of light nuclei via relativistic dissociation. Lect. Notes in Physics, Clusters in Nuclei, 875(3), 51(2014), Springer Int. Publ.; <https://arxiv.org/abs/1309.4881>.
2. Artemenkov D.A., Zaitsev A.A., and Zarubin P.I.: Unstable nuclei in dissociation of light stable and radioactive nuclei in nuclear track emulsion. Phys. Part. Nucl. 48, 147–157(2017); <https://arxiv.org/abs/1607.08020>.
3. Artemenkov D.A. *et al.*: Nuclear track emulsion in search for the Hoyle-state in dissociation of relativistic ^{12}C nuclei. Rad. Meas., 119, 119(2018); <https://arxiv.org/abs/1812.09096>.
4. Zarubin P.I.: Recent applications of nuclear track emulsion technique. Phys. At. Nucl, 79 1525(2016); <http://becquerel.jinr.ru/text/Papers/PHAN1525.pdf>.
5. Bradnova V. *et al.*: Experimental Exposure of nuclear emulsion by Xenon nuclei at the JINR Nuclotron. Phys. Part. Nucl., Lett., 8, 562(2011); http://becquerel.jinr.ru/text/Papers/Xe_PHPL562.pdf.
6. Artemenkov D.A. *et al.*: Toward ternary fission accompanied by the ^8Be nucleus. <https://arxiv.org/abs/1902.04407>.
7. Freer M., Fynbo H.O.U.: The Hoyle state in ^{12}C . Prog. Part. Nucl. Phys., 78, 1(2014); <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641014000453?via%3Dihub>.
8. Tohsaki A., Horiuchi H., Schuck P. and Röpke G.: Status of α -particle condensate structure of the Hoyle state. Rev. Mod. Phys., 89, 011002 (2017); <https://arxiv.org/abs/1702.04591>.
9. Schuck P.: Recent theoretical advances and open problems in nuclear cluster physics. <https://arxiv.org/abs/1811.11580>.
10. Belaga V.V., Benjaza A.A., Rusakova V.V., Salomov D.A., Chernov G.M.: Coherent dissociation $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ in lead-enriched emulsion at 4.5 GeV/c per nucleon. Phys. Atom. Nucl., 58, 1905 (1995); <https://arxiv.org/abs/1109.0817>.
11. Andreeva N.P. *et al.*: Coherent dissociation $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ in photoemulsion at incident momentum of 4.5 GeV/c per nucleon. Phys. At. Nucl., 59, 102(1996); <https://arxiv.org/abs/1109.3007>.
12. El-Naghy A. *et al.*: Fragmentation of ^{22}Ne in emulsion at 4.1 A GeV/c. J. Phys. G, 14, 1125 (1988); <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0305-4616/14/8/015>.
13. Shchedrina T.V. *et al.*: Peripheral interactions of relativistic ^{14}N nuclei with emulsion nuclei. Phys. At. Nucl., 70, 1230 (2007); <https://arxiv.org/abs/nucl-ex/0605022>.
14. Adamovich M.I. *et al.*: Multifragmentation of Gold nuclei in the interactions with photoemulsion nuclei at 10.7 GeV/nucleon; Z. Phys. A 359, 277 (1997); <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs002180050403>.
15. Cherry M.L. *et al.*: Fragmentation and particle production in interactions of 10.6 GeV/N gold nuclei with hydrogen, light and heavy targets. Eur. Phys. J. C, 5, 641 (1998) <http://becquerel.jinr.ru/text/reprints/EXM7D72VX94PRXAM.pdf>.
16. Adamovich M.I. *et al.*: Critical behaviour in Au fragmentation at 10.7A GeV. Eur. Phys. J. A, 1, 77 (1998); <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs100500050034>.
17. Adamovich M.I. *et al.*: Fragmentation and multifragmentation of 10.6A GeV gold nuclei. Eur. Phys. J. A, 5, 429 (1999); <https://arxiv.org/abs/hep-ph/9809289>.
18. Kirk J.A., Cottrell D.M., Lord J.J. and Piserchio R.J. Inelastic muon interactions in nuclear emulsion at 2.5 and 5.0 GeV. II Nuovo Cim., XL, 523(1965); <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fbfb02721042.pdf>.
19. Jain P. L., Sengupta K. and Singh G.: Nucl. Phys. B, 301, 517 (1988); <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0550321388902751?via%3Dihub>.
20. Artemenkov D.A. *et al.*: Study of nuclear multifragmentation induced by ultrarelativistic μ -mesons in nuclear track emulsion. J. Phys.: Conf. Series, 675, 022022 (2016); <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/675/2/022022>.

Publications of team members over the past 5 years

1. P. I. Zarubin "Tomography" of the cluster structure of light nuclei via relativistic dissociation" Lecture Notes in Physics, 875, Clusters in Nuclei, Volume 3. Springer Int. Publ., 51(2013); arXiv:1309.4881.
2. K.Z. Mamatkulov *et al.* "Dissociation of ^{10}C Nuclei in Nuclear Track Emulsion at Energy of 1.2 GeV per Nucleon" Phys. At. Nucl. 76 1224(2013); arXiv:1309.4241.
3. R.R. Kattabekov *et al.* "Coherent dissociation of relativistic ^{12}N nuclei" Physics of Atomic Nuclei 76 1219(2013); arXiv:1310.2080.
4. N.K. Kornegrutsa *et al.* «Clustering features of the ^7Be nucleus in relativistic fragmentation» Few Body Syst. 55 1021(2014); arXiv:1410.5162.
5. D.A. Artemenkov *et al.* "Charge topology of the coherent dissociation of relativistic ^{11}C and ^{12}N nuclei" Phys. At. Nucl. 78 794(2015); arXiv:1411.5806.
6. A.A. Zaitsev *et al.* "Dissociation of Relativistic ^{10}B Nuclei in nuclear track emulsion" Phys. Part. Nucl. 48 960(2017); DOI:10.1134/S1063779617060612.
7. D.A. Artemenkov, A. A. Zaitsev, P. I. Zarubin "Unstable nuclei in dissociation of light stable and radioactive nuclei in nuclear track emulsion" Phys. Part. Nucl. 48 147(2017); arXiv: 1607.08020.
8. D.A. Artemenkov *et al.* "Study of the Involvement of ^8Be and ^9B Nuclei in the Dissociation of Relativistic ^{10}C , ^{10}B , and ^{12}C Nuclei" Phys. At. Nucl. 80 1126(2017).
9. D.A. Artemenkov *et al.* "Recent findings in relativistic dissociation of ^{10}B and ^{12}C nuclei" Few Body Syst. 58 89(2017).
10. R.R. Kattabekov *et al.* "Correlations of α -particles in splitting of ^{12}C nuclei by neutrons of energy of 14.1 MeV" Yadernaya Fizika 76 (additional issue) 88(2013); arXiv:1407.4575.
11. D.A. Artemenkov *et al.* « ^8He nuclei stopped in nuclear track emulsion», Few Body Syst. 55 733 (2014); arXiv:1410.5188.
12. D.A. Artemenkov *et al.* "Irradiation of nuclear track emulsions with thermal neutrons, heavy ions, and muons" Phys. At. Nucl. 78 579(2015).
13. D.A. Artemenkov *et al.* «Exposure of nuclear track emulsion to at the ACCULINNA separator» Phys. Part. Nucl., Lett. 10 415(2013); arXiv:1309.4808.
14. K.Z. Mamatkulov *et al.* "Toward an automated analysis of slow ions in nuclear track emulsion" Phys. Procedia 74 59(2015); arXiv:1508.02707.
15. K.Z. Mamatkulov *et al.* "Experimental examination of ternary fission in nuclear track emulsion" Phys. Part. Nucl. 48 910(2017).
16. P.I. Zarubin "Recent applications of nuclear track emulsion technique" Phys. At. Nucl. 79 1525(2016).
17. D.A. Artemenkov *et al.* "Study of nuclear multifragmentation induced by ultrarelativistic μ -mesons in nuclear track emulsion" Journal of Physics: Conference Series 675 022022(2016).
18. D.A. Artemenkov, A.A. Zaitsev, and P.I. Zarubin "Search for the Hoyle state in dissociation of relativistic ^{12}C nuclei" Phys. Part. Nucl. 49 530(2018).
19. D.A. Artemenkov *et al.* "Nuclear track emulsion in search for the Hoyle-state in dissociation of relativistic ^{12}C nuclei" Radiation Measurements 119 199(2018); arXiv:1812.09096.
20. Zaitsev, A. A.; Zarubin, P. I. "Application of nuclear track emulsion in search for the Hoyle state in dissociation of relativistic ^{12}C " Phys. At. Nucl. 81, 1237(2018).

MS (3), PhD (8) and DSc (1) Theses

- 2019 A.A. Zaitsev "Investigation of the dissociation of relativistic ^{10}B , ^{11}C and ^{12}C nuclei by the method of nuclear photo emulsion" (PhD)
- 2016 K.Z. Mamatkulov "Investigation of the coherent dissociation of the ^{10}C nucleus at energy of 1.2 GeV per nucleon" (PhD)
- 2015 A.T. Neagu "Analysis of the fragmentation of relativistic light nuclei interactions in nuclear emulsion and the study of cluster structure" (PhD)
- 2014 A.A. Zaitsev "Analysis of exposure of nuclear track emulsion to thermal neutrons" (MS)
- 2010 E. Firu "Clustering and fragmentation in induced nuclear interactions of relativistic radioactive beams" (PhD)
- 2010 D. O. Krivenkov "Investigation of the coherent dissociation of relativistic ^9C nuclei" (PhD)
- 2010 P.I. Zarubin "Clustering of nucleons in the dissociation of light relativistic nuclei" (DSc)
- 2008 T.V. Shchedrina "Investigation of the fragmentation of relativistic nuclei ^{14}N by nuclear photographic emulsion" (PhD)
- 2008 A.T. Neagu "Fragmentation of relativistic nuclei ^{56}Fe in nuclear emulsions irradiated at the Dubna Neutron" (MS)
- 2008 R.Zh. Stanoeva "Study of relativistic fragmentation of ^8B nuclei by the method of nuclear photographic emulsion" (PhD)
- 2007 D.A. Artemenkov "The study of the fragmentation of ^8Be nuclei into alpha-particle pairs in a nuclear photo-emulsion an energy of 1.2 A GeV" (PhD)
- 2005 R.Zh. Stanoeva "Application of method of nuclear photoemulsion for study of multiple fragmentation of relativistic nuclei ^{14}N " (MS)

Recent oral presentation at conferences abroad

- 2019 XXXVI Mazurian Lake Conference on Physics (Piaski, Poland) A.A. Zaitsev
- 2019 Workshop "Light clusters in nuclei and nuclear matter: Nuclear structure and decay, heavy ion collisions, and astrophysics" (Trento, Italy) P.I. Zarubin
- 2018 European Nuclear Physics Conference (Bologna, Italy) A.A. Zaitsev
- 2017 The 27th International Conference on Nuclear Tracks and Radiation Measurements (Strasbourg, France) P.I. Zarubin, I.G. Zarubina



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

2-6 September 2019
ECT* - Villa Tambosi



Nuclear systems are important examples for strongly interacting quantum liquids. New experiments in nuclear physics and observations of compact astrophysical objects require an adequate description of correlations, in particular the formation of clusters and the occurrence of quantum condensates in low-density nuclear systems. Alpha clustering is an important phenomenon in light 4-n self-conjugated nuclei (Hoyle state). New results have been obtained for such nuclei with additional nucleons (e.g. the 9B and $(9-11)\text{Be}$ nuclei). Collective excitations show also effects of α -like clustering. In addition, clustering is of relevance for radioactive decay, alpha preformation and the life-time of heavy nuclei. Cluster formation is essential to investigate nuclear systems in heavy ion collisions. Transport codes have to be worked out to describe the time evolution of correlations and bound states for expanding hot and dense matter. An interesting issue is the BEC-BCS transition in nuclear systems.



TEXAS A&M UNIVERSITY
Cyclotron Institute
College Station, Texas 77843-3366
(979) 845-1415 FAX (979) 845-1899
email: natowitz@comp.tamu.edu

30 Sept. 2019

Dr. Pavel Zarubin
zarubin@lhe.jinr.ru

Dear Pavel

Thank you for sharing your proposal with me. I think it clearly demonstrates that your techniques for studying fragmentation of relativistic nuclei using nuclear emulsions offer some significant possibilities to explore a number of phenomena of current interest. Certainly, tracing the possible existence of condensed states analogous to the Hoyle state in heavier nuclei is an exciting current topic and your method would seem to be ideal for an initial survey of such alpha-clustered states. That you can compete with very highly sophisticated (and very expensive) spectrometers and/or time projection chambers is quite impressive. Given your ability to study a wide range of such light nuclei, this project appears to me to be particularly well motivated.

The multi-fragmentation problem is one with a long history. Here again systematic investigations may reveal new correlations not previously recognized. To me the most interesting possibilities reside in the studies of the peripheral collisions and the possibility to observe the multi-fragmentation in the absence of a very complex collision dynamics. For the same reasons the muon induced fragmentations appear to offer some real advantages and comparing the peripheral interaction results with the muon induced results may offer some new insights into these processes.

It is abundantly clear from your discussion that this endeavor is a labor intensive one and that the requested upgrades to your technical capabilities are well motivated. I certainly hope that you will receive a positive response to this research proposal and that we will see some stimulating new results in the near future.

With best regards,

J. B. Natowitz
University Distinguished Professor, Emeritus

TEXAS A & M UNIVERSITY

Циклотронный институт

Колледж Стейшн, Техас 77843-3366

(979) 845-1415 ФАКС (979) 845-1899

электронная почта: natowitz@comp.tamu.edu

30 сентября 2019 г.

Доктор Павел Зарубин

zarubin@lhe.jinr.ru

Уважаемый Павел

Спасибо, что поделились своим предложением со мной. Я думаю, что это наглядно демонстрирует, что ваши методы изучения фрагментации релятивистских ядер с использованием ядерных эмульсий предлагают некоторые значительные возможности для изучения ряда явлений, представляющих текущий интерес. Конечно, отслеживание возможного существования конденсированных состояний, аналогичных состоянию Хойла, в более тяжелых ядрах является интересной актуальной темой, и ваш метод может показаться идеальным для первоначального обзора таких альфа-кластеризованных состояний. То, что вы можете конкурировать с очень сложными (и очень дорогими) спектрометрами и / или камерами проекционного времени, весьма впечатляет. Учитывая вашу способность изучать широкий спектр таких легких ядер, мне кажется, что этот проект особенно хорошо мотивирован.

Проблема множественной фрагментации имеет долгую историю. Здесь снова систематические исследования могут выявить новые корреляции, ранее не признанные. Для меня наиболее интересные возможности связаны с изучением периферических столкновений и возможностью наблюдать мультифрагментацию при отсутствии очень сложной динамики столкновений. По тем же причинам мюонная индукция, по-видимому, дает некоторые реальные преимущества, и сравнение результатов периферического взаимодействия с результатами, индуцированными мюоном, может дать некоторое новое понимание этих процессов.

Из вашей дискуссии совершенно очевидно, что эта работа является трудоемкой и что запрошенные обновления ваших технических возможностей мотивированы. Я, безусловно, надеюсь, что вы получите положительный ответ на это предложение об исследованиях, и что мы увидим некоторые стимулирующие новые результаты в ближайшем будущем.

С наилучшими пожеланиями,

Дж. Б. Натовиц

Заслуженный почетный профессор университета