



Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ: недавние результаты и развитие

П.И. Зарубин (ЛФВЭ ОИЯИ)

Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ нацелен на решение актуальных проблем физики ядерных кластеров. Используемый метод ядерной эмульсии (ЯЭ) позволяет благодаря уникальной чувствительности и пространственному разрешению изучать в едином подходе множественные конечные состояния, возникающие в диссоциации релятивистских ядер. 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.

Главная задача предстоящего этапа проекта – прояснение связи между возникновением нестабильного 2α -ядра ${}^8\text{Be}$ и 3α -состояния Хойла и множественностью α -ансамблей и поиск на этой основе распадов 4α -состояния ${}^{16}\text{O}(0^+)$. В этой связи эксперимент БЕККЕРЕЛЬ нацелен на измерение множественных каналов фрагментации ядер ${}^{84}\text{Kr}$ до 1 ГэВ на нуклон. Имеется достаточное количество слоев ЯЭ, поперечное сканирование которых на моторизованном микроскопе Olympus BX63 позволяет достичь требуемой статистики.

В продолжение исследования фрагментации легких ядер начат поиск распадов изобар-аналоговых состояний (ИАС). Проявляясь при высокой энергии возбуждения, но также имея весьма малые ширины, ИАС служат “маяками” перестройки структуры в направлении сходства с их менее стабильными изобарами. В контексте $n\alpha$ ВЕС и ИАС продолжится анализ облучения ЯЭ ядрами ${}^9\text{Be}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{22}\text{Ne}$, ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{28}\text{Si}$.

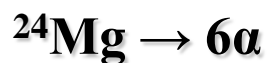


Hair - $60 \mu\text{m}$
AgBr Crystal - $0.2 \mu\text{m}$

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

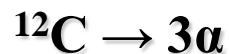
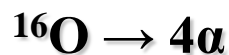
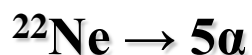
Proton - $10^{-9} \mu\text{m}$

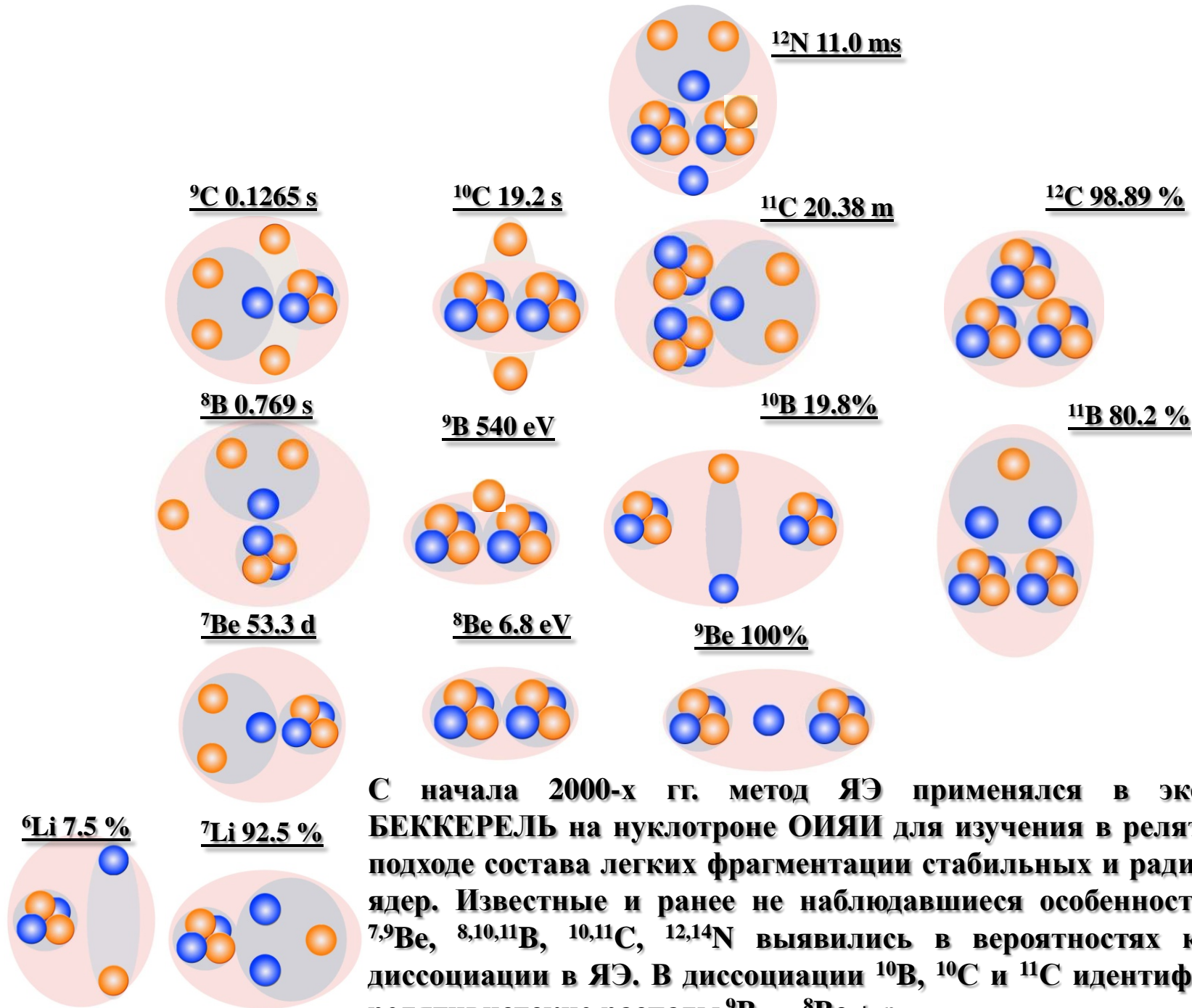




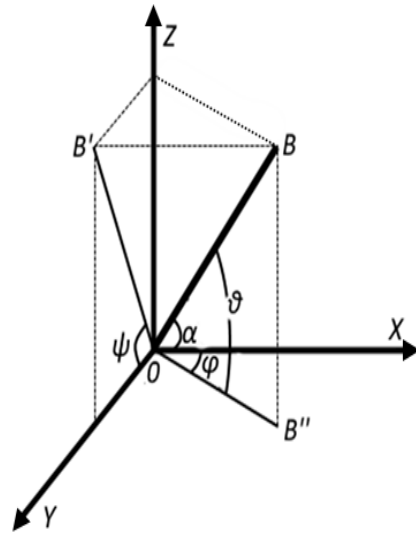
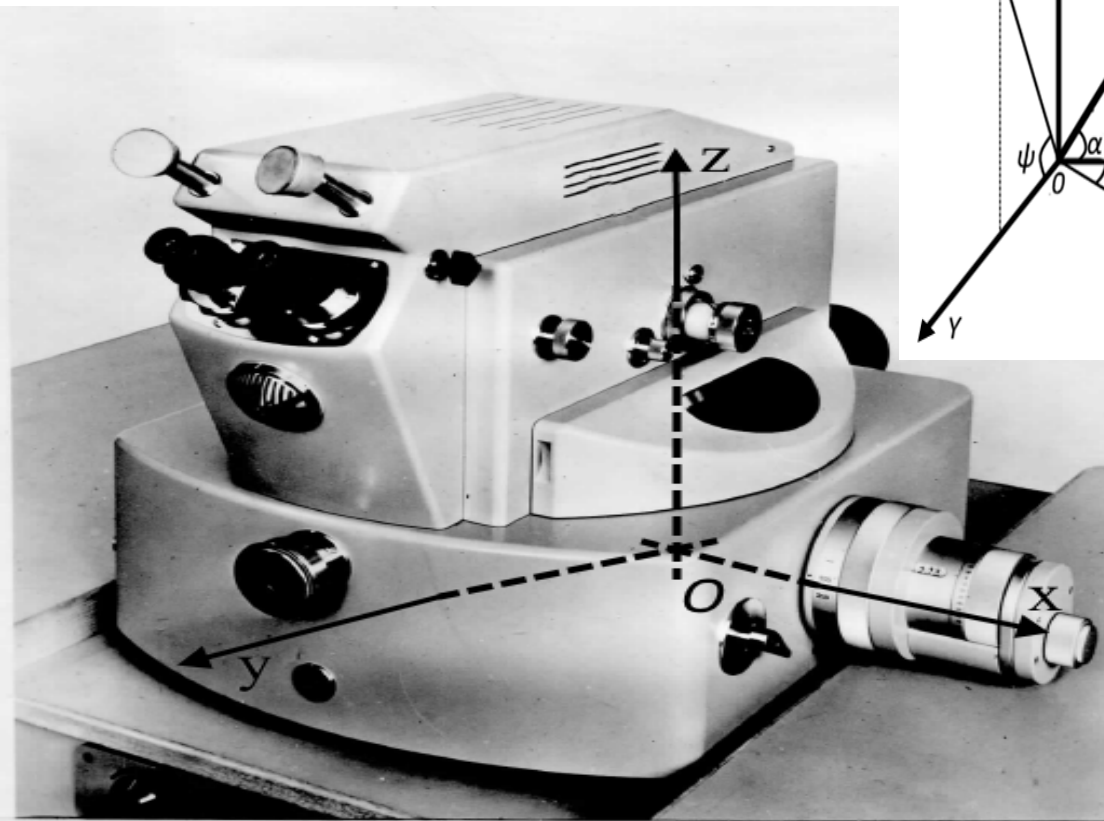
Генерация ансамблей, состоящих из нескольких ядер He и H возможна в периферической диссоциации релятивистских ядер. Потенциально, углубленное изучение их особенностей может пролить свет на актуальные вопросы ядерной физики нескольких тел. В фокусе теоретических разработок находится возможность существования состояний, обладающих выраженной α -конденсатной и ядерно-молекулярной структурой. В свою очередь находки соответствующих лабораторных поисков могли бы быть привлечены для развития многотельных сценариев ядерной астрофизики.

В слоях ЯЭ, продольно облученных релятивистскими ядрами, следы фрагментов могут наблюдаться с исчерпывающей полнотой, а их направления определяться с наилучшим разрешением. Определение инвариантной массы групп релятивистских фрагментов в приближении сохранения скорости начального ядра позволяет спроецировать угловые корреляции фрагментов на энергетический масштаб ядерной физики. Тем самым, на основе релятивистски-инвариантного подхода возникает новая и вместе с тем наглядная возможность экспериментального изучения ансамблей легчайших ядер сразу над порогом связи.





С начала 2000-х гг. метод ЯЭ применялся в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ на нуклотроне ОИЯИ для изучения в релятивистском подходе состава легких фрагментации стабильных и радиоактивных ядер. Известные и ранее не наблюдавшиеся особенности изотопов $^7,^9\text{Be}$, $^{8,10,11}\text{B}$, $^{10,11}\text{C}$, $^{12,14}\text{N}$ выявились в вероятностях каналов их диссоциации в ЯЭ. В диссоциации ^{10}B , ^{10}C и ^{11}C идентифицированы релятивистские распады $^9\text{B} \rightarrow ^8\text{Be} + p$.



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

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

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

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

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

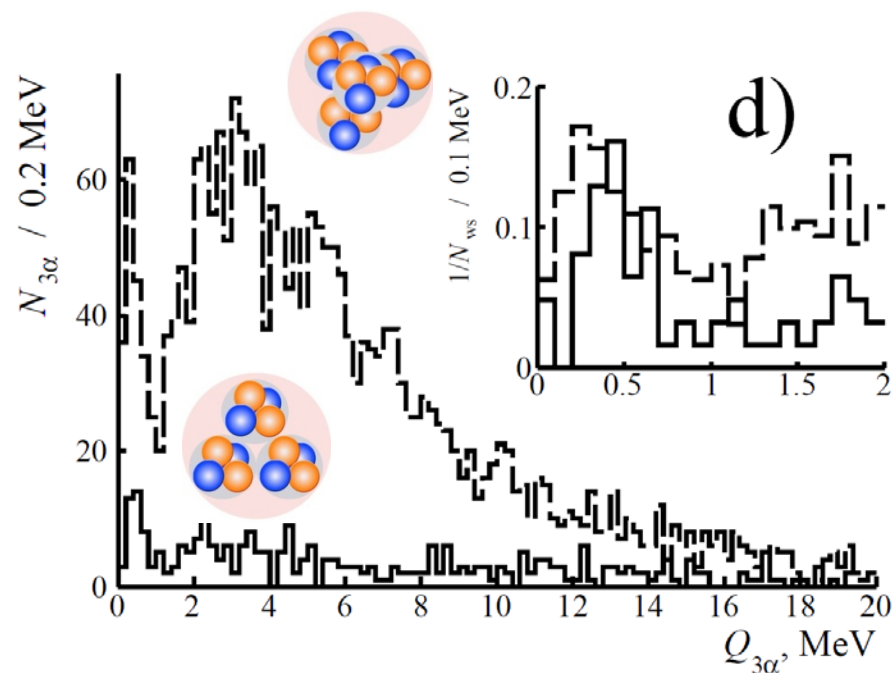
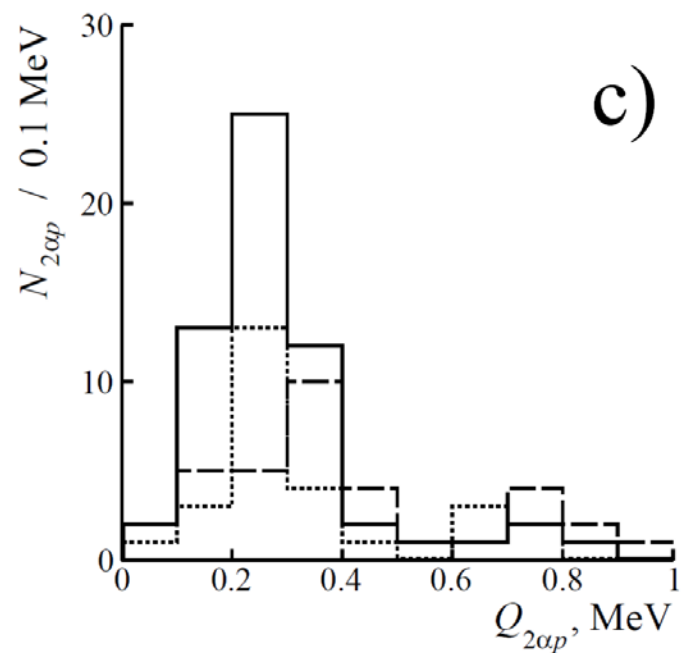
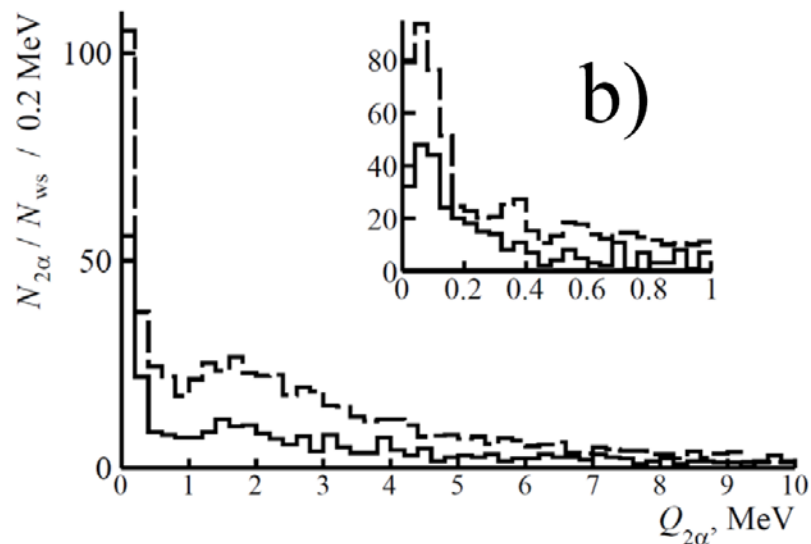
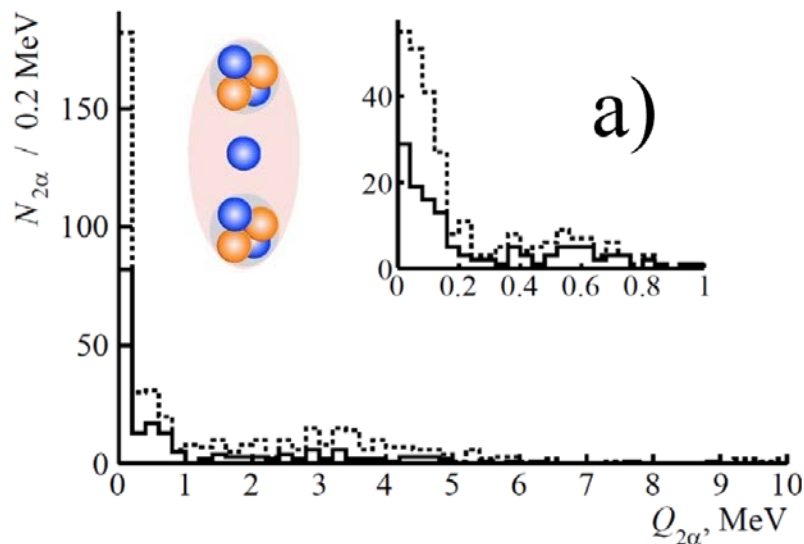
$$\Theta_{2\alpha} = \frac{P_{x1} \cdot P_{x2} + P_{y1} \cdot P_{y2} + P_{z1} \cdot P_{z2}}{P_{tot1} \cdot P_{tot2}}$$

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

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

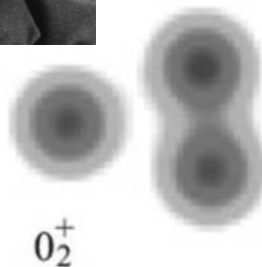
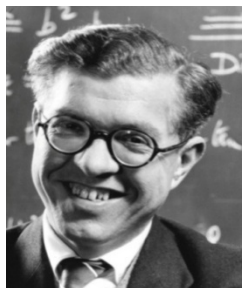
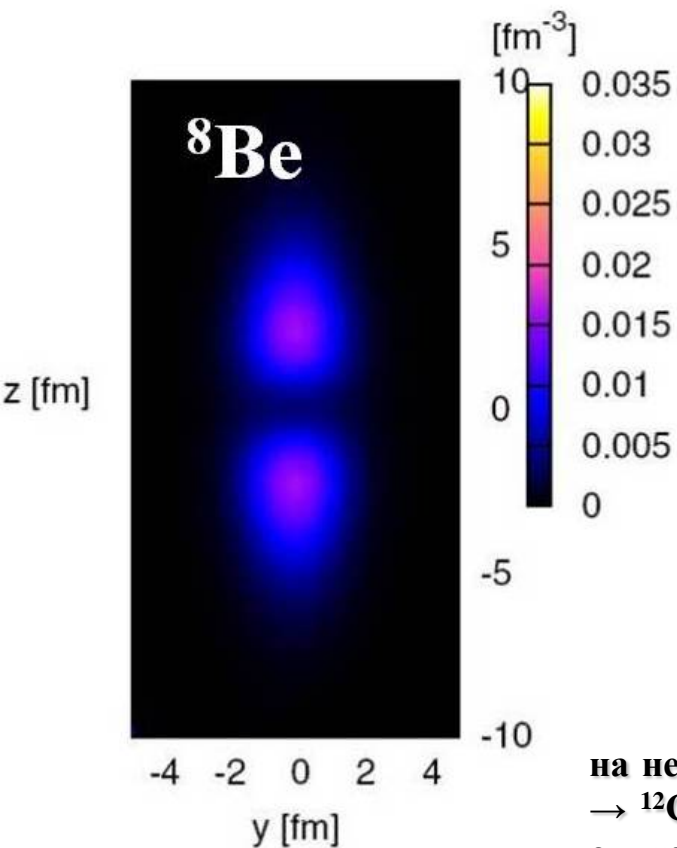
$$Q_{3\alpha} = \sqrt{3 \cdot m_\alpha^2 + 2 \cdot \sum_{i \neq j} (E_{\alpha i} \cdot E_{\alpha j} - \vec{P}_{\alpha i} \cdot \vec{P}_{\alpha j})} - 3 \cdot m_\alpha$$

Инвариантная масса $Q = M^* - M$ задается суммой $M^{*2} = \sum(P_i \cdot P_k)$, где $P_{i,k}$ 4-импульсы фрагментов, а M их масса. Для вычисления инвариантных масс 2 α -пар $Q_{2\alpha}$ и 3 α -троек $Q_{3\alpha}$ в приближении сохранения α -частицами импульса на нуклон первичного ядра использовались только измерения углов их испускания. Предполагается соответствие He - ^4He и H - ^1H , поскольку в случае чрезвычайно узких распадов ^8Be и ^9Be измеренные вклады ^3He и ^2H малы.

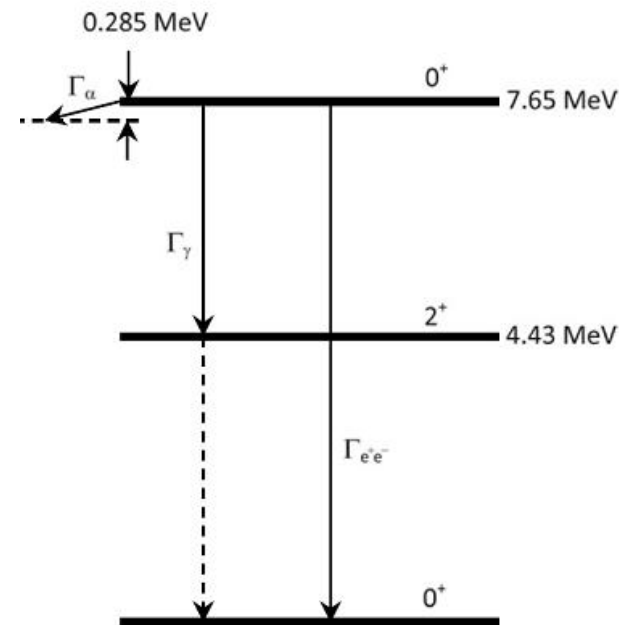


Распределения по инвариантной массе [12]: а) $Q_{2\alpha}$ в ${}^9\text{Be}(1.2 \text{ А ГэВ}) \rightarrow 2\alpha$ (пунктир, сплошная – “белые” звезды; б) $Q_{2\alpha}$ в ${}^{12}\text{C}(3.65 \text{ А ГэВ}) \rightarrow 3\alpha$ (сплошная) и ${}^{16}\text{O}(3.65 \text{ А ГэВ}) \rightarrow 4\alpha$ (пунктир); в) $Q_{2\alpha p} (< 1 \text{ МэВ})$ в ${}^{10}\text{C}(1.2 \text{ А ГэВ}) \rightarrow 2\alpha 2p$ (сплошная) и ${}^{11}\text{C}(1.2 \text{ А ГэВ}) \rightarrow 2\alpha 2p$ (точки) и ${}^{10}\text{B}(1 \text{ А ГэВ}) \rightarrow 2\alpha p$ (пунктир); $Q_{3\alpha}$ в ${}^{12}\text{C}(3.65 \text{ А ГэВ}) \rightarrow 3\alpha$ (сплошная) и ${}^{16}\text{O}(3.65 \text{ А ГэВ}) \rightarrow 4\alpha$ (пунктир).

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 [1]. Состояние HS является вторым (и первым α -несвязанным) возбуждением ядра ${}^{12}\text{C}$ (обзор [2]) 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 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$.



0.093 MeV



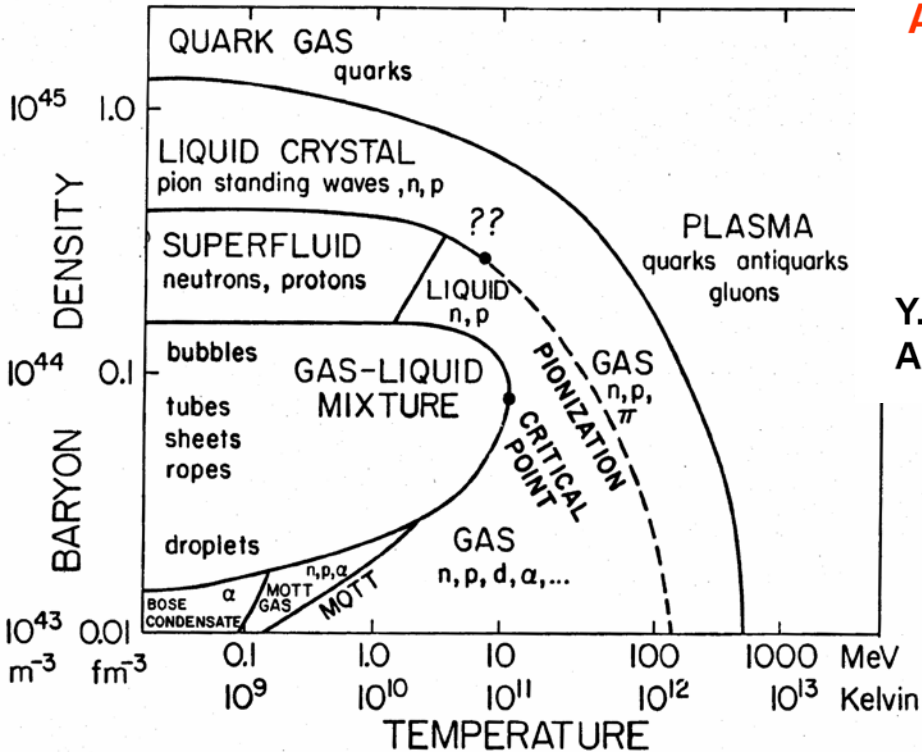
The Hoyle state

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.

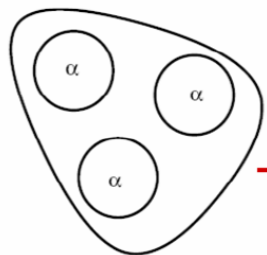
Alpha-Clusters in Nuclear Systems

P. Schuck

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

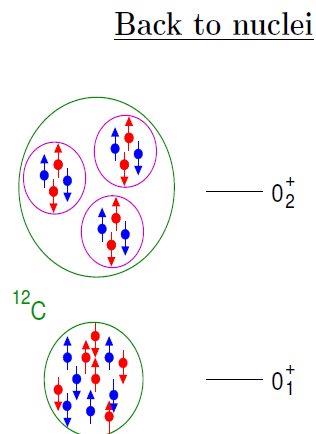
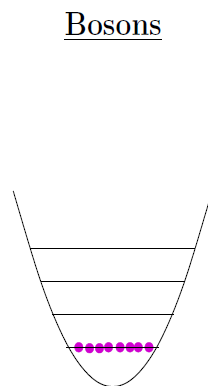


If O_2^+ in ^{12}C dilute α -state

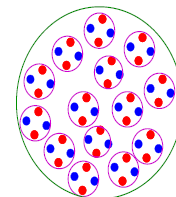


then α -condensate

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

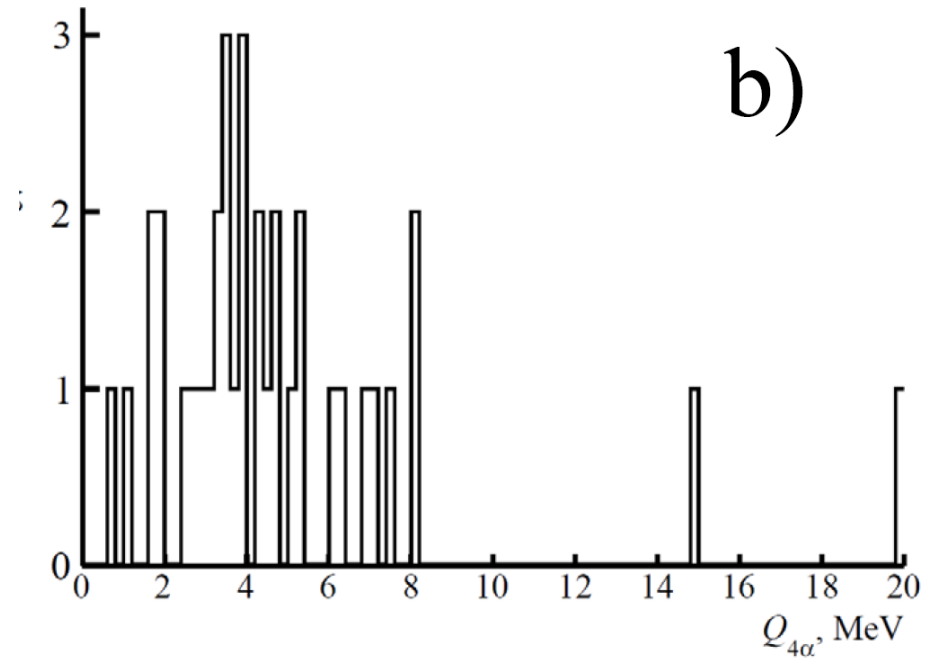
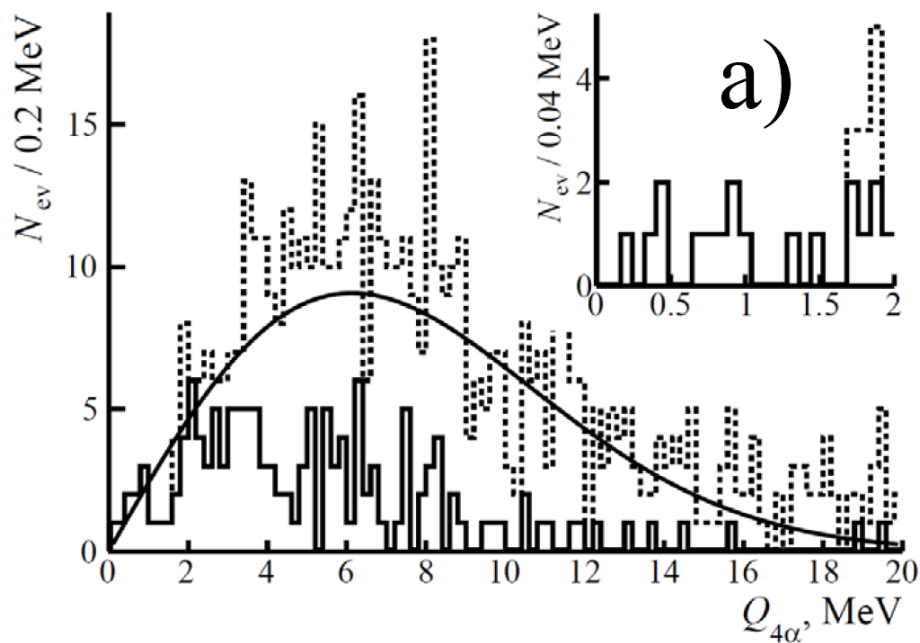


many α 's
→ condensate



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.



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 $N_{\text{HS}}(^{16}\text{O})$.

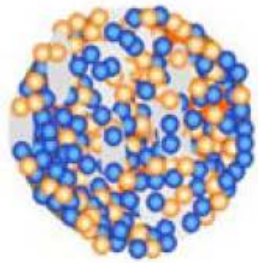
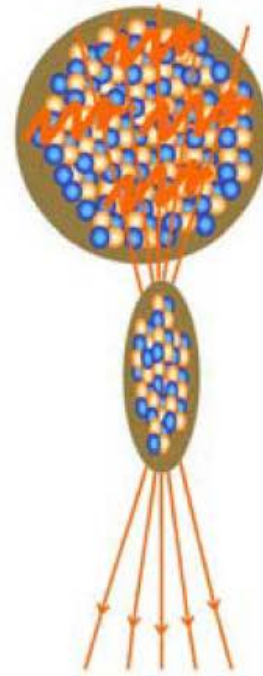
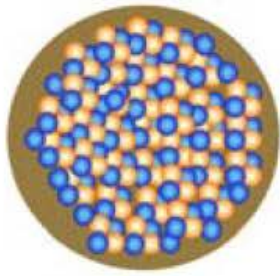
Идентифицированы 33 события $^{16}\text{O} \rightarrow ^{28}\text{Be}$, что составляет $5 \pm 1\%$ “белых” звезд $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$. Тогда статистика $^{16}\text{O} \rightarrow ^{28}\text{Be}$ и $^{16}\text{O} \rightarrow \alpha\text{HS}$ имеет отношение 0.22 ± 0.02 . Распределение по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

Анализ “белых” звезд $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ и $^{16}\text{O} \rightarrow 4$, не сопровождаемых фрагментами мишени, позволил установить, что доля событий, содержащих распады ^8Be (HS) составляет $45 \pm 4\%$ ($11 \pm 3\%$) для ^{12}C и $62 \pm 3\%$ ($22 \pm 2\%$) для ^{16}O . Можно усмотреть, что рост 2α - и 3α -комбинаций усиливает вклад ^8Be и HS. Это наблюдения заслуживает проверки для более тяжелых ядер, когда α -комбинаторика стремительно нарастает с массовым числом.

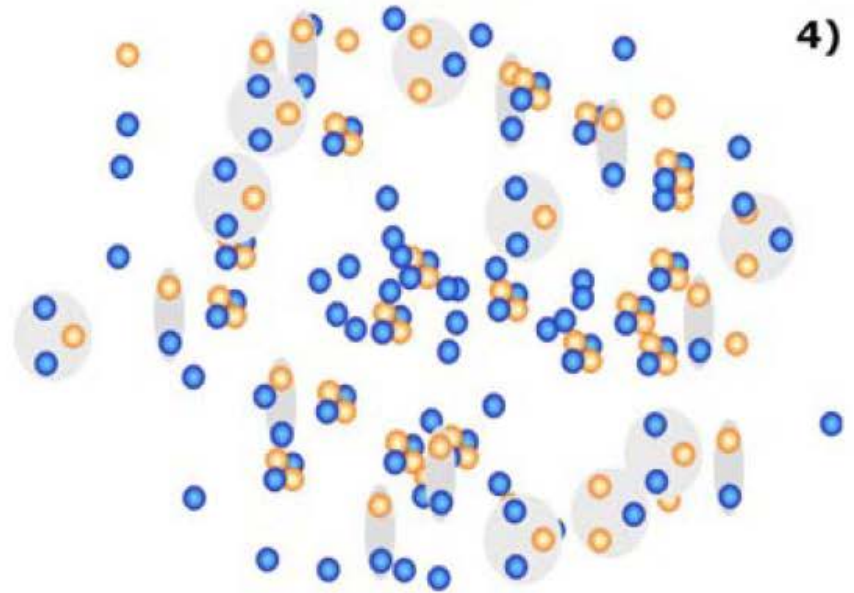
Можно предположить присутствие нестабильных состояний как виртуальных компонент в родительских ядрах, проявляющихся в релятивистской фрагментации. Однако, сохранение такой универсальности с ростом массового числа исследуемых ядер представляется все более проблематичным.

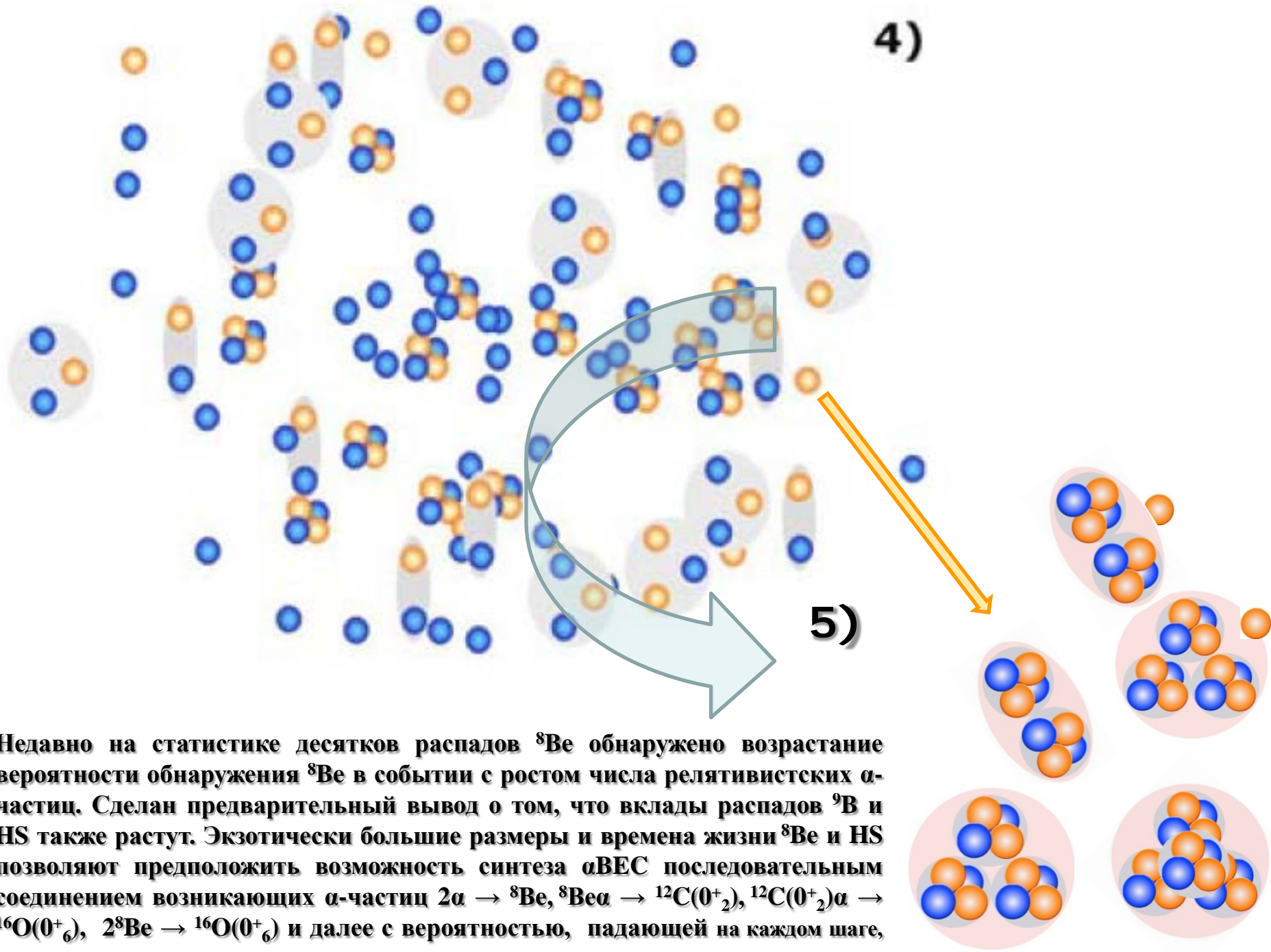
Альтернатива состоит в образовании ^8Be при взаимодействии в конечном состоянии рожденных α -частиц и последующим подхватом сопровождающих α -частиц и нуклонов с испусканием необходимых γ -квантов. Следствием такого сценария стало бы возрастание выхода ^8Be с множественностью α -частиц в событии, а возможно ^9B и HS, распадающихся через ^8Be .

Цель настоящего исследования состоит в выявлении связи между образованием нестабильных состояний и сопровождающей множественностью.



3)





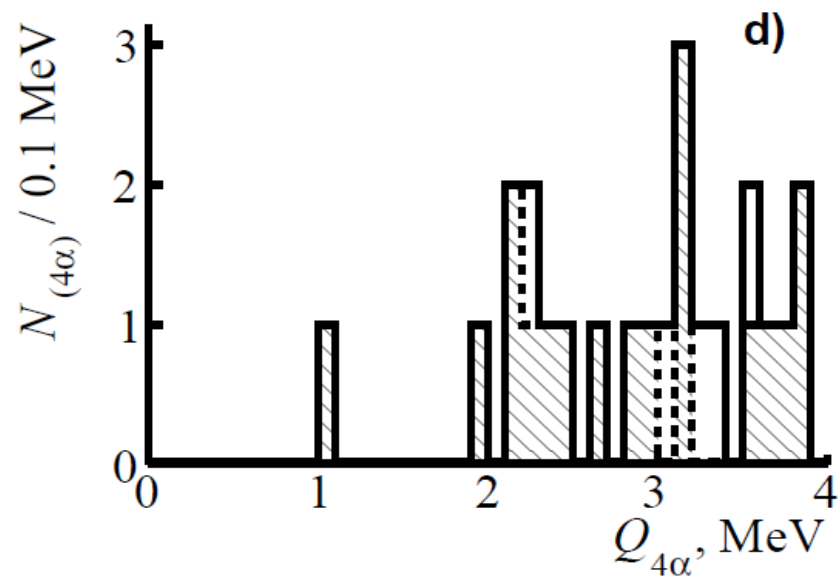
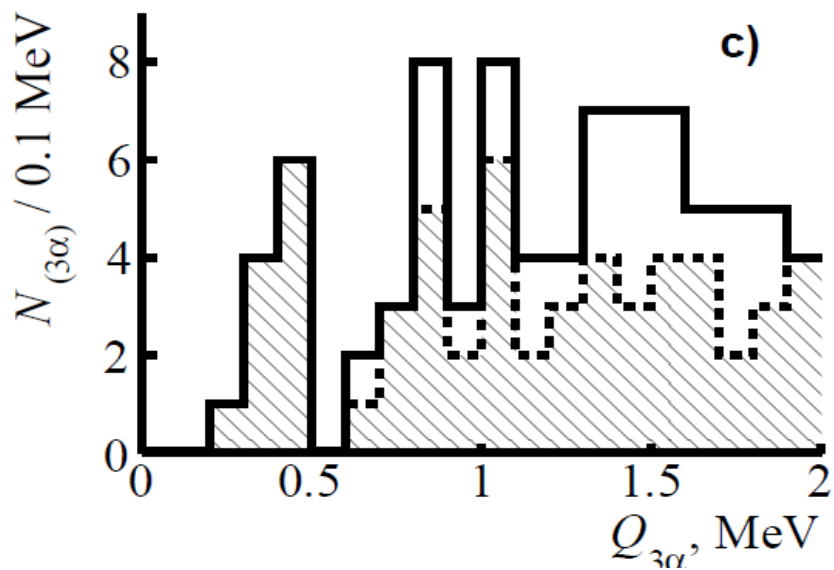
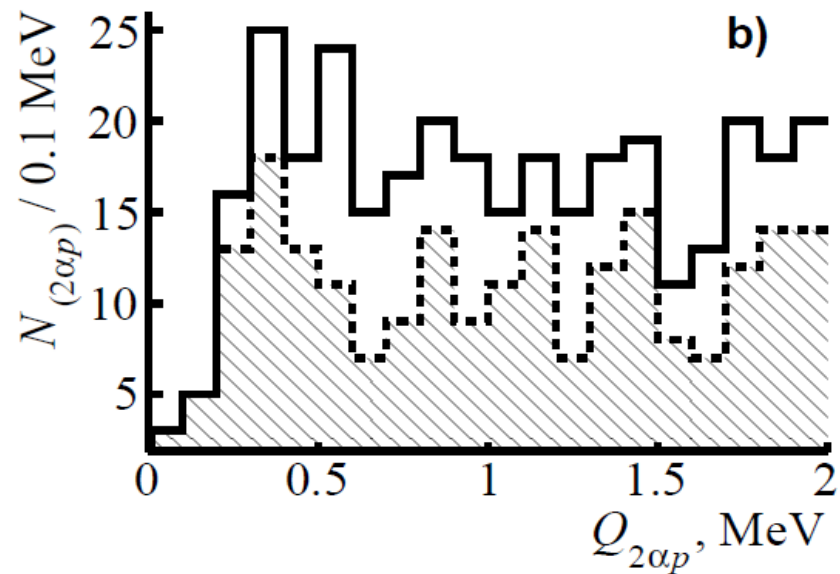
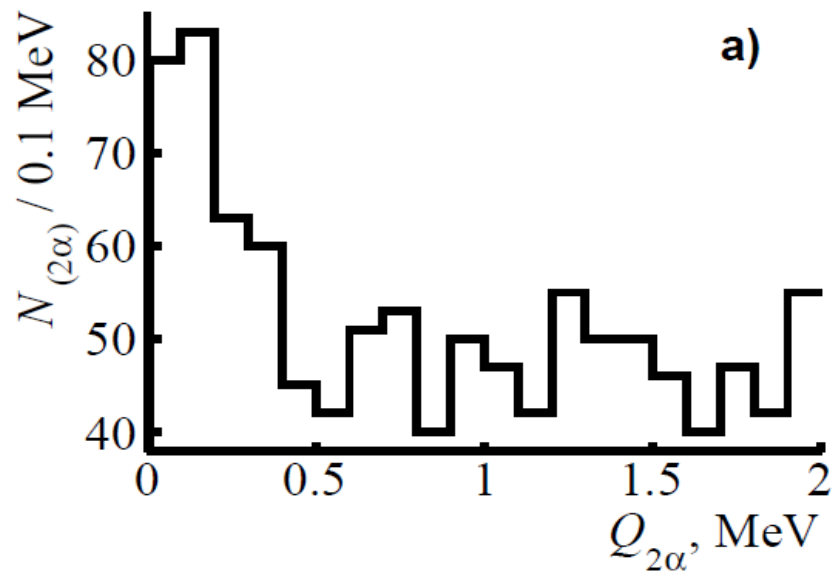
4)

5)

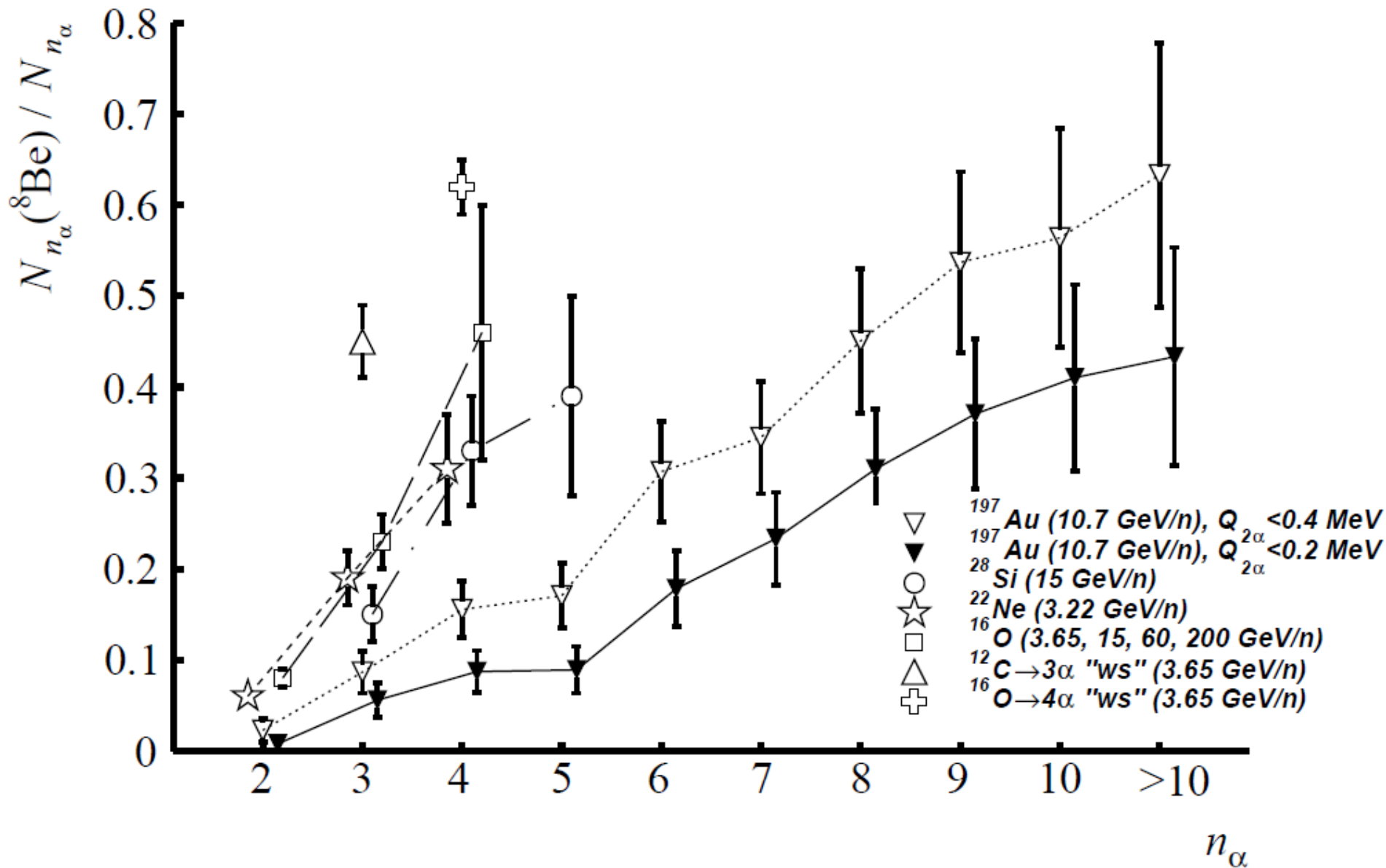
Недавно на статистике десятков распадов ${}^8\text{Be}$ обнаружено возрастание вероятности обнаружения ${}^8\text{Be}$ в событии с ростом числа релятивистских α -частиц. Сделан предварительный вывод о том, что вклады распадов ${}^9\text{Be}$ и HS также растут. Экзотически большие размеры и времена жизни ${}^8\text{Be}$ и HS позволяют предположить возможность синтеза αBEC последовательным соединением возникающих α -частиц $2\alpha \rightarrow {}^8\text{Be}$, ${}^8\text{Be}\alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}(0^+_2)$, ${}^{12}\text{C}(0^+_2)\alpha \rightarrow {}^{16}\text{O}(0^+_6)$, $2{}^8\text{Be} \rightarrow {}^{16}\text{O}(0^+_6)$ и далее с вероятностью, падающей на каждом шаге, при испускании γ -квантов или частиц отдачи.

The image consists of two vertical panels showing a microscopic view of a surface, likely gold (Au), at a high energy of 10.7 GeV per nucleon. The surface is covered with a complex pattern of dark, irregular spots and lines, suggesting a rough or textured surface. A prominent horizontal dark band runs across the middle of both panels. The overall appearance is grainy and detailed, characteristic of a high-resolution micrograph.

Au 10.7 ГэВ/нуклон



Распределения по инвариантным массам Q 2α -пар (а) во фрагментации ядер ^{197}Au , а также $2\alpha p$ -троек (б), 3α -троек (с) и 4α -четверок (д) в событиях с хотя бы одним кандидатом ^8Be согласно $Q_{2\alpha}(^8\text{Be}) \leq 0.4$ МэВ (сплошная) и ≤ 0.2 МэВ (заштриховано).

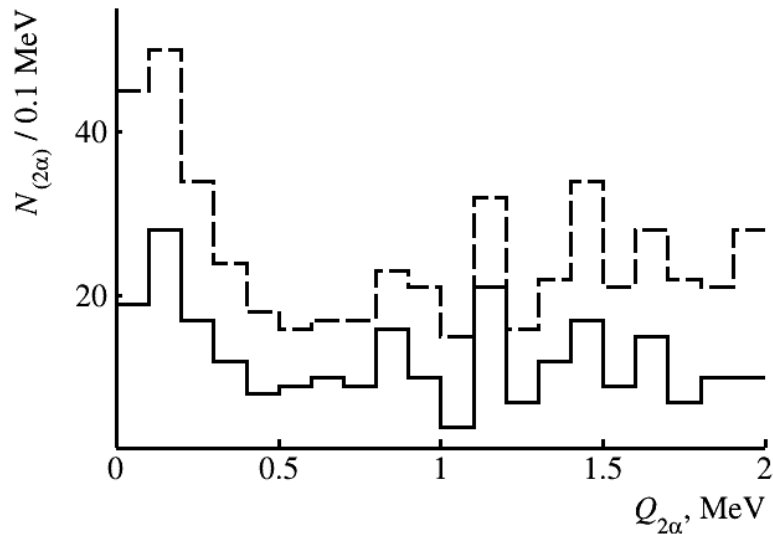


Зависимость относительного вклада распадов $N_{n_\alpha}({}^8\text{Be})$ в статистику N_{n_α} событий с множественностью α -частиц n_α в релятивистской фрагментации ядер C, O, Ne, Si и Au

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

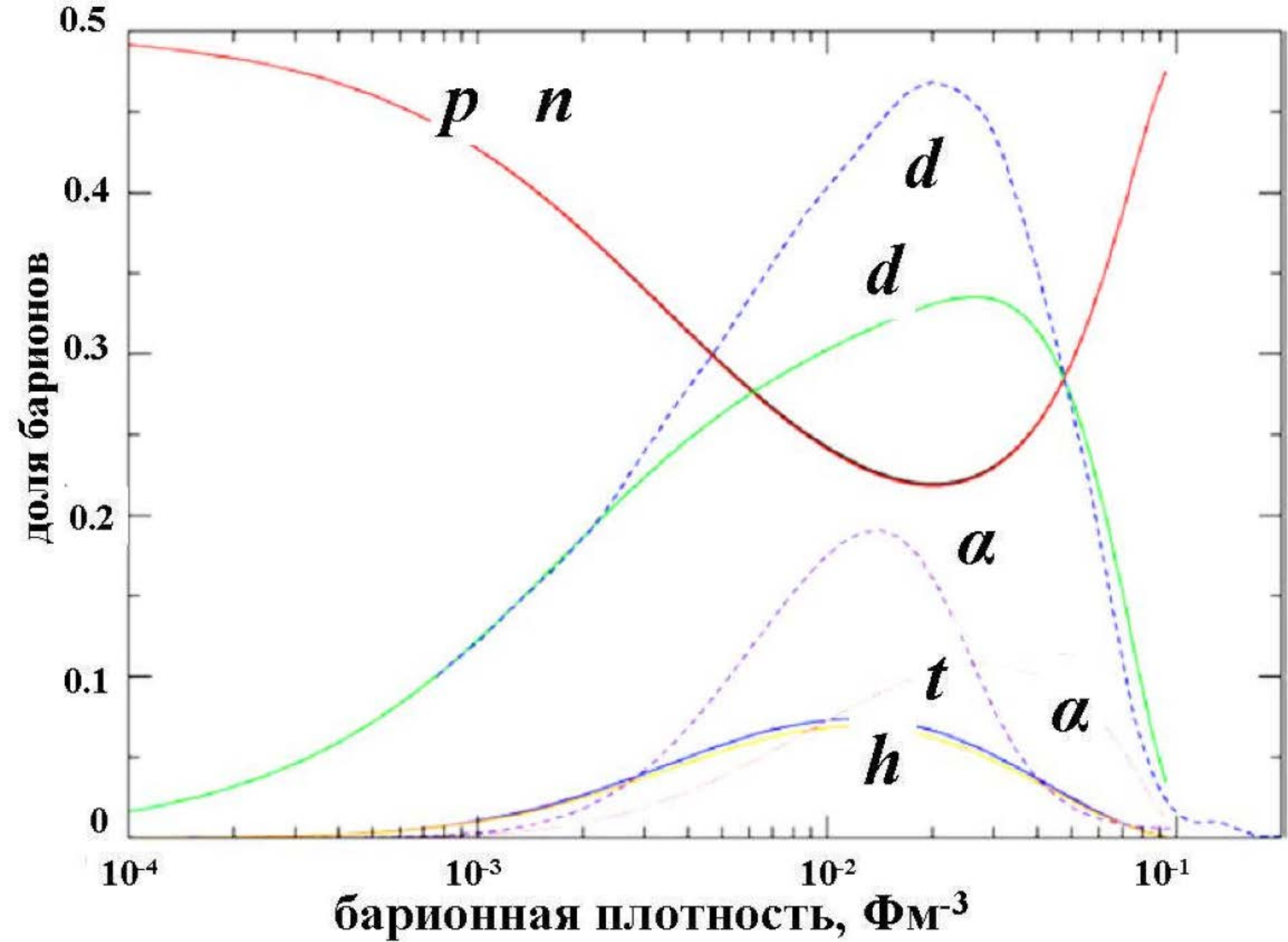
Сейчас статистика событий n_α наращивается путем поперечного сканирования слоев ЯЭ облученных ядрами ^{84}Kr при 950 МэВ/нуклон (ГСИ, начало 90-х). Согласно программе SRIM торможение на длинах до 6 см примерно равномерны и составляют около 9 МэВ/мм (полный пробег около 8 см). Этот эффект может быть учтен по положениям вершин при вычислении инвариантной массы. Кроме того, торможение увеличивает углы испускания фрагментов, делая удобнее измерения. Импульс фрагментов взят с множителем 0.8, чтобы приблизительно учесть сброс начального значения во взаимодействии. Не будучи принципиальной для отбора $Q_{2\alpha}(^8\text{Be}) \leq 0.4$ МэВ, эта поправка позволяет сохранить положение событий в пике O . ($\text{HS} \rightarrow ^8\text{Be}\alpha$).



Распределение 85 событий $n_\alpha > 3$ по $Q_{2\alpha}$. Добавлены ранние измерения 184 взаимодействий $n_\alpha > 3$, для которых информация о положении вершины отсутствует, в предположении энергии 875 МэВ на нуклон. Отношения $N_{n\alpha}(^8\text{Be})$ и $N_{n\alpha}(\%)$ по обем выборкам составляют $n_\alpha = 4$ (24 ± 6), 5 (27 ± 6), 6 (53 ± 15) и сумме $n_\alpha > 6$ (64 ± 14). В новой выборке присутствует событие 2^8Be при $n_\alpha = 6$, изолированное в начальной части спектра $Q_{4\alpha}$ при 0.6 МэВ.

Проблема $4\alpha\text{BEC}$ требует не менее 10-кратного наращивания статистики, что реально с применением моторизованного микроскопа Olympus VX63. На ближайшее время эксперимент БЕККЕРЕЛЬ сосредотачивается на анализе облучения ядрами ^{84}Kr при энергии 950 МэВ на нуклон для исследования усиления и поиска неизвестных нестабильных состояний. Ускорение накопления статистики событий множественной α -частичной фрагментации обеспечивается поперечным сканированием слоев ЯЭ. Коррекция на торможение при вычислении инвариантной массы происходит согласно положению вершин, чтобы использовать большую часть объема ЯЭ. Как развитие крайне желательно облучение ЯЭ наиболее тяжелыми ядрами энергией несколько ГэВ на нуклон.



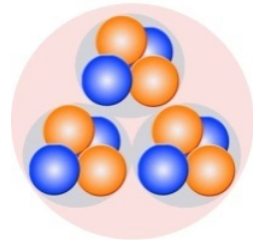


Isotope → Channel (Threshold, MeV)

E_x (MeV \pm keV)	J^π	τ_m or Γ_{cm}
$^{10}\text{B} \rightarrow ^6\text{Li}+\alpha$ (4.5)	$^8\text{Be}+d$ (6.027)	$^9\text{Be}+p$ (6.6) $^9\text{B}+n$ (8.4)
4.8 ± 0.5	3^+	7.8 ± 1.2 eV
5.1 ± 0.6	2^-	1.0 ± 0.07 keV
5.2 ± 0.6	2^+	1.8 ± 0.4 eV
6.025 ± 0.6	4^+	52 ± 18 eV
6.13 ± 0.7	3^-	1.52 ± 9.88 keV
$^{11}\text{B} \rightarrow ^7\text{Li}+\alpha$ (8.7)	$^8\text{Be}+t$ (11.2)	$^{10}\text{Be}+p$ (11.2) $^{10}\text{B}+n$ (11.5)
8.9 ± 0.11	$5/2^-$	4.374 ± 0.023 eV
9.2 ± 1.0	$7/2^+$	$1.8^{+1.5}_{-1.1}$ eV
$^{11}\text{C} \rightarrow ^7\text{Be}+\alpha$ (7.5)	$^8\text{Be}+^3\text{He}$ (9.2)	$^{10}\text{B}+p$ (8.7) $^{10}\text{C}+n$ (13.1)
8.1 ± 1.7	$3/2^-$	6^{+12}_{-2} eV
8.4 ± 2	$5/2^-$	0.030 ± 0.008 fs

Isotope → Channel (Threshold, MeV)

E_x (MeV \pm keV)	J^π	τ_m or Γ_{cm}
$^{12}\text{C} \rightarrow ^8\text{Be} + \alpha$ (7.4)	$^{11}\text{B}+p$ (16.0)	$^{11}\text{C}+n$ (18.7)
7.7 ± 0.19	0^+	9.3 ± 0.9 eV
$^{16}\text{O} \rightarrow ^{12}\text{C}+\alpha$ (7.2)	$^{15}\text{N}+p$ (12.1)	$^{15}\text{O}+n$ (15.7)
8.9 ± 0.5	2^-	180 ± 16 fsec
9.9 ± 0.5	2^+	62 ± 0.10 eV
$^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{16}\text{O}+\alpha$ (4.7)	$^{19}\text{F}+p$ (12.8)	$^{19}\text{Ne}+n$ (17.9)
5.6 ± 1.7	3^-	200 ± 50 fs
5.8 ± 2.6	1^-	28 ± 3 eV
8.6 ± 4	5^-	13 ± 4 eV



TUNL Nuclear Data Evaluation Project:

^{14}N

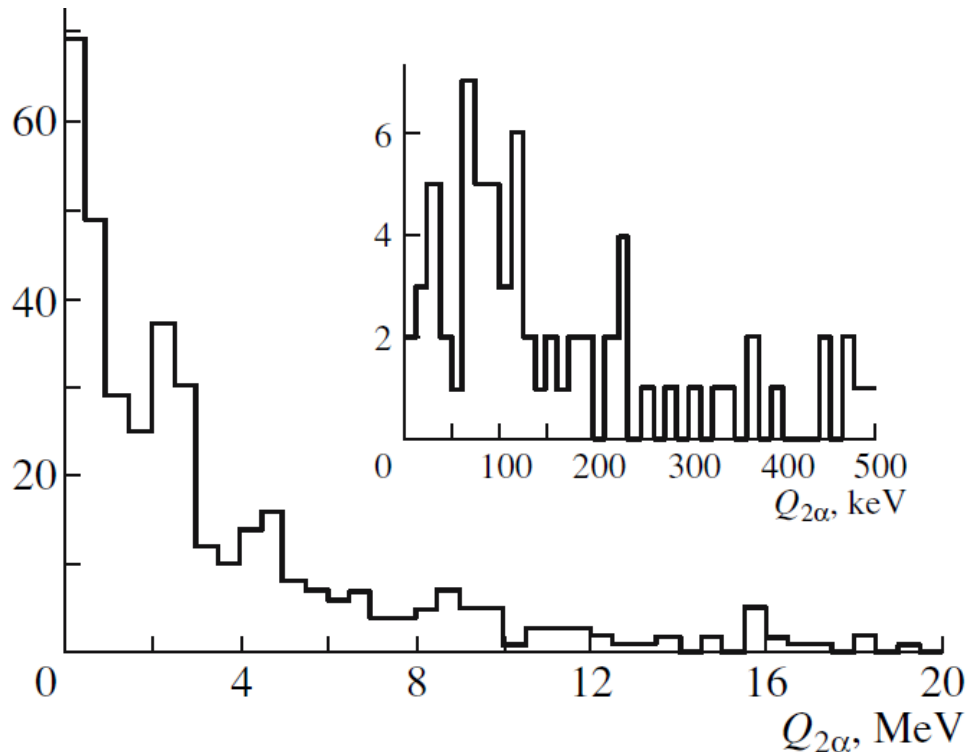
V

 $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{HeH}$ 

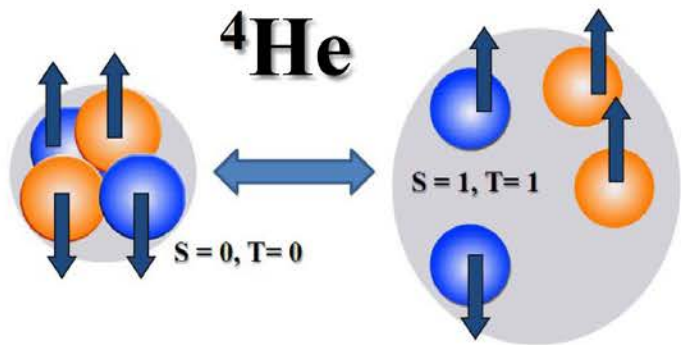
H

2He

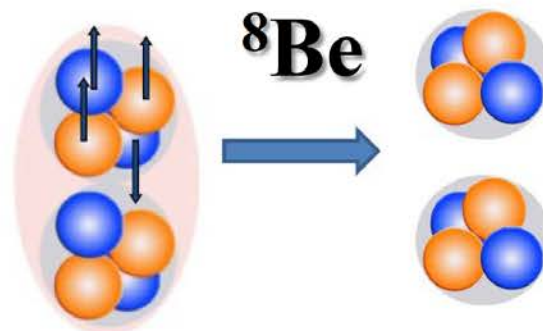
He



В настоящее время внимание сосредоточено на слоях ЯЭ, облученные на нуклотроне ОИЯИ ядрами ^{14}N с энергией 2.0 ГэВ на нуклон. Ранее при прослеживании следов ^{14}N установлено распределение по каналам с фрагментами примерным сохранением заряда и выявлено лидерование среди них канала 3HeH . Статистика событий, увеличенная путем поперечного сканирования, дала 25-30% распадов $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ [4]. Имеющаяся статистика событий $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He}$ при 1 ГэВ на нуклон позволяет выполнить сравнение соседних нечетно-нечетных ядер ^{14}N и ^{10}B , включая вклады ^8Be и ^9B .



a)

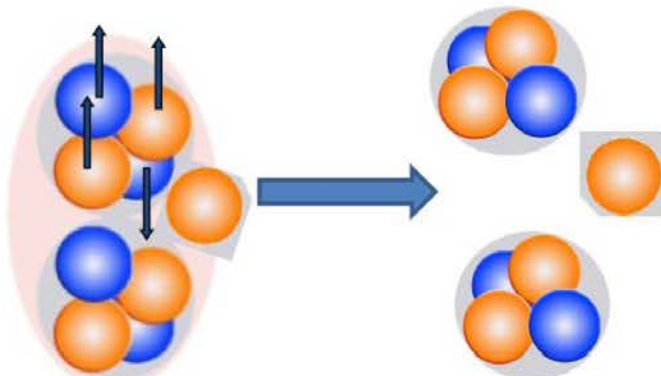


b)

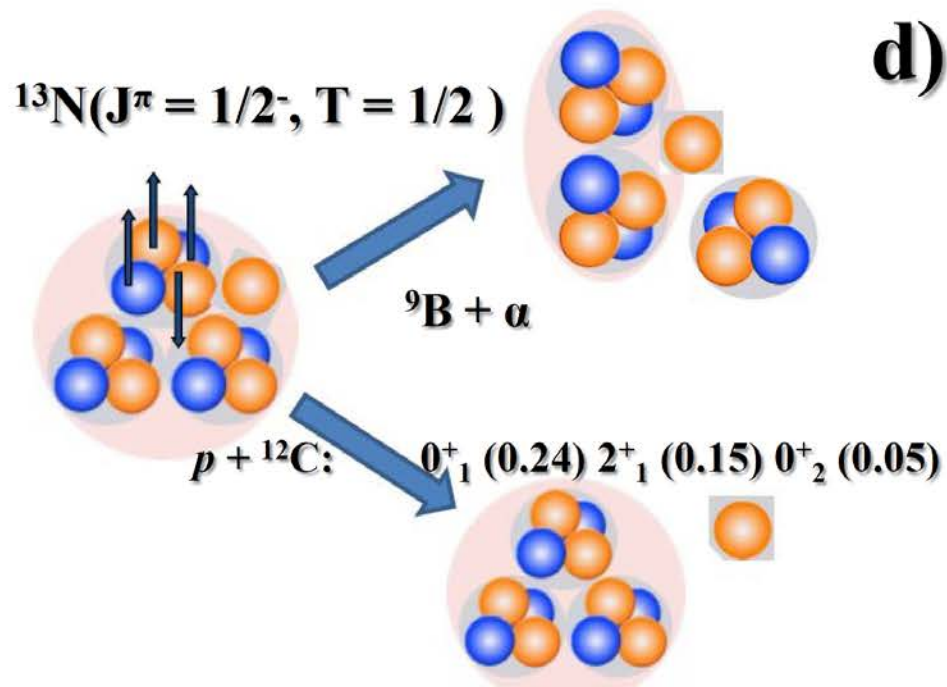
$^8\text{B}^*(16.6 + 16.9, 108 + 74 \text{ keV. } J^\pi = 2^+, T = 0 + 1)$

c)

$^9\text{B}^*(14.655, 0.395 \text{ keV. } J^\pi = 3/2^-, T = 3/2)$

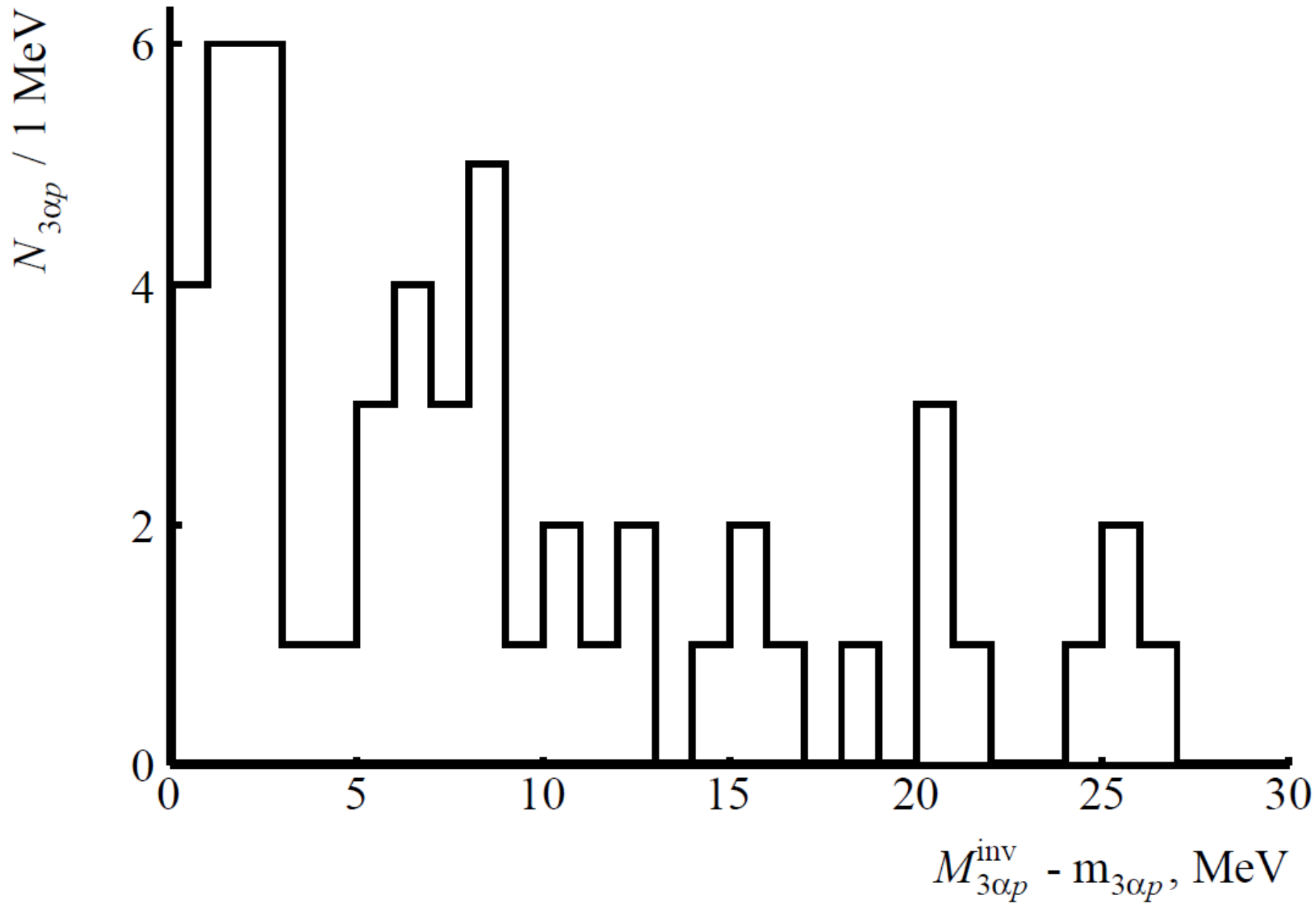


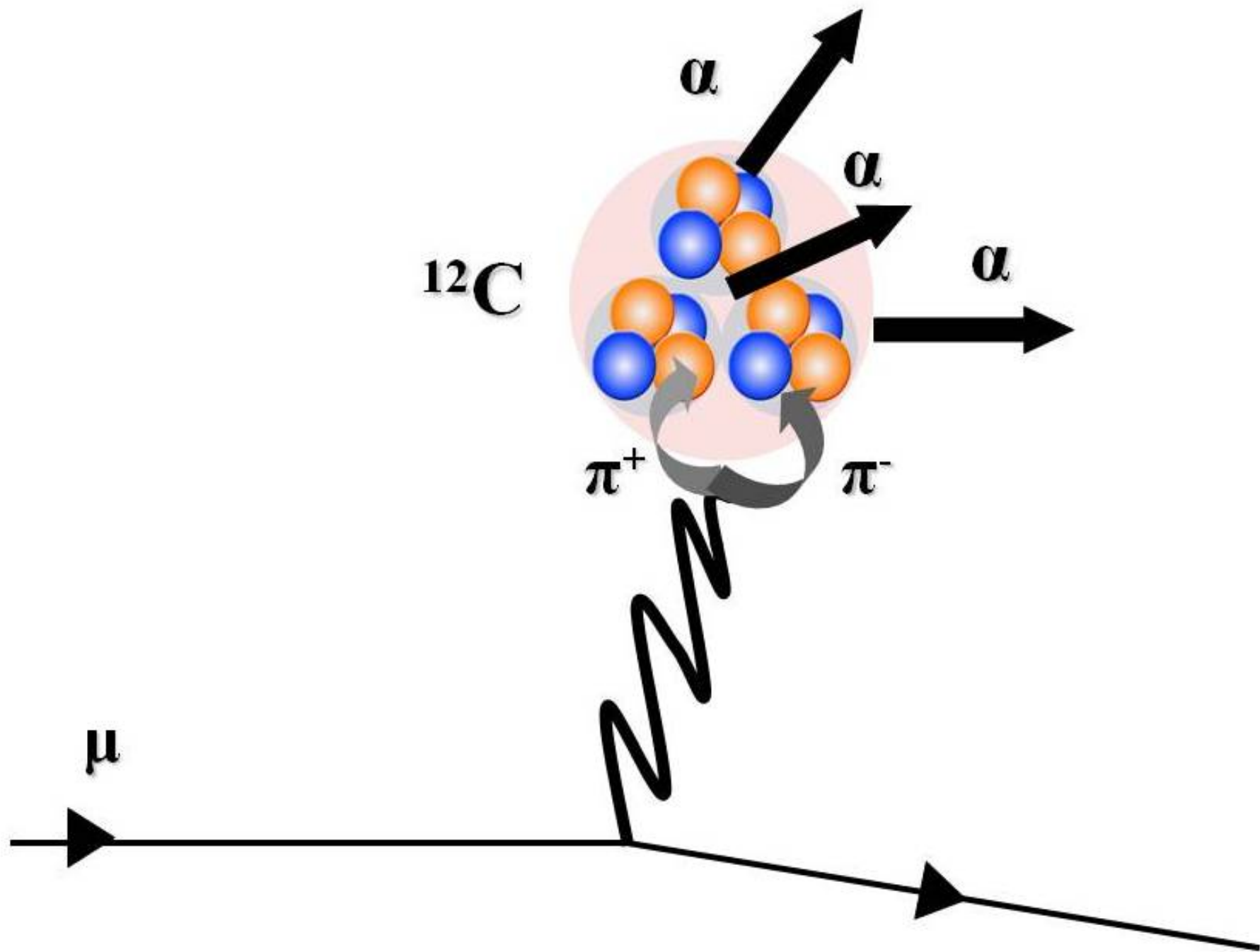
$^9\text{B}(J^\pi = 1/2^-, T = 1/2)$



d)

$^{13}\text{N}^*(15.065, 0.86 \text{ keV. } J^\pi = 3/2^-, T = 3/2)$





Ожидаемые результаты и их значимость

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

Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ сосредотачивается на фрагментации ядер ^{84}Kr при энергии до 950 МэВ на нуклон для исследования динамики возникновений ядра ^8Be и состоянии Хойла и поиска распадающихся через них α -частичного конденсата. Основу для выводов составит статистика порядка 1000 измеренных событий с числом релятивистских α -частиц свыше трех.

Будет использован моторизованный микроскоп Olympus VX63, освоение возможностей которого станет особым методическим вызовом.

Будет получен ответ на вопрос об универсальном характере образования троек α -частиц в состоянии Хойла в диссоциации ядер ^{14}N и ^{28}Si . Будет исследована возможность возникновения изобар-аналоговых состояний во фрагментации легких ядер.


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

[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 

Chapter

18

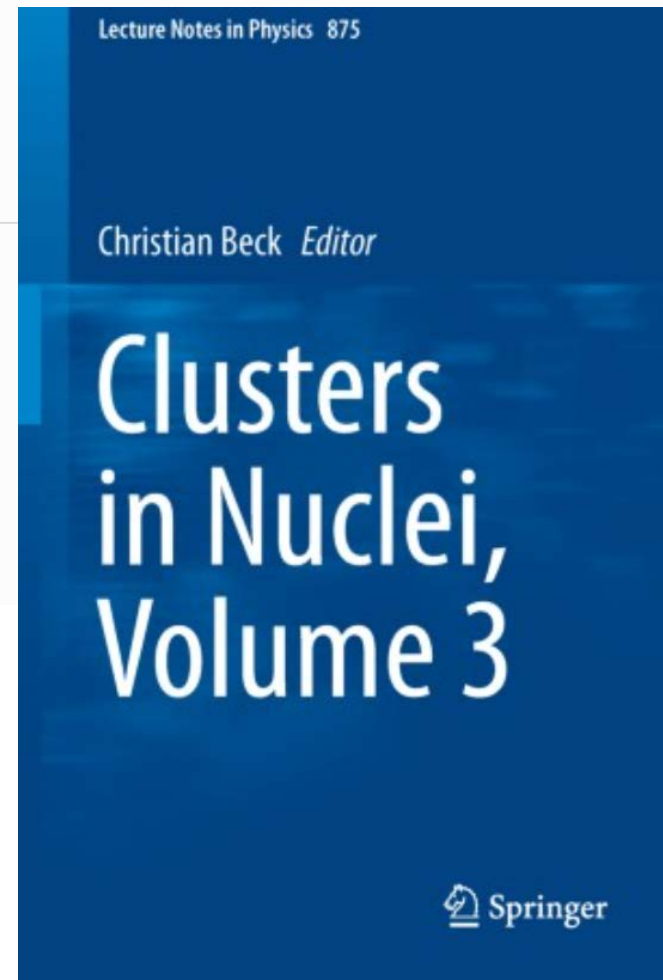
Citations

1

Mentions

1k

Downloads



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

2

Citations

613

Downloads

Springer Proceedings in Physics 238

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

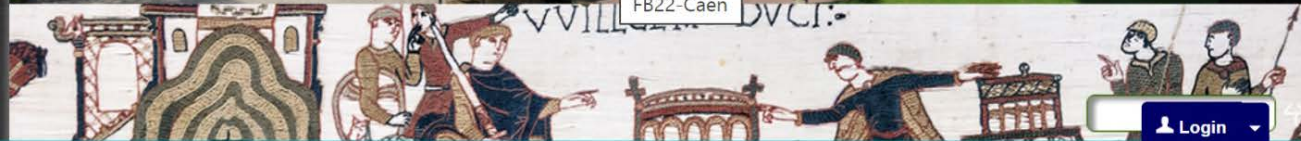
FB22

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

9-13 JULY 2018-Caen, France



FB22-Caen



**Recent Progress
in Few-Body
Physics**

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

[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](#)

289 Accesses | **2** Citations | [Metrics](#)





Physics Letters B

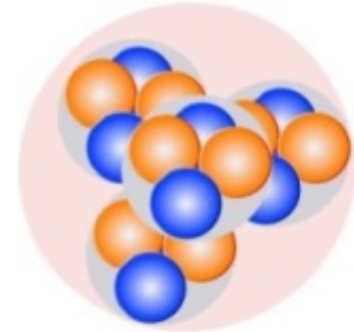
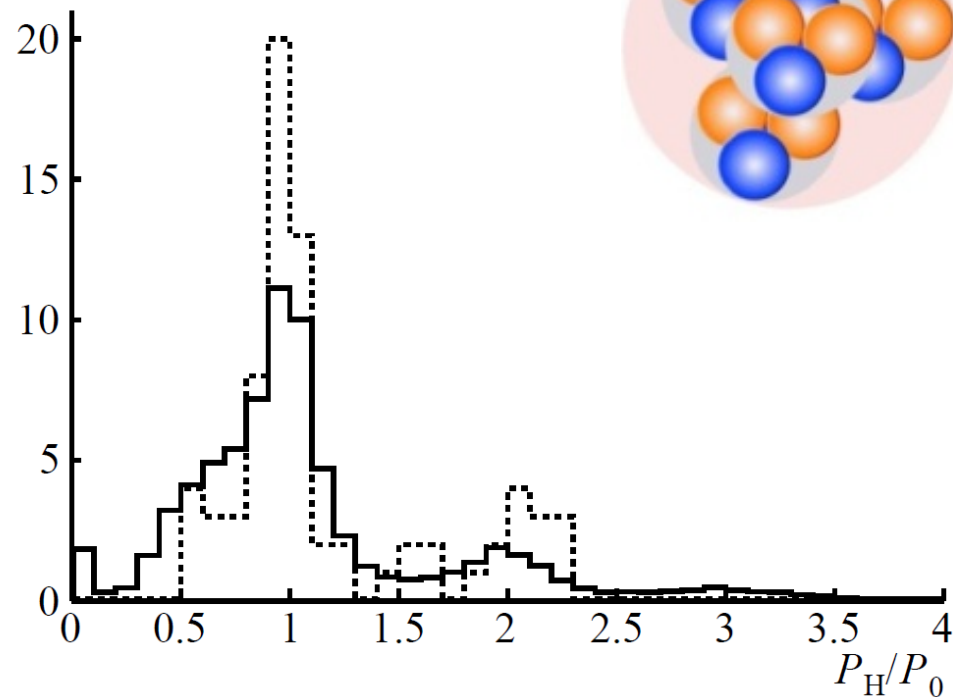
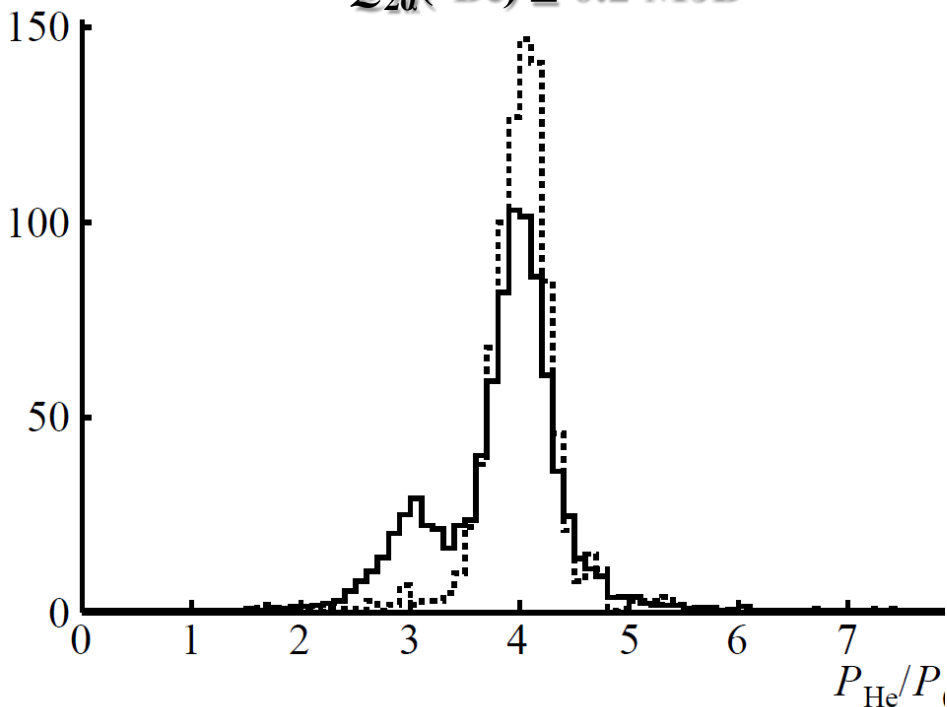
Volume 820, 10 September 2021, 136460



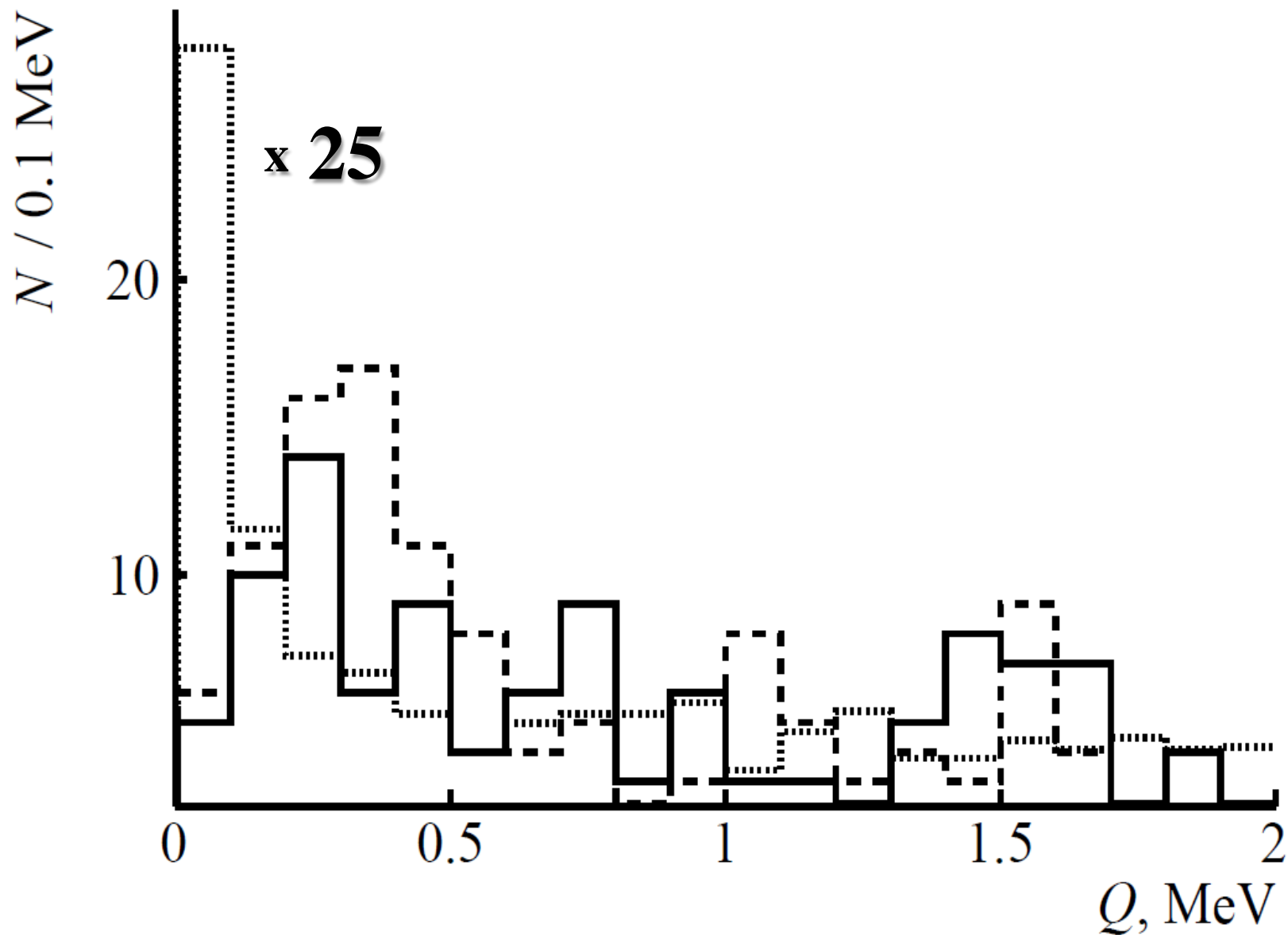
Correlation in formation of ^8Be nuclei and α -particles in fragmentation of relativistic nuclei

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}

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



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 $Q_{2\alpha}({}^8\text{Be}) \leq 0.2$ МэВ удаляет вклад ${}^3\text{He}$, а вклад протонов составляет 90% среди фрагментов H.



Распределение событий фрагментации ядер ^{16}O с импульсом 2.4 ГэВ/нуклон на протонах по инвариантным массам всех 2α -пар $Q_{2\alpha}$ (точки), 2α -троек $Q_{2\alpha\alpha}$ (пунктир) и 3α -троек $Q_{3\alpha}$ (сплошная).

Further along the cliff of the proton stability of nuclei

^{20}Mg 95 ms



^{20}Na 448 ms

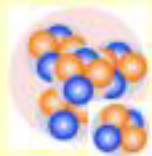
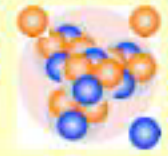
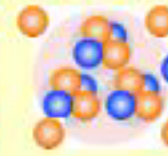
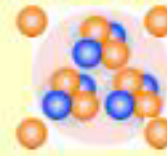


^{16}Ne 0.122 MeV

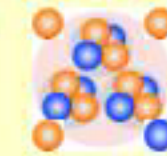
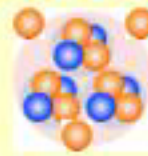
^{17}Ne 109 s

^{18}Ne 1.67 s

^{19}Ne 17.2 s



^{15}F 1 MeV

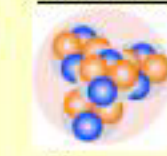
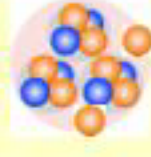
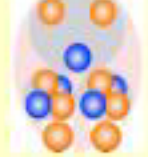
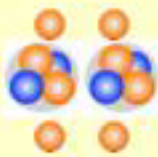


^{20}Ne 90.48%

^{12}O 0.4 MeV

^{13}O 8.58 ms

^{14}O 70.6 s



^{16}F 0.04 MeV

^{17}F 64.5 s

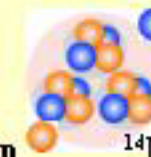
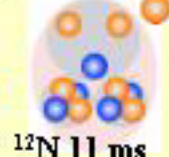
^{18}F 110 min

^{19}F 100%

^{15}O 122 s

^{16}O 99.8%

^{11}N 1.58 MeV



^{12}N 11 ms

^{13}N 10 min

^{14}N 99.6%