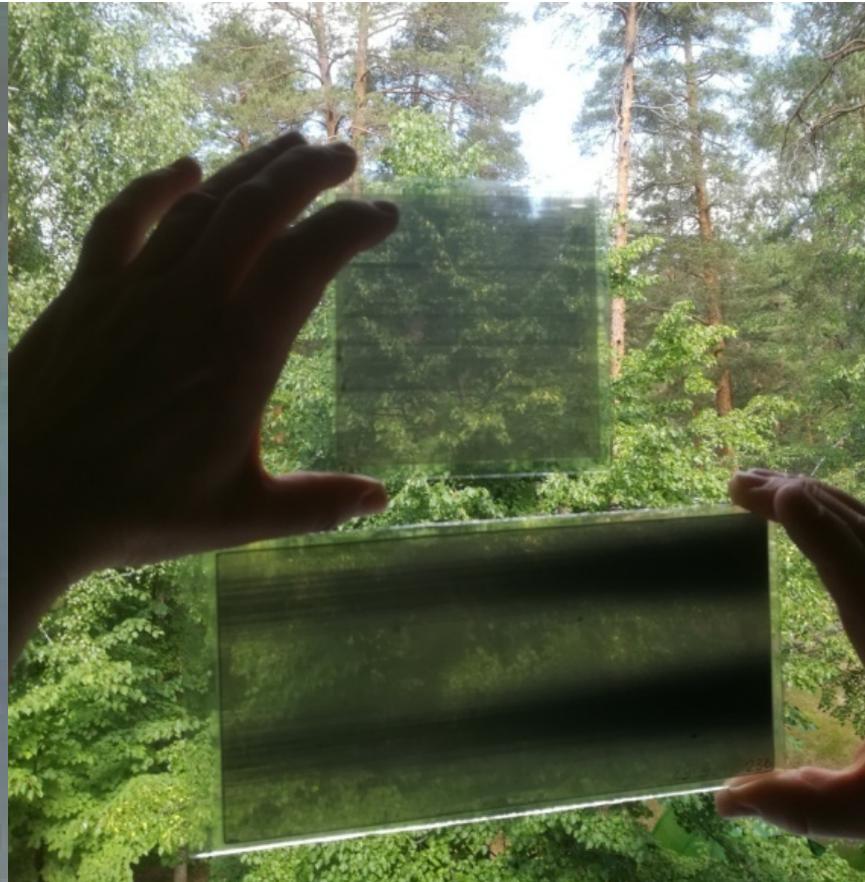




Исследование нестабильных состояний во фрагментации релятивистских ядер

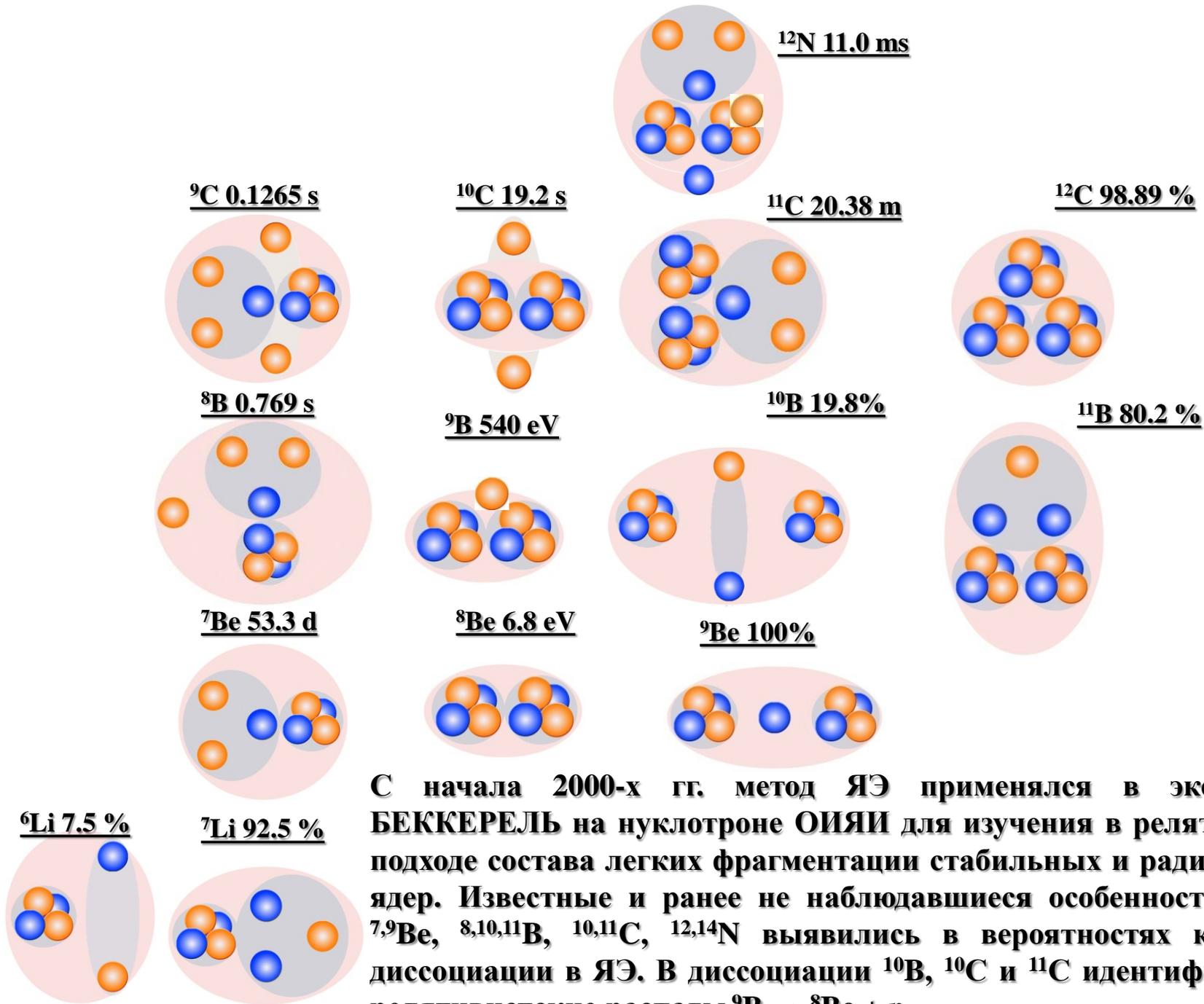
А.А. Зайцев (ЛФВЭ, ОИЯИ)

Представлена идентификация ядер ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$ и состояния Хойла (HS) в релятивистской диссоциации изотопов ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{10}\text{C}$, ${}^{11}\text{C}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$ и ${}^{16}\text{O}$ в ядерной эмульсии. Для идентификации распадов этих крайне короткоживущих достаточно определение инвариантной массы как функции углов в парах и тройках фрагментов He и H в приближении сохранения импульса на нуклон родительского ядра. Исследуется корреляция между образованием ядер ${}^8\text{Be}$ и множественностью сопровождающих α -частиц в диссоциации релятивистских ядер ${}^{16}\text{O}$, ${}^{22}\text{Ne}$, ${}^{28}\text{Si}$ и ${}^{197}\text{Au}$. Обнаружено усиление вклада ${}^8\text{Be}$ в диссоциацию с множественностью α -частиц. Той же тенденции следуют распады ядер ${}^9\text{B}$ и состояния Хойла.



	Square	Capacity	Readout speed
DVD disk	111 cm ²	8.5 GB	≤266 Mbps
Blue-ray disk	111 cm ²	50 GB	≤576 Mbps
Emulsion film	125 cm ²	1-10 TB	>1 Gbps





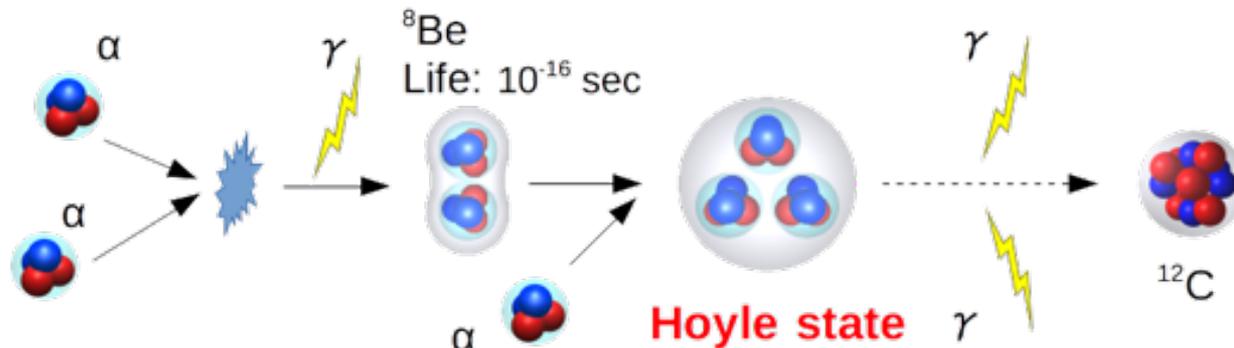
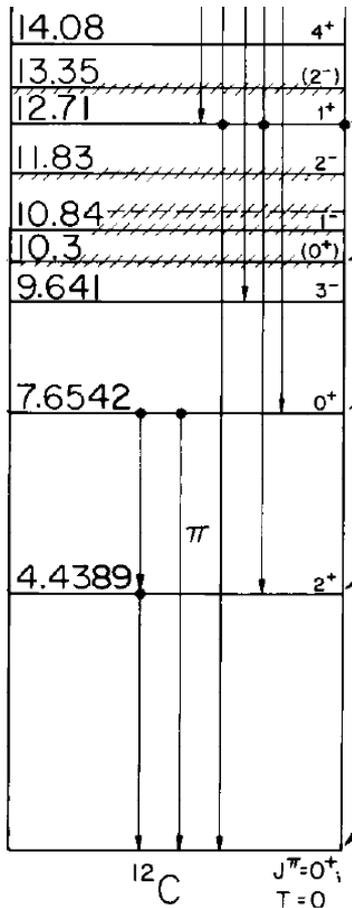
С начала 2000-х гг. метод ЯЭ применялся в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ на нуклотроне ОИЯИ для изучения в релятивистском подходе состава легких фрагментации стабильных и радиоактивных ядер. Известные и ранее не наблюдавшиеся особенности изотопов $^7,^9\text{Be}$, $^{8,10,11}\text{B}$, $^{10,11}\text{C}$, $^{12,14}\text{N}$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

ON NUCLEAR REACTIONS OCCURRING IN VERY HOT STARS. I. THE SYNTHESIS OF ELEMENTS FROM CARBON TO NICKEL

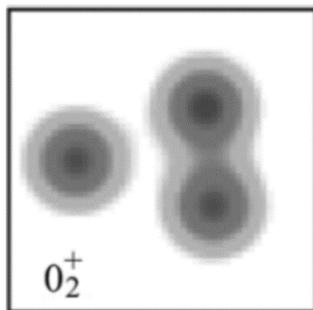
F. HOYLE*

MOUNT WILSON AND PALOMAR OBSERVATORIES
 CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON
 CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

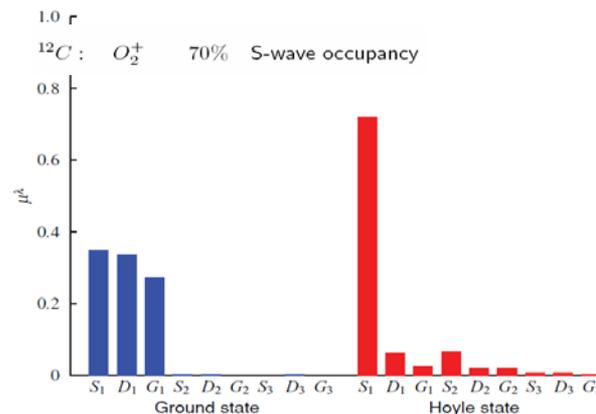
Received December 22, 1953



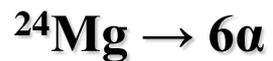
RADIUS - ?
STRUCTURE - ?



AMD density of HS

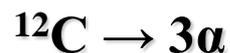


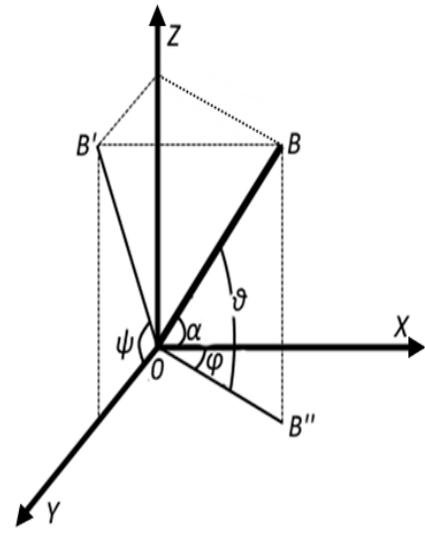
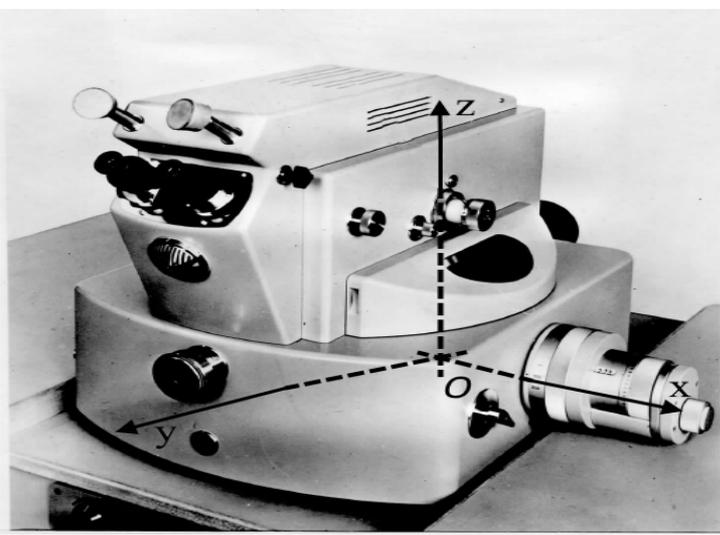
Occupation of the single- α orbitals of the Hoyle state of ^{12}C compared with the ground state.



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.





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

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

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

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

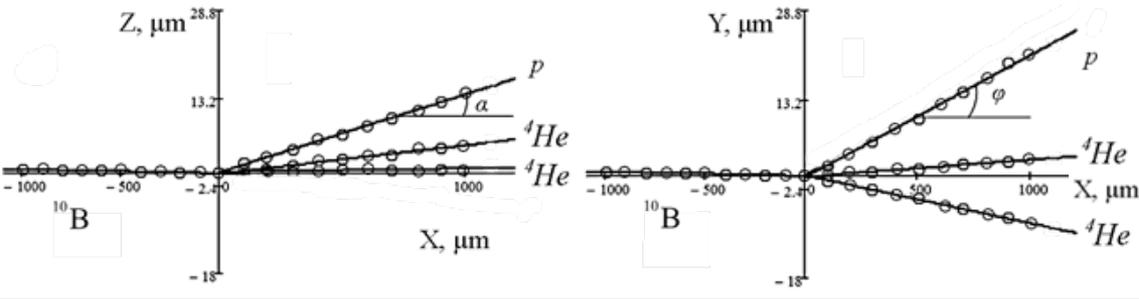
$$E_\alpha = \sqrt{P_0^2 \cdot A^2 + m_\alpha^2}$$

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

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

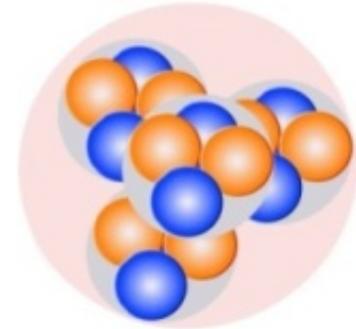
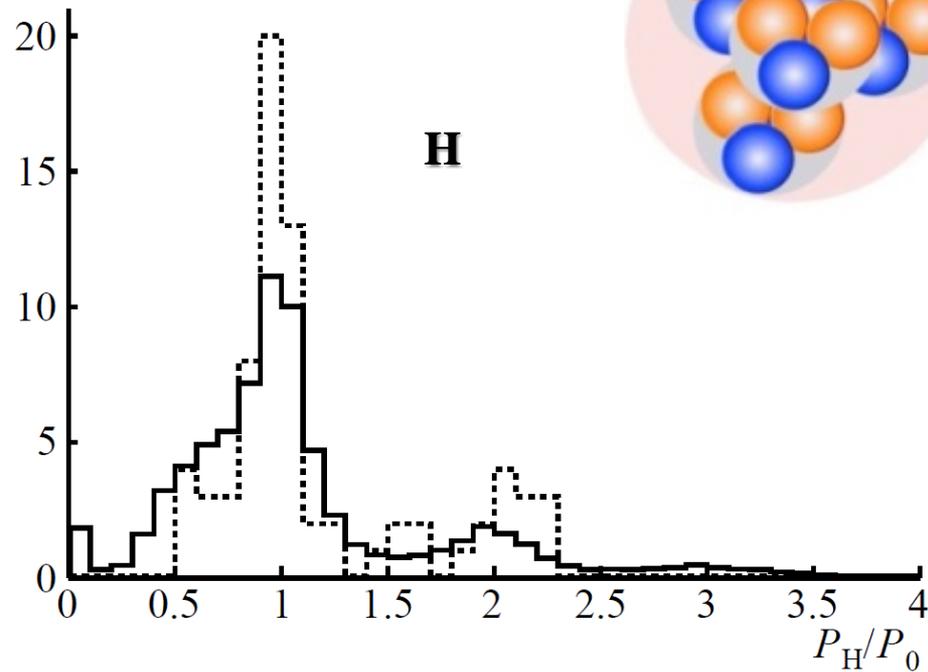
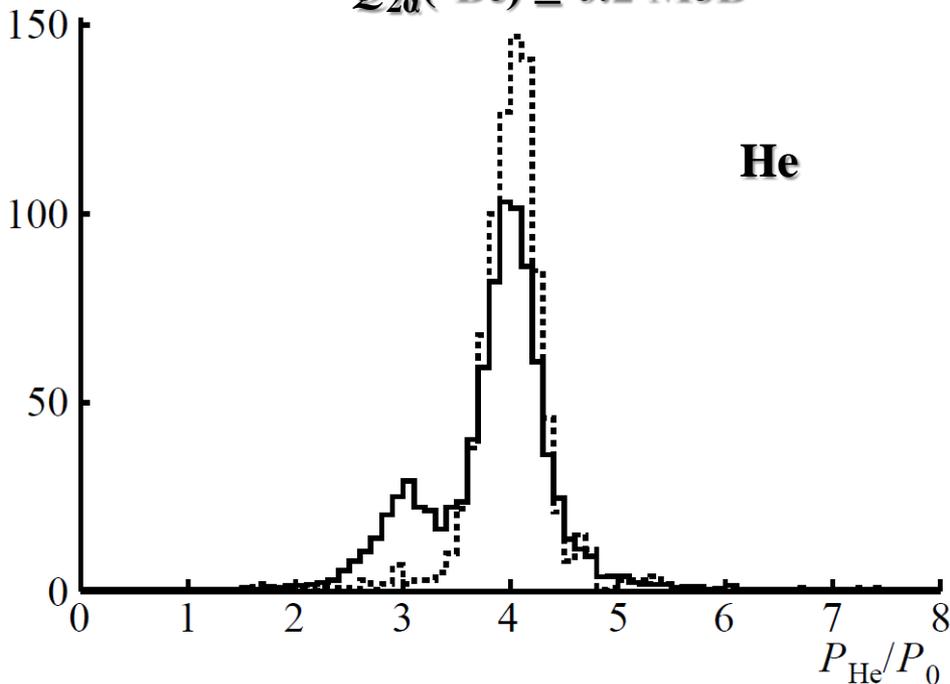
$$Q_{2\alpha} = \sqrt{2 \cdot [m_\alpha^2 + E_\alpha^2 - \vec{P}_{\alpha1} \cdot \vec{P}_{\alpha2}]} - 2 \cdot m_\alpha$$

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

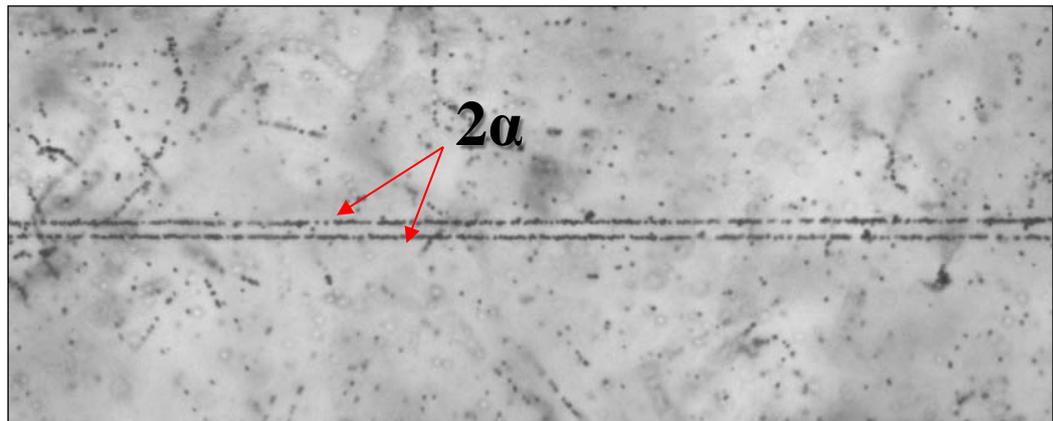
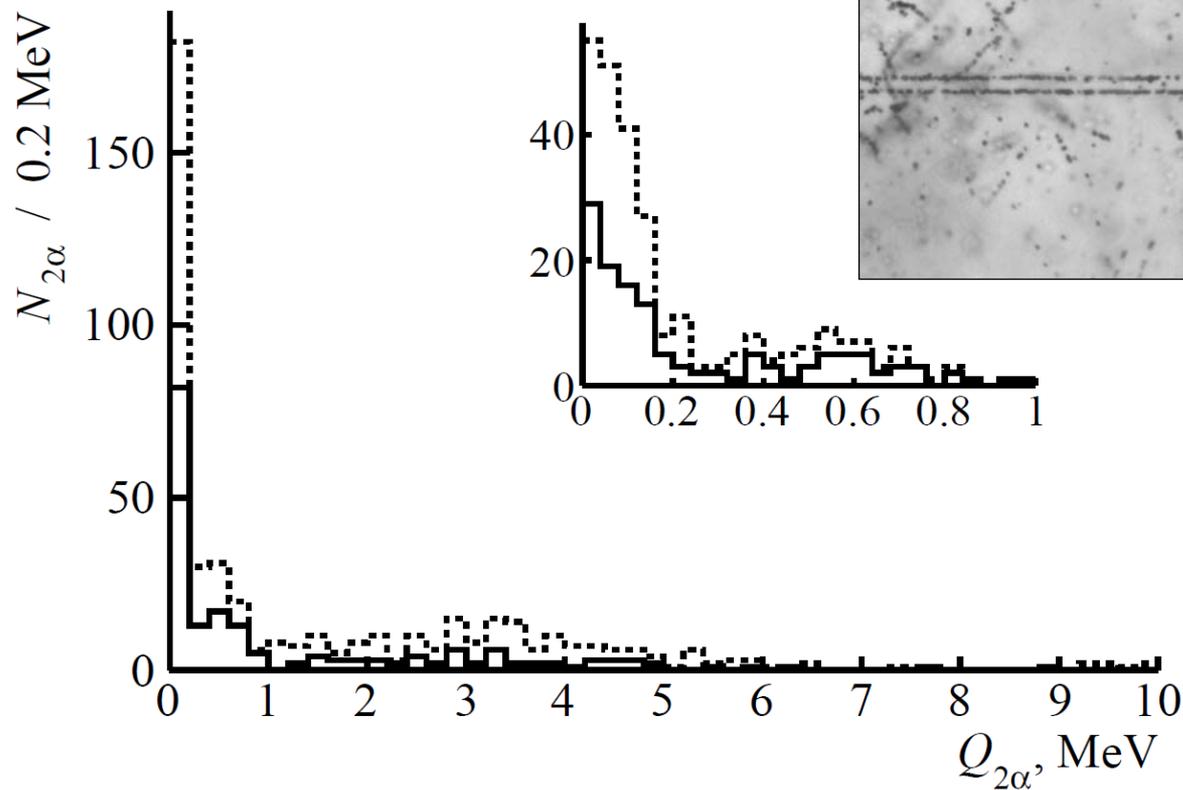
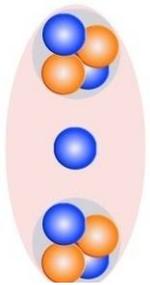


Инвариантная масса $Q = M^* - M$ задается суммой $M^{*2} = \sum(P_i \cdot P_k)$, где $P_{i,k}$ 4-импульсы фрагментов, а M их масса. Для вычисления инвариантных масс 2 α -пар $Q_{2\alpha}$ и 3 α -троек $Q_{3\alpha}$ в приближении сохранения α -частицами импульса на нуклон первичного ядра использовались 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.

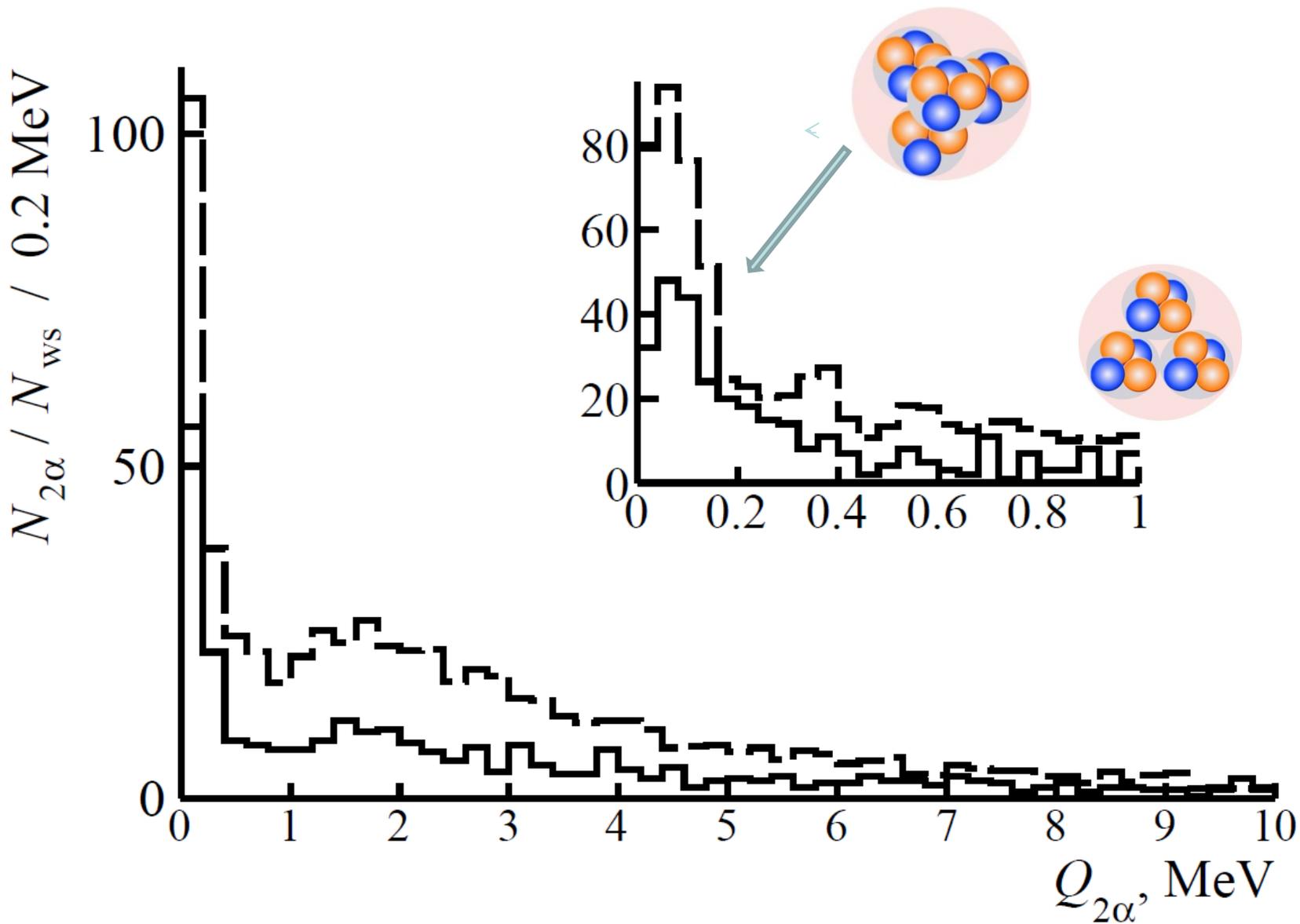
$$Q_{2\alpha}({}^8\text{Be}) \leq 0.2 \text{ МэВ}$$



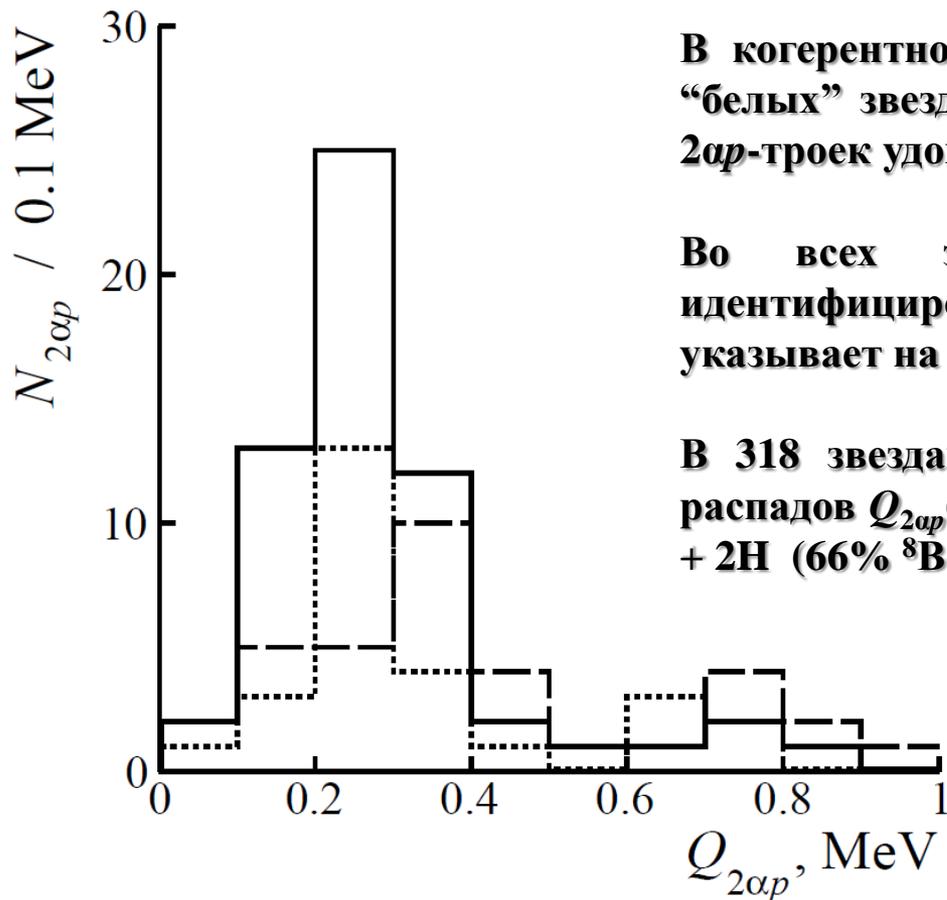
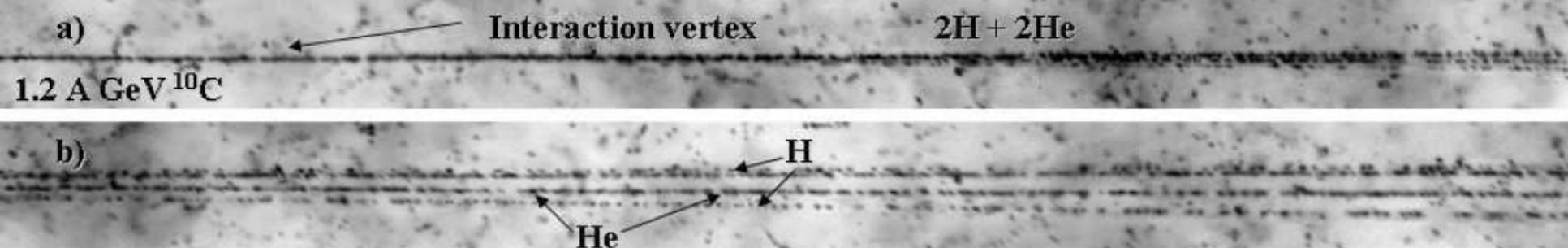
Проверить принятые приближения позволяют данные, полученные при облучении ядрами ${}^{16}\text{O}$ с энергией 2.4 ГэВ/нуклон 1-метровой водородной пузырьковой камеры ОИЯИ (ВПК-100), помещавшейся в магнитное поле. Набор данных включает измерения в полной геометрии векторов импульсов продуктов реакции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



Распределение 500 пар ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ при 1.2 А ГэВ/нуклон по $Q_{2\alpha}$ (пунктир), в том числе 198 “белых” (сплошная), указывает на ограничение $Q_{2\alpha}({}^8\text{Be}) \leq 0.2$ МэВ. Имеются два “наплыва” вокруг значений $Q_{2\alpha}$ равных 0.6 и 3 МэВ. Первый отражает возбуждение ${}^9\text{Be}$ при 2.43 МэВ, а второй – состояние ${}^8\text{Be} 2^+$.



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

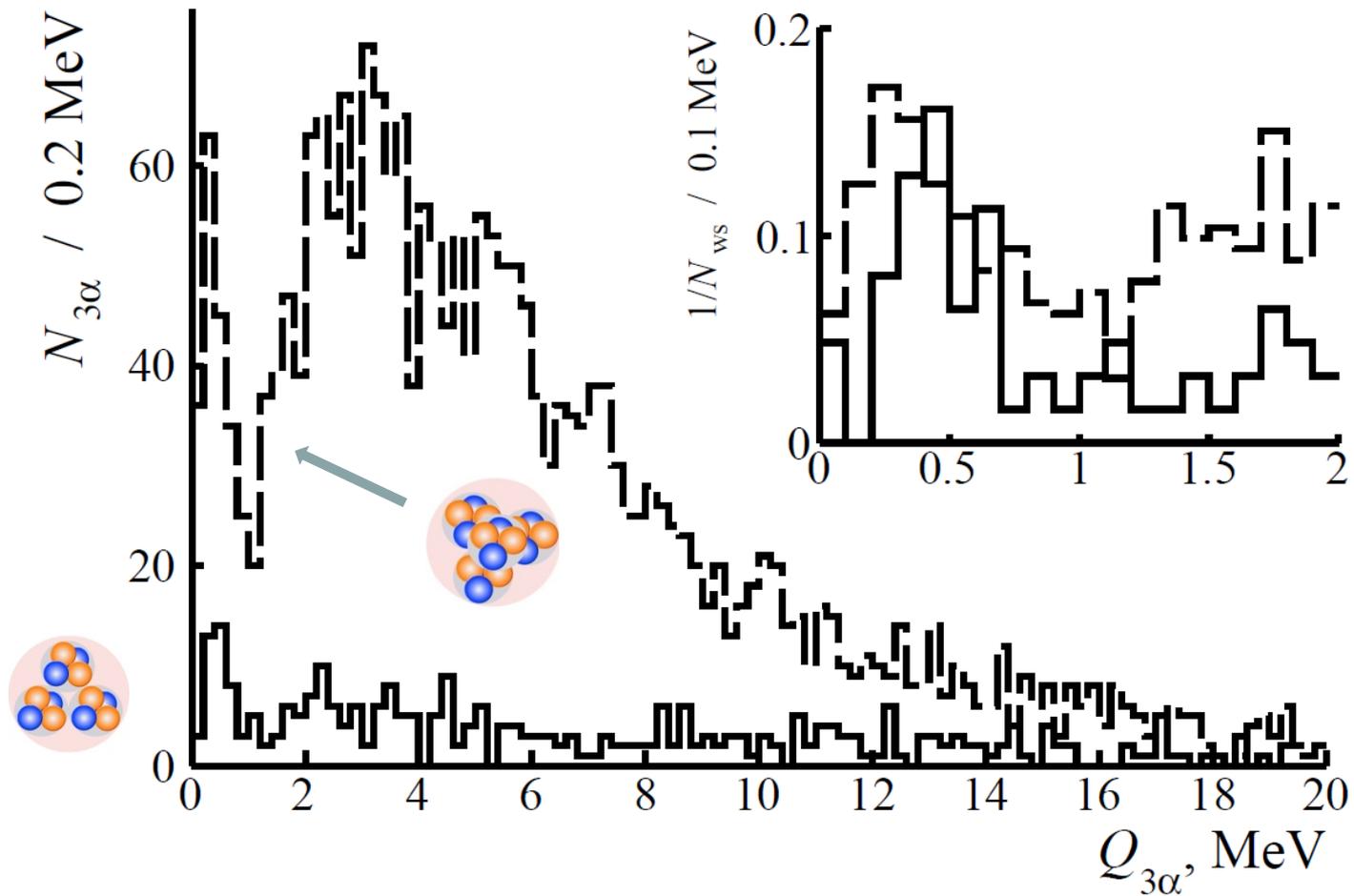


В когерентной диссоциации ^{10}C при 1.2 ГэВ/нуклон 186 “белых” звезд отвечают каналу $2\text{He} + 2\text{H}$ (82%). $30 \pm 4\%$ 2α -троек удовлетворяют $Q_{2\alpha p}(^9\text{B}) < 0.5 \text{ МэВ}$.

Во всех этих 2α -тройках и только в них идентифицированы также распады $Q_{2\alpha}(^8\text{Be}) < 0.2 \text{ МэВ}$, что указывает на доминирование $^9\text{B} \rightarrow ^8\text{Be} + p$ и $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$.

В 318 звездах $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ идентифицированы 20 распадов $Q_{2\alpha p}(^9\text{B}) < 0.5 \text{ МэВ}$ (50% ^8Be) и 22 в $^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$ (66% ^8Be).

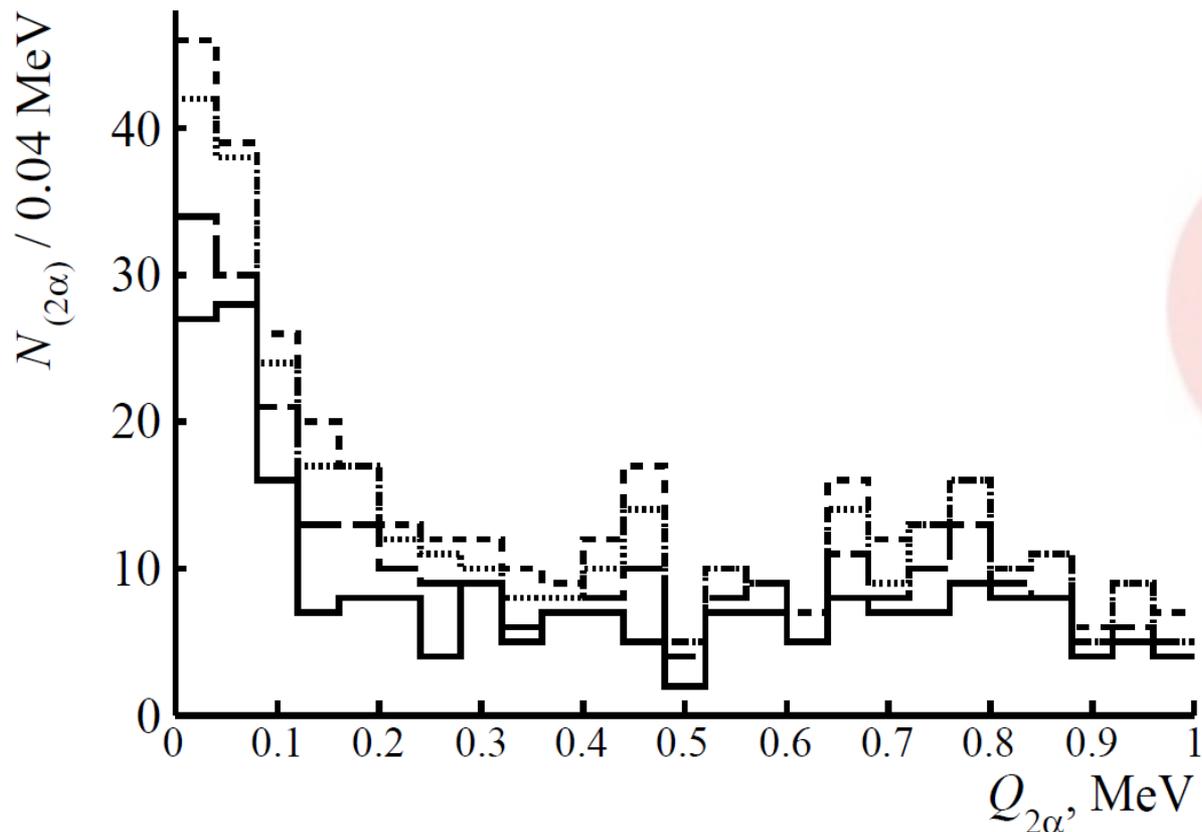
Распределение числа 2α -троек $N_{2\alpha}$ по инвариантной массе $Q_{2\alpha p}$ ($< 1 \text{ МэВ}$) в событиях когерентной диссоциации $^{10}\text{C} \rightarrow 2\text{He}2\text{H}$ (сплошная) и диссоциации $^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He}2\text{H}$ (точки) и $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{HeH}$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



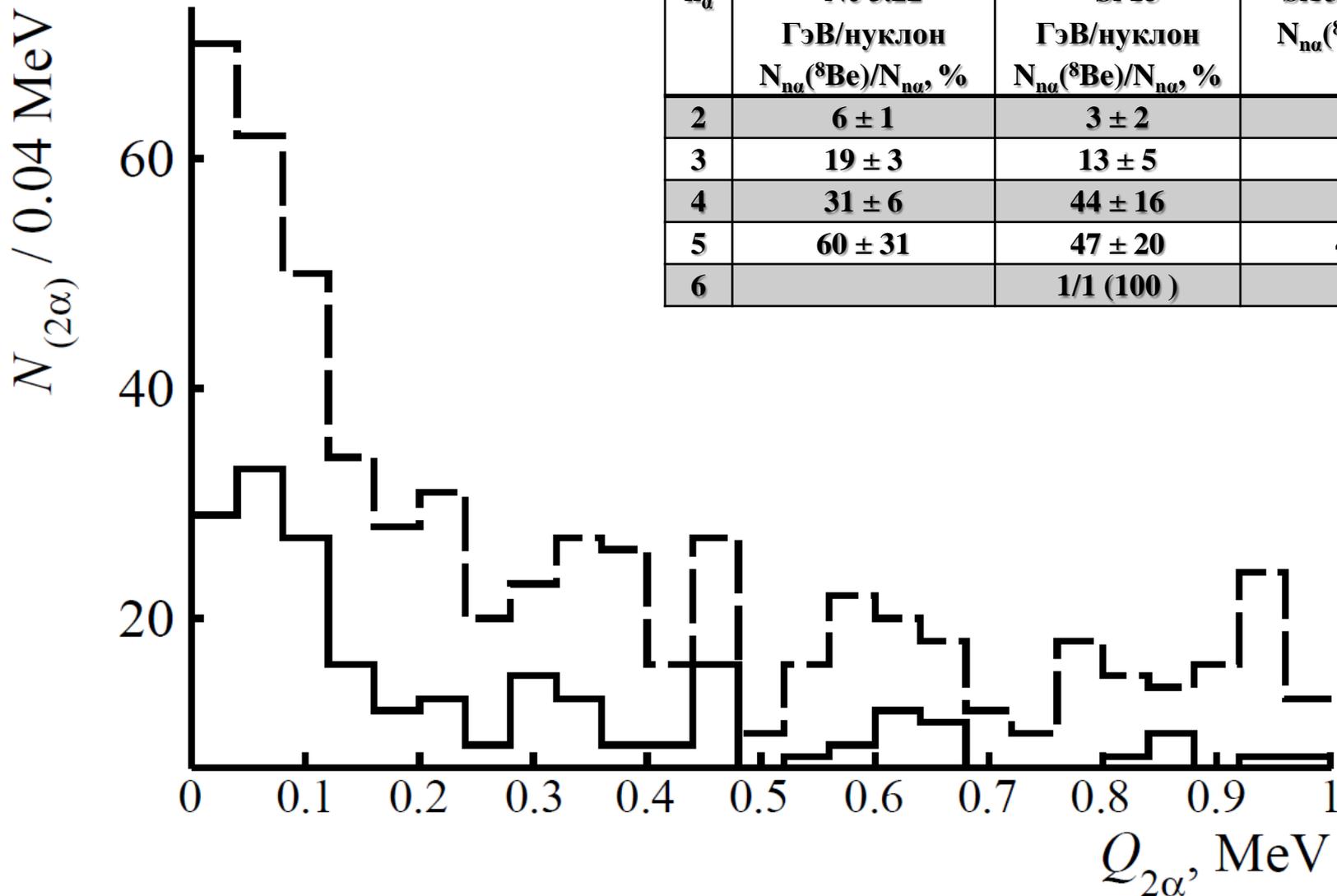
Несмотря на то, что доля когерентной диссоциации среди неупругих взаимодействий $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ и $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ составляет всего 1-2%, целенаправленный поиск таких событий, проводившийся поперечным сканированием, позволил исследовать методом инвариантной массы 310 3α и 641 4α “белых” звезд и установить в обоих случаях вклады 3α -распадов состояния Хойла (HS).

Начальные участки распределений событий по переменным $Q_{2\alpha}$ и $Q_{3\alpha}$ содержат пики, отвечающие ^8Be и HS как в случае ^{12}C , так и ^{16}O . Поскольку значения энергии распада заметно меньше ближайших возбуждений возможен отбор $Q_{2\alpha}(^8\text{Be}) \leq 0.2$ МэВ и $Q_{3\alpha}(\text{HS}) \leq 0.7$ МэВ. Их применение дает вклад ^8Be (HS) $45 \pm 4\%$ ($11 \pm 3\%$) для ^{12}C и $62 \pm 3\%$ ($22 \pm 2\%$) для ^{16}O .

n_α	3.65 ГэВ/нуклон $N_{n\alpha}(^8\text{Be})/N_{n\alpha}(\%)$	15 ГэВ/нуклон $N_{n\alpha}(^8\text{Be})/N_{n\alpha}(\%)$	60 ГэВ/нуклон $N_{n\alpha}(^8\text{Be})/N_{n\alpha}(\%)$	200 ГэВ/нуклон $N_{n\alpha}(^8\text{Be})/N_{n\alpha}(\%)$	Все $N_{n\alpha}(^8\text{Be})/N_{n\alpha}(\%)$
2	32/390 (8 ± 2)	6/95 (6 ± 3)	9/97 (9 ± 3)	3/56 (5 ± 3)	50/638 (8 ± 1)
3	40/176 (23 ± 4)	13/51 (26 ± 8)	12/65 (19 ± 6)	8/29 (28 ± 11)	73/321 (23 ± 3)
4	13/28 (46 ± 15)	1/4 (25)	2/2 (100)	-	16/35 (46 ± 14)

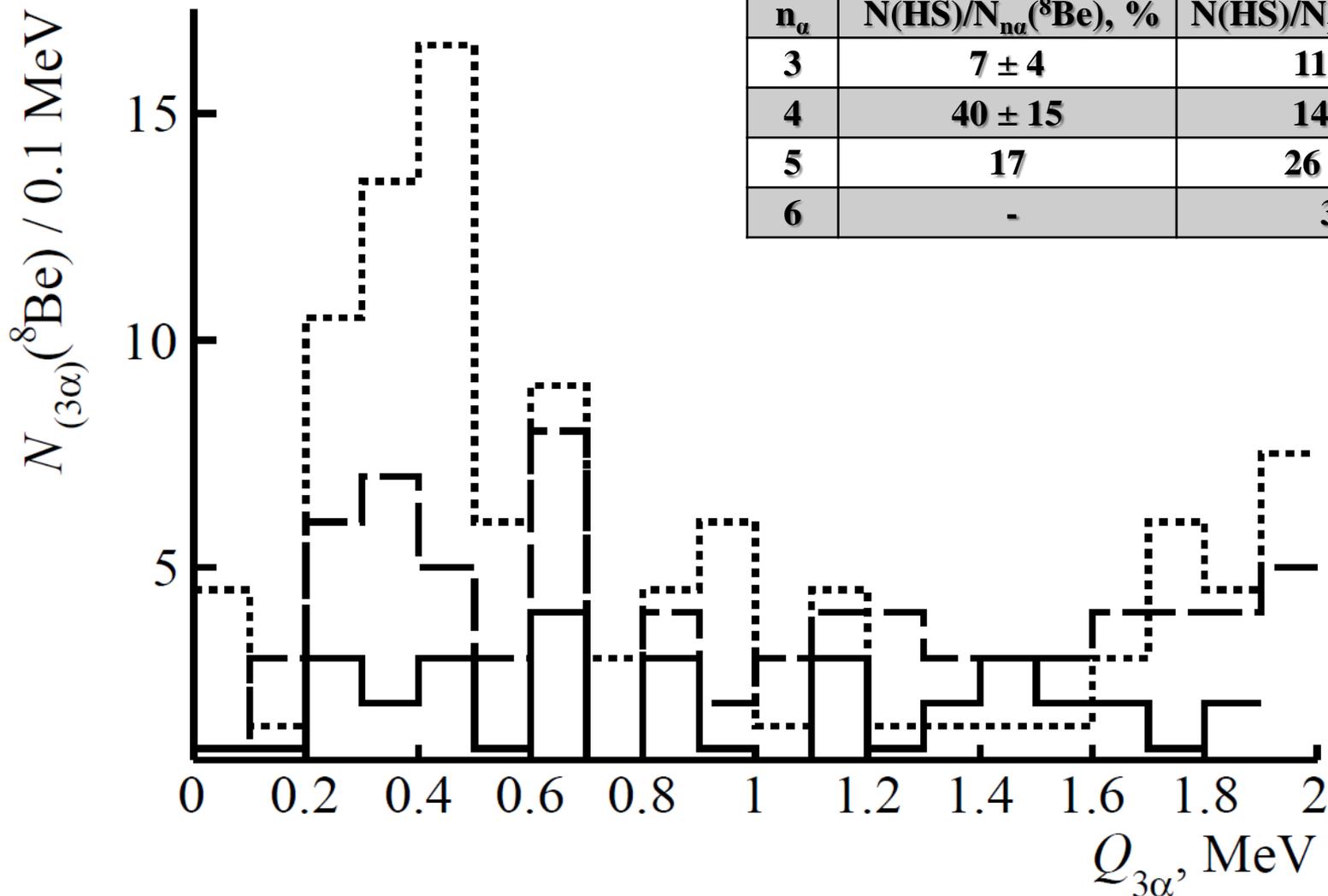


Распределение 2α -пар $N_{(2\alpha)}$ по инвариантной массе в диапазоне $Q_{2\alpha} (< 1 \text{ МэВ})$ во фрагментации ядер ^{16}O при 3.65 ГэВ/нуклон (сплошная линия); последовательно добавлены данные для 15 (длинный пунктир), 60 (точки) и 200 (короткий пунктир) ГэВ/нуклон.



Распределение 2α -пар $N_{(2\alpha)}$ по инвариантной массе $Q_{2\alpha}$ (< 1 МэВ) во фрагментации ядер ^{22}Ne при 3.22 ГэВ/нуклон (сплошная линия) и ^{28}Si при 14.6 ГэВ/нуклон (добавлено пунктиром).

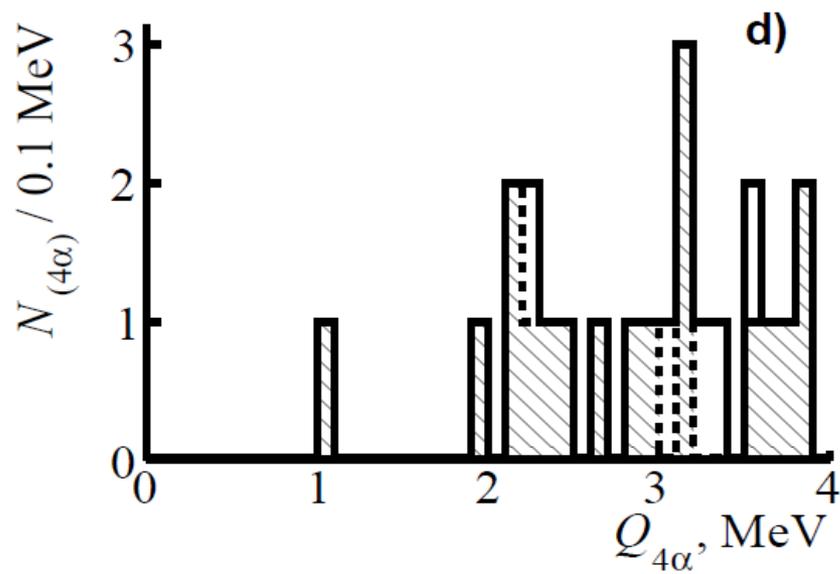
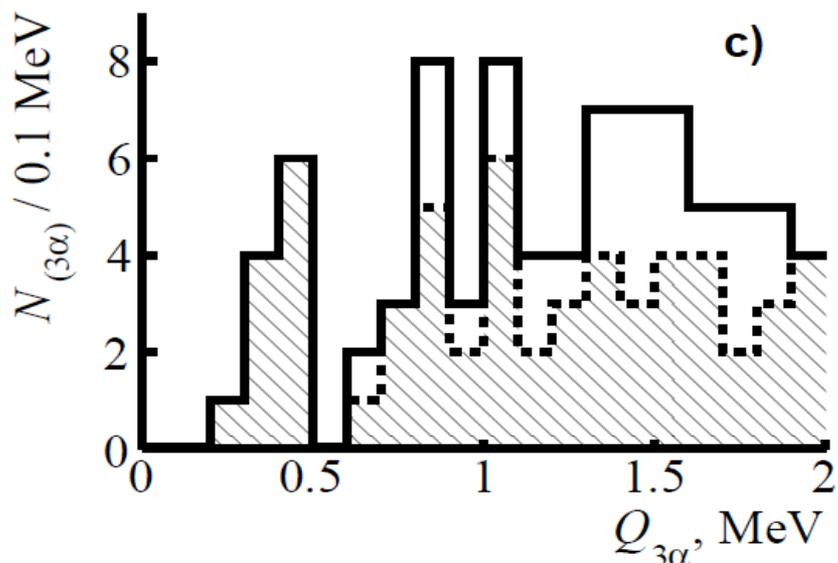
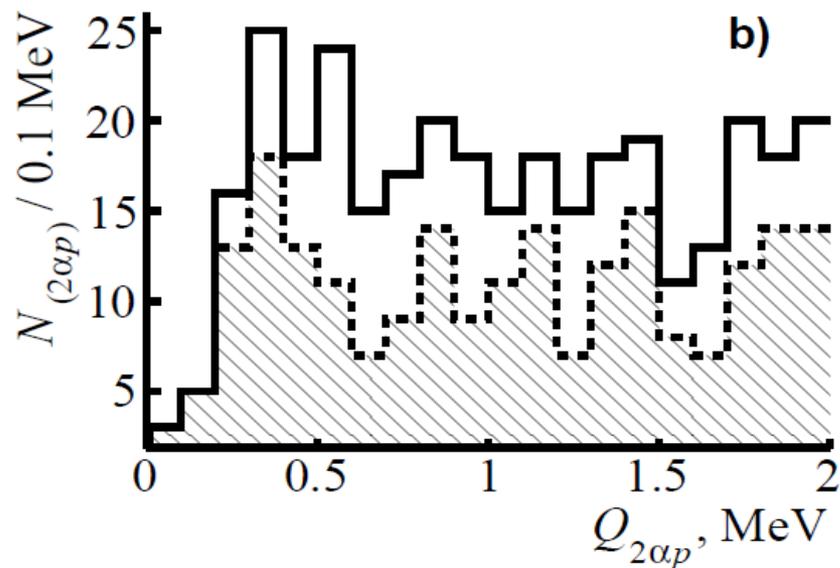
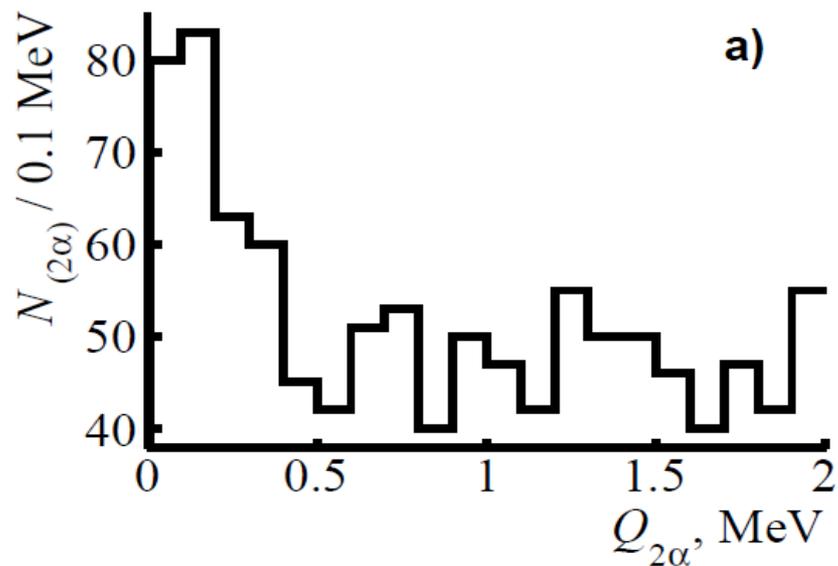
	^{22}Ne	^{28}Si
n_α	$N(\text{HS})/N_{n\alpha}({}^8\text{Be}), \%$	$N(\text{HS})/N_{n\alpha}({}^8\text{Be}), \%$
3	7 ± 4	11 ± 6
4	40 ± 15	14 ± 6
5	17	26 ± 11
6	-	33



Распределение α -троек $N_{(3\alpha)}({}^8\text{Be})$ по инвариантной массе $Q_{2\alpha} < 2$ МэВ во фрагментации ядер ^{22}Ne при 3.22 ГэВ/нуклон (сплошная линия) и ^{28}Si при 14.6 ГэВ/нуклон (добавлено пунктиром). Точками отмечено распределение $N_{(3\alpha)}({}^8\text{Be})$ в диссоциации $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$, факторизованное на множитель 1,5.

The image consists of two vertical panels showing a microscopic view of a surface, likely gold (Au), after being irradiated with a heavy ion beam at 10.7 GeV per nucleon. The surface is covered with a complex pattern of small, dark, irregular features, possibly representing damage or specific surface structures. A prominent horizontal line runs across the middle of both panels, likely a scanning artifact or a surface defect. The overall appearance is grainy and textured, with varying shades of gray and black.

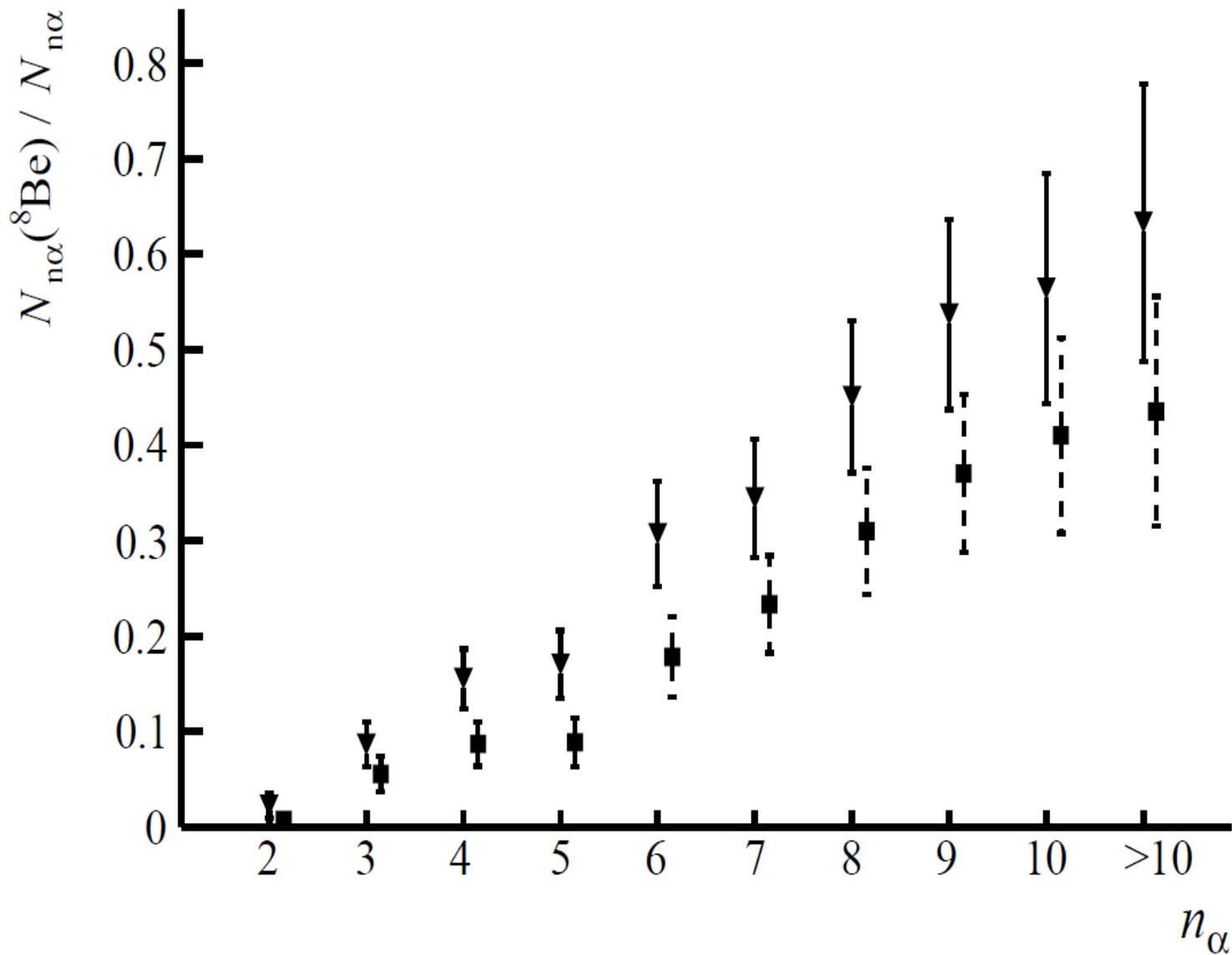
Au 10.7 ГэВ/нуклон



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).

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



Зависимость относительного вклада распадов $N_{n\alpha}(^8\text{Be})$ в статистику $N_{n\alpha}$ событий с множественностью α -частиц n_α во фрагментации ядер ^{197}Au при отборе $Q_{2\alpha}(^8\text{Be}) \leq 0.4$ МэВ (треугольники) и $Q_{2\alpha}(^8\text{Be}) \leq 0.2$ МэВ (квадраты).

Заключение

Сохранившихся и недавно дополненные данные по фрагментации релятивистских ядер ^{16}O , ^{22}Ne , ^{28}Si и ^{197}Au в ядерной эмульсии позволили идентифицировать распады ядер ^8Be , ^9B и состояния Хойла в распределениях по инвариантным массам 2α -пар, $2\alpha\gamma$ - и 3α -троек. Определение инвариантных масс по углам эмиссии фрагментов в приближении сохранения скорости оказывается адекватным приближением.

Начиная с фрагментации ^{16}O , представленный анализ указывает на усиление вклада ^8Be с ростом числа релятивистских α -частиц и остающихся пропорциональных ^8Be вкладов HS и ^9B . Во фрагментации ядер ^{197}Au тенденция прослеживается как минимум до релятивистских 10 α -частиц в событии. Это наблюдение позволяет предложить развитие теории релятивистской фрагментации ядер с учетом взаимодействий α -частиц, характерных для ядерной физики низких энергий.

Очевидна необходимость наращивания статистики событий с высокой множественностью α -частиц при особом внимании к точности измерений углов эмиссии релятивистских фрагментов He и H.

Применение гибкого метода ядерной эмульсии сохраняет поисковую перспективу в исследовании нестабильных состояний рожденных в узком конусе релятивистской фрагментации ядрами в самом широком диапазоне массовых чисел.

Новые возможности содержат имеющиеся слои, облученные ядрами ^{84}Kr при энергии 800-950 А МэВ (синхротрон SIS, ГСИ, начало 90-х) уже использовавшиеся для обзора множественности.

Спасибо за внимание!