

**Состояние Хойла в релятивистской
диссоциации ядер ^{12}C , ^{16}O и ^{22}Ne
в ядерной эмульсии**

Зайцев Андрей, Зарубин Павел

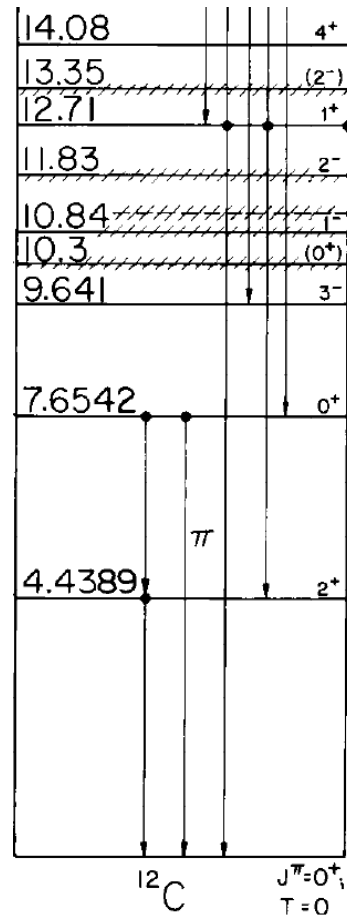
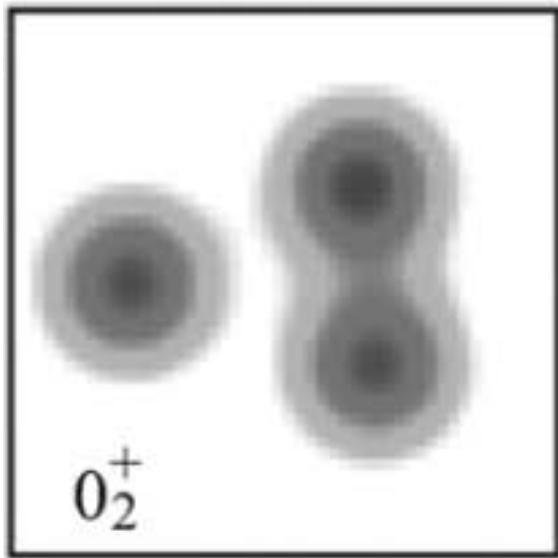
(ОИЯИ, ФИАН)

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

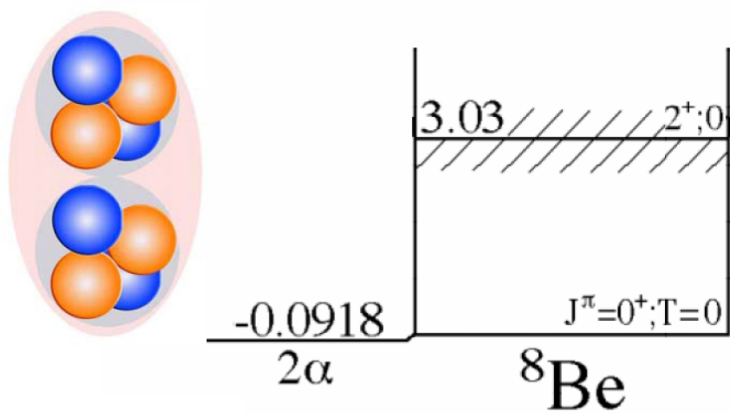
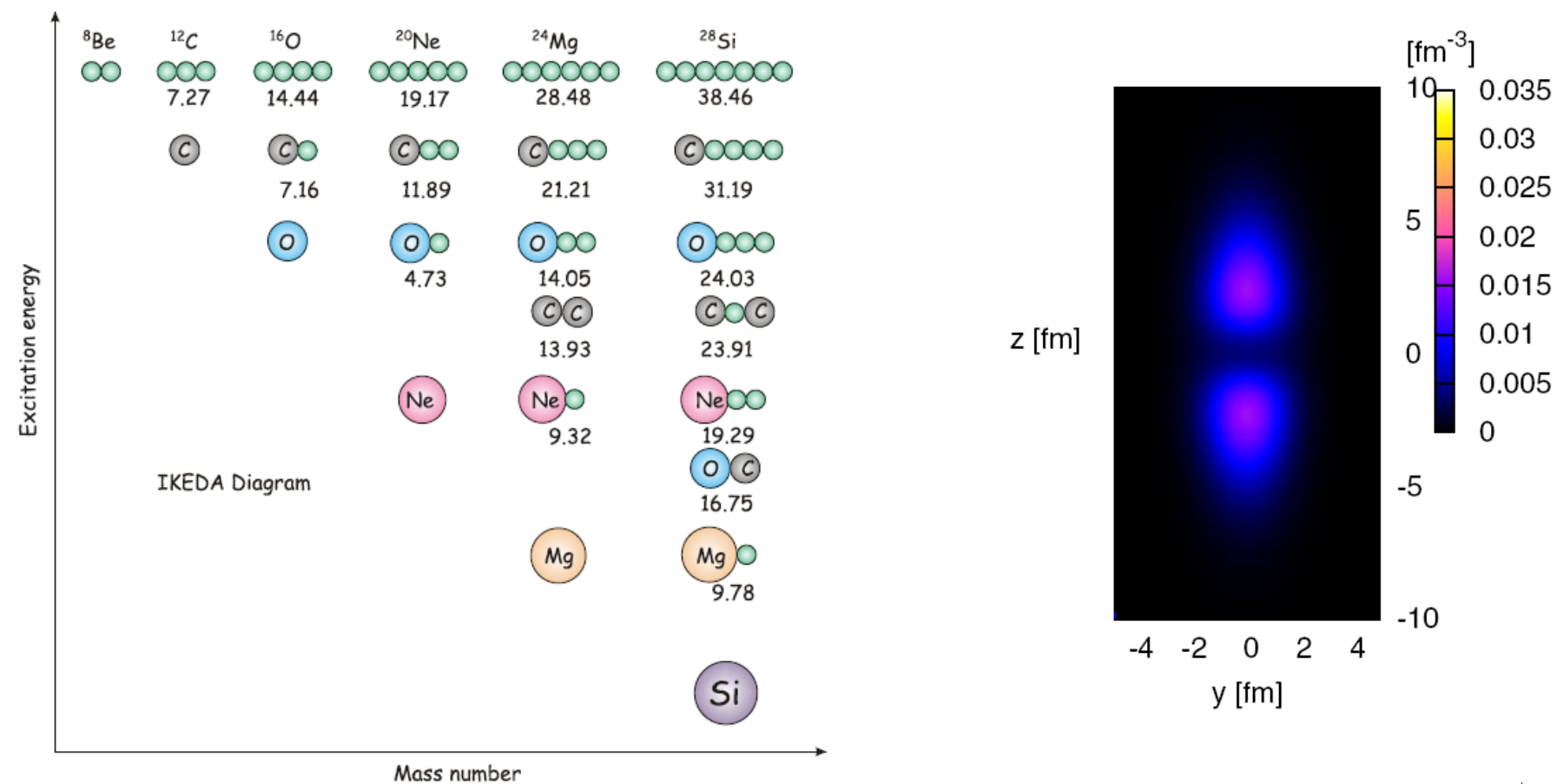
F. HOYLE*

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

Received December 22, 1953

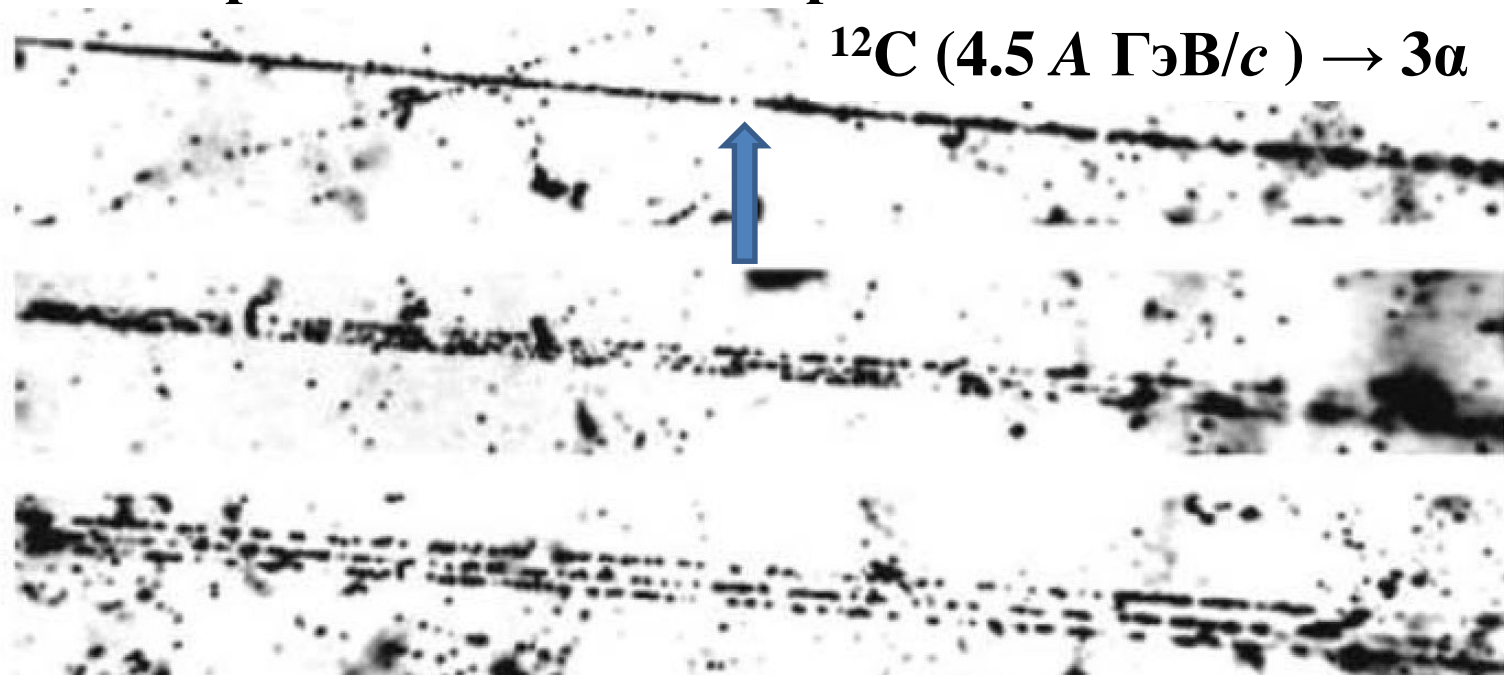


E_x in ^{12}C (MeV \pm keV)	$J^\pi ; T$	$\Gamma_{\text{c.m.}}$ (keV)	Decay
g.s	$0^+ ; 0$	-	stable
4.43891 \pm 0.31	$2^+ ; 0$	$(10.8 \pm 0.6) \times 10^{-6}$	γ
7.6542 \pm 0.15	$0^+ ; 0$	$(8.5 \pm 1.0) \times 10^{-3}$	γ, π, α



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
11.35 ± 150^i	$4^+; 0$	$\approx 3500^b$	α

Диссоциация релятивистских ядер

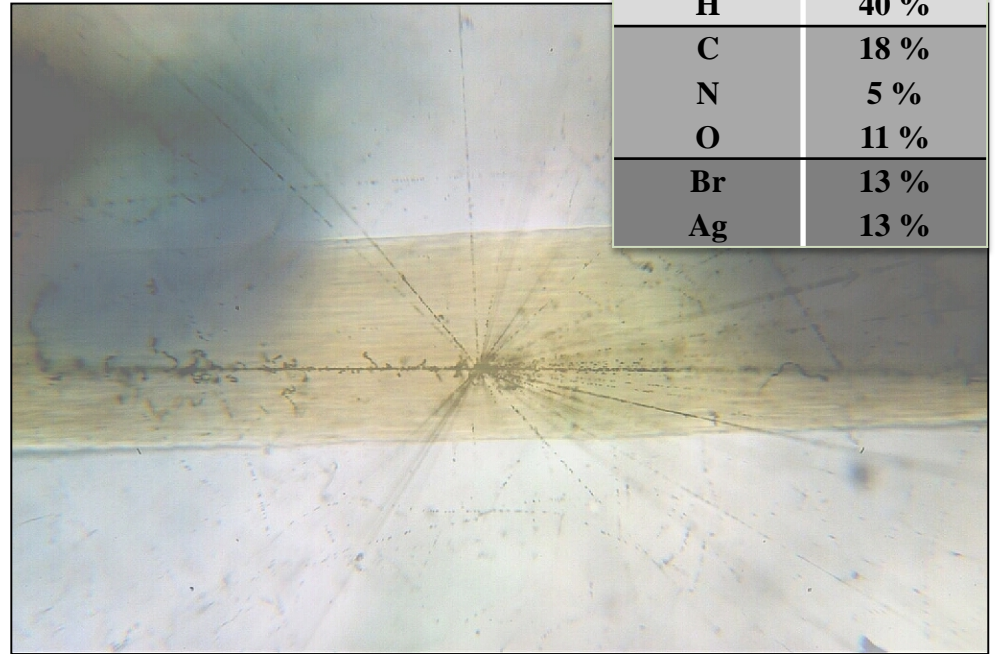


Нуклотрон, ОИЯИ



У-70, ИФВЭ

Ядерная фотоэмульсия



Элементы	Отн. содерж.
H	40 %
C	18 %
N	5 %
O	11 %
Br	13 %
Ag	13 %

Исследования основаны на применении метода ядерных трековых эмульсий, обеспечивающих непревзойденное **пространственное (0,5 мкм)** и **угловое (0.1 мрад)** разрешение и диапазон чувствительности для измерения треков заряженных частиц, начиная от сильноионизирующих короткопробежных ионов вплоть до однозарядных релятивистских частиц. Использование ядерной эмульсии во вновь созданных пучках ускорителей релятивистских ядер позволяет проводить анализ, который на сегодняшний день не может быть достигнут с помощью электронных методов детектирования.

Измерение углов эмиссии вторичных фрагментов

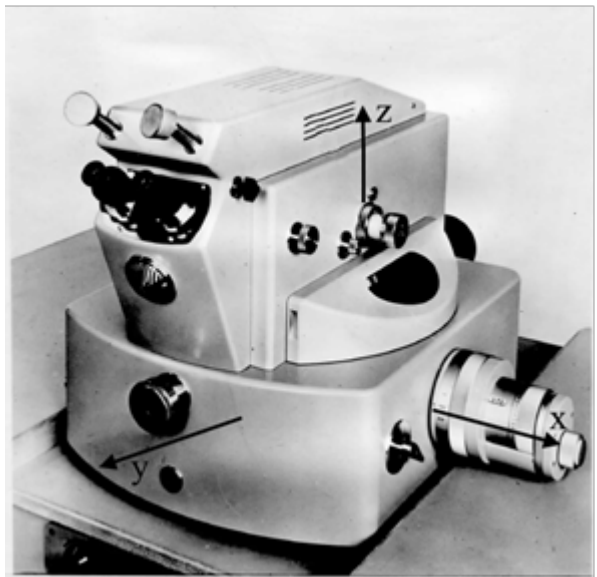
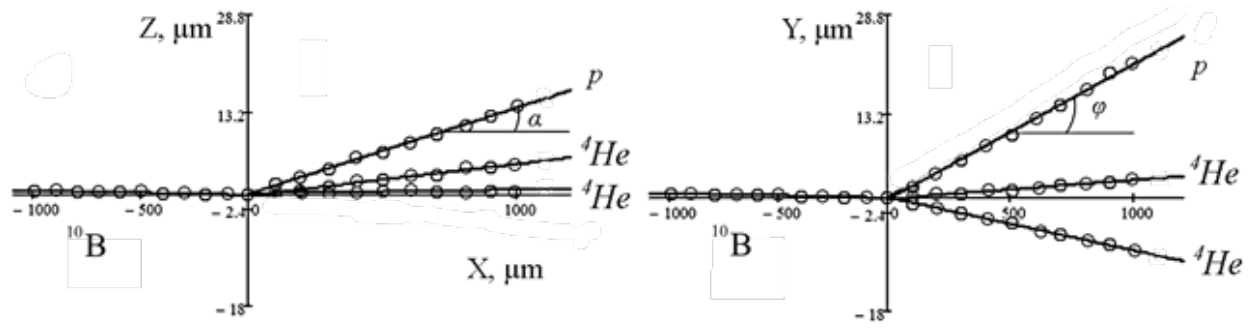


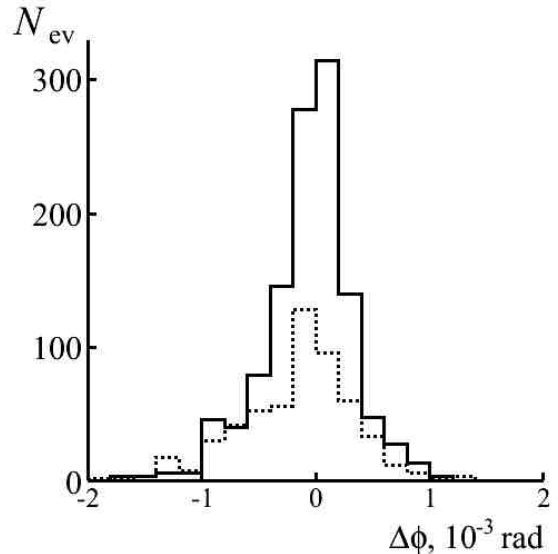
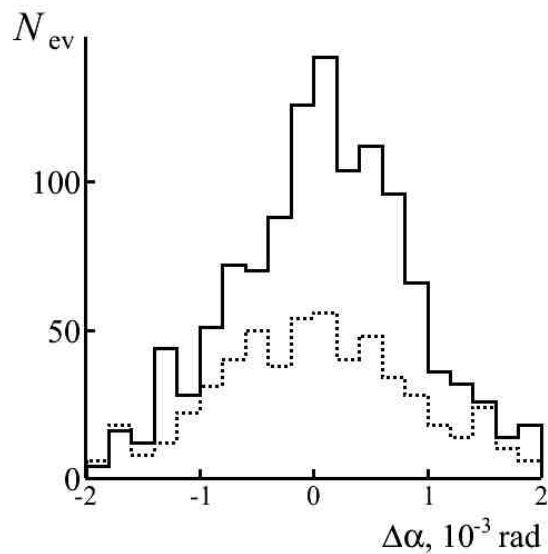
Рис. 1.2. Измерительный микроскоп KSM-1

Фрагменты диссоциирующего релятивистского ядра сосредоточены в узком переднем конусе, угол разворота которого:

$$\sin \theta = \frac{p_{fr}}{p_0}$$



Пример восстановленных направлений вылета фрагментов в плоскости XOZ и XOY в событии №10107 в канале $^{10}\text{B} \rightarrow 2\alpha + p$.



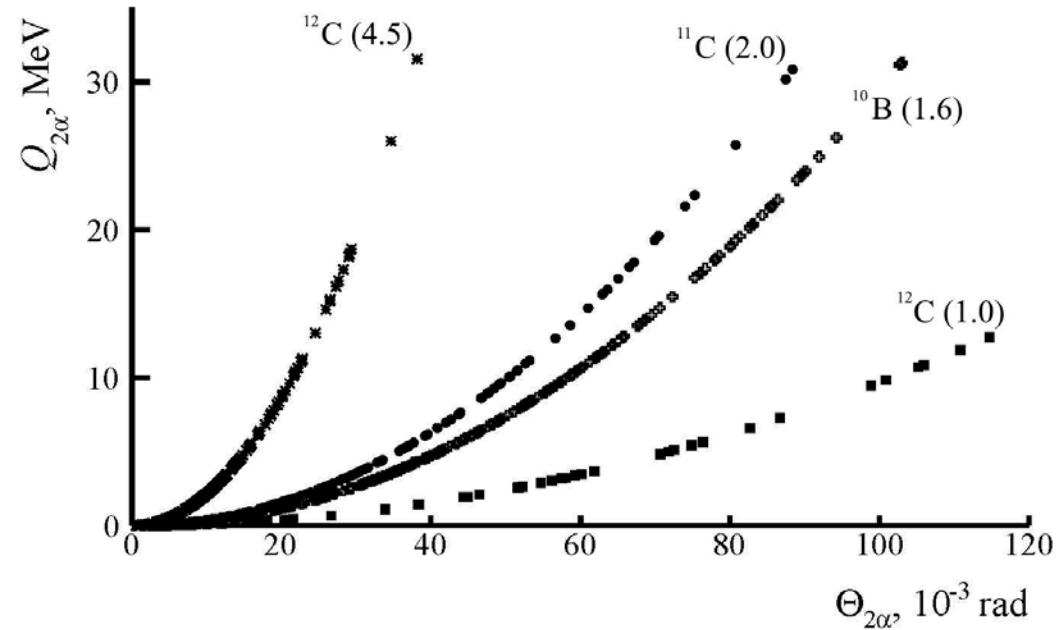
Ошибки в определении угла погружения (α) и планарного угла (ϕ) для треков фрагментов He (сплошная) и H (точечная) в событиях $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$. $\langle \Delta\alpha \rangle = 0.08 \pm 0.02$ (0.78) мрад и $\langle \Delta\phi \rangle = 0.06 \pm 0.01$ (0.39) мрад.

Нестабильное ядро ${}^8\text{Be}$ в диссоциации релятивистских ядер

Средние значения $\langle \Theta_{2\alpha} \rangle$ ($Q_{2\alpha} < 300$ кэВ) и $\langle Q_{2\alpha} \rangle$

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

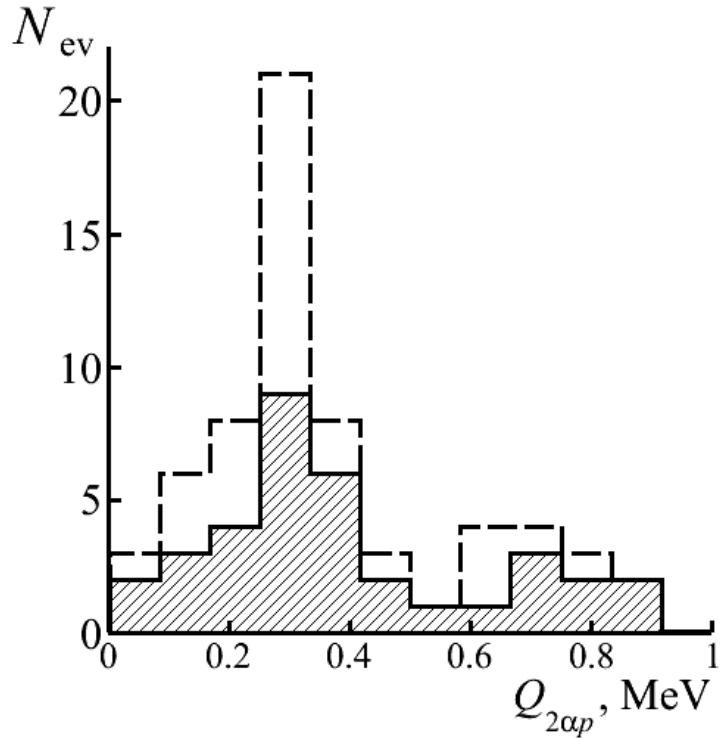
Ядро (P_0, A ГэВ/с)	$\langle \Theta_{2\alpha} \rangle$ (RMS), мрад ($Q_{2\alpha} < 300$ кэВ)	$\langle Q_{2\alpha} \rangle$ (RMS), кэВ
${}^{12}\text{C}$ (4.5)	2.1 ± 0.1 (0.8)	109 ± 11 (83)
${}^{16}\text{O}$ (4.5)	1.8 ± 0.3 (0.6)	81 ± 2 (50)
${}^{22}\text{Ne}$ (4.1)	1.9 ± 0.1 (0.8)	82 ± 5 (52)
${}^{14}\text{N}$ (2.9)	2.9 ± 0.2 (1.9)	120 ± 10 (72)
${}^9\text{Be}$ (2.0)	4.4 ± 0.2 (2.1)	86 ± 4 (48)
${}^{10}\text{C}$ (2.0)	4.6 ± 0.2 (1.9)	63 ± 7 (83)
${}^{11}\text{C}$ (2.0)	4.8 ± 0.3 (1.9) 5.3 ± 0.5 (1.5)	77 ± 7 (40) 68 ± 17 (42)
${}^{11}\text{C}$ (2.0) \rightarrow ${}^9\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}$	4.5 ± 0.3 (1.3)	94 ± 15 (86)
${}^{10}\text{B}$ (1.6)	5.9 ± 0.2 (1.6)	101 ± 6 (46)
${}^{10}\text{B}$ (1.6) $\rightarrow {}^9\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}$	5.6 ± 0.3 (1.3)	105 ± 9 (47)
${}^{12}\text{C}$ (1.0)	10.4 ± 0.5 (3.9)	107 ± 10 (79)



Зависимость вычисленных инвариантных масс α -пар $Q_{2\alpha}$ от углов разлета в них $\Theta_{2\alpha}$ в событиях диссоциации ядер ${}^{12}\text{C}$, ${}^{11}\text{C}$ и ${}^{10}\text{B}$; значения импульсов указаны в скобках (A ГэВ/с).

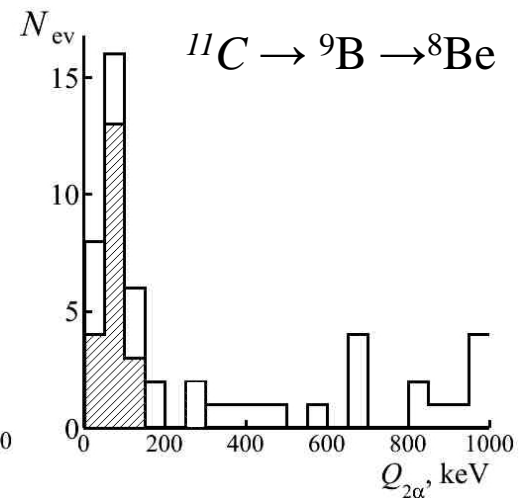
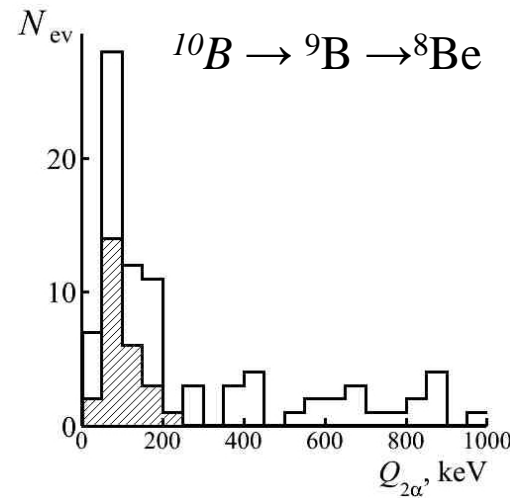
Реконструкция распада ядра ${}^9\text{В}$

Объединенные данные по величине среднего значения $\langle Q_{2\alpha p} \rangle$ в наблюдаемых событиях с узкими тройками $2\alpha p$.



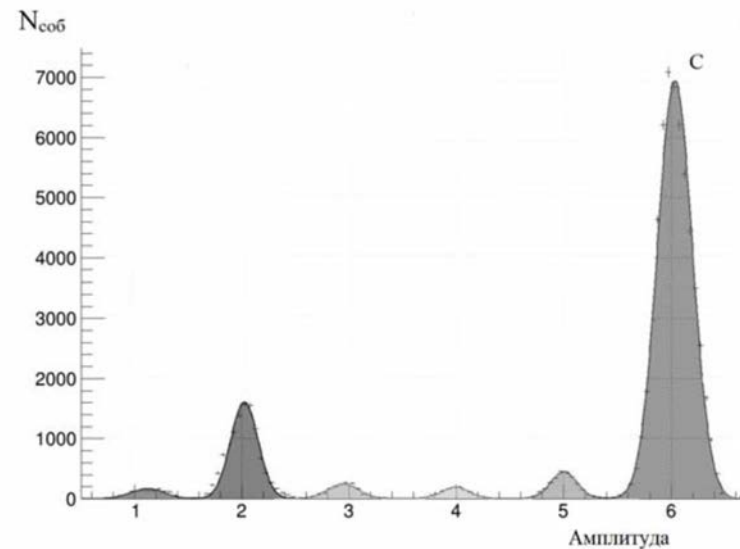
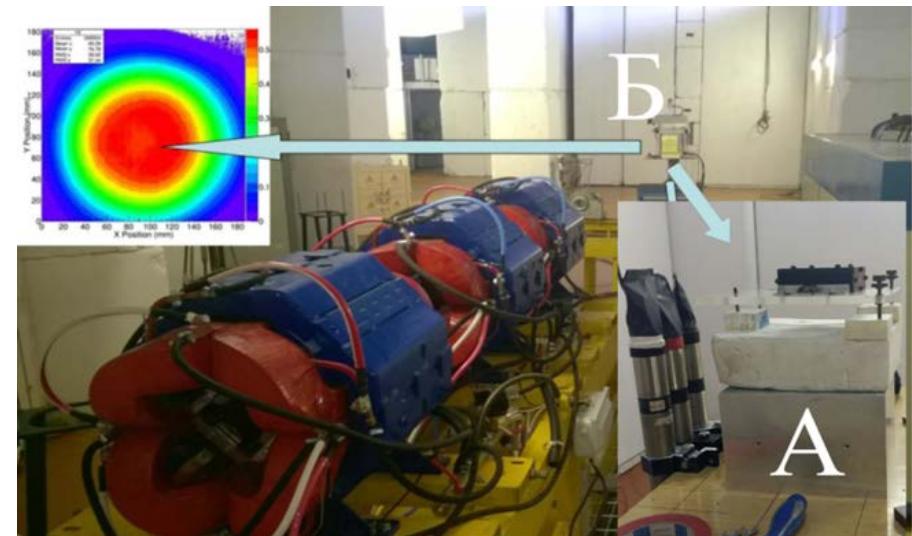
Распределение по инвариантной массе троек $2\alpha + p$ в событиях диссоциации ядер ${}^{10}\text{В}$ (заштрихованная гистограмма) и добавлено для ядер ${}^{11}\text{С}$ (пунктир).

Ядро (P_0, A ГэВ/с)	$\langle \Theta_{2\alpha p} \rangle$ ($\Theta_{2\alpha} < 10.5$ мрад), RMS	$\langle Q_{2\alpha p} \rangle$ ($Q_{2\alpha p} < 400$ кэВ), RMS
${}^{10}\text{В}$ (1.6)	$11.8 \pm 1.1, 2.5$ мрад	$227 \pm 24, 96$ кэВ
${}^{10}\text{С}$ (2.0)	$9.5 \pm 0.3, 5.0$ мрад	$254 \pm 18, 96$ кэВ
${}^{11}\text{С}$ (2.0)	$11.3 \pm 0.1, 4.8$ мрад	$256 \pm 15, 68$ кэВ



Во фрагментации ядер ${}^{10}\text{В}$ **50%** распадов ${}^8\text{Ве}_{gs}$ возникают из распадов ${}^9\text{В}$, а для ${}^{11}\text{С}$ – **66%**. В случае ядра ${}^{10}\text{С}$ – **100%**.

Периферическая диссоциация релятивистских ядер ^{12}C



Состав пучка ядер углерода медицинского канала У-70 в месте облучения ядерной эмульсии

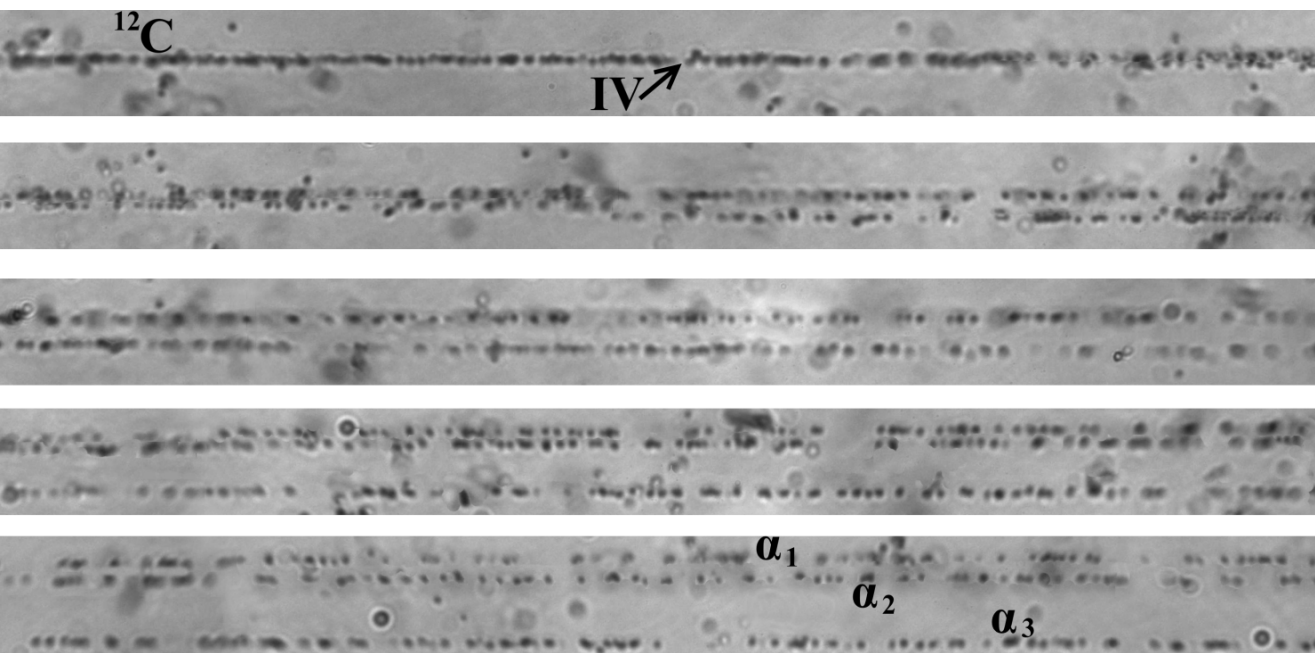
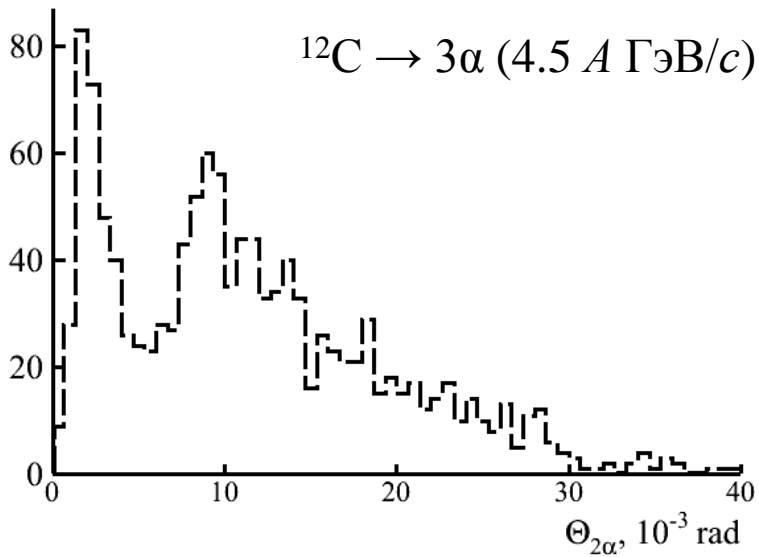
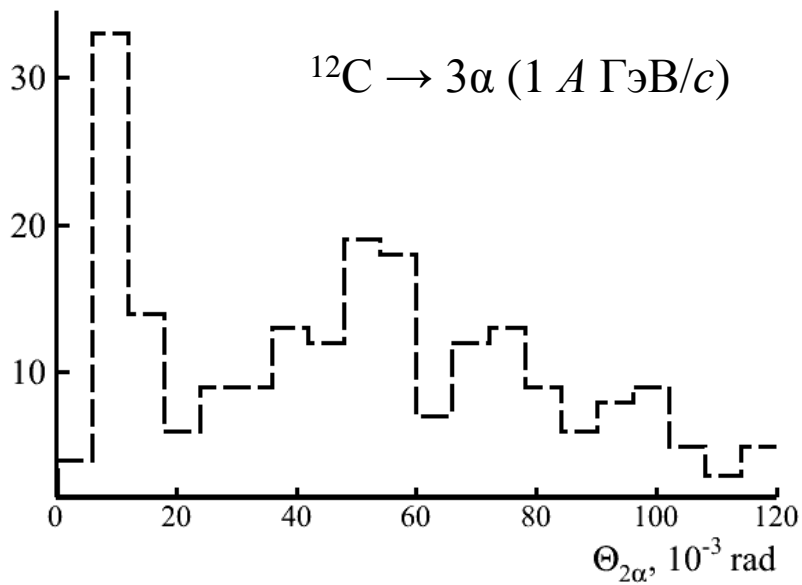
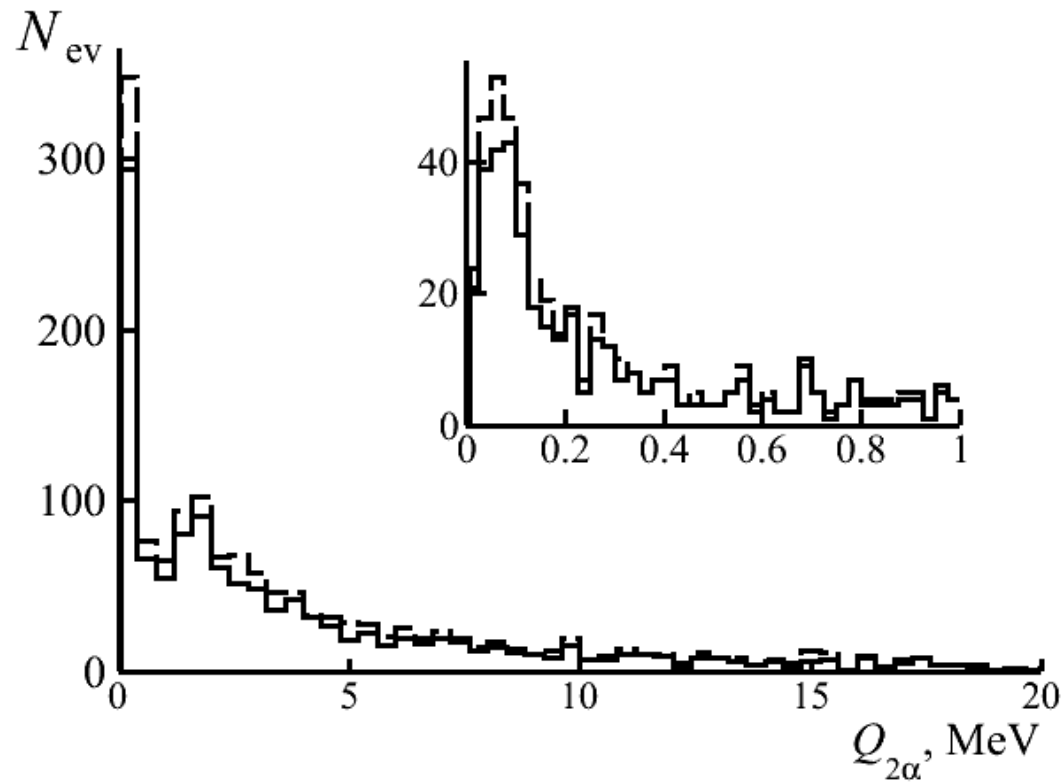


Рис. 8. Последовательная фотография события $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ (P_0 1 А ГэВ/с), IV – положение вершины взаимодействия. Основные характеристики события: $\theta_{12} = 8$ мрад, $\theta_{13} = 15$ мрад, $\theta_{23} = 8$ мрад, $Q_{12} = 57$ кэВ, $Q_{13} = 227$ кэВ, $Q_{23} = 61$ кэВ, $Q_{3\alpha} = 230$ кэВ. Характерный размер зерна 0.5 мкм.

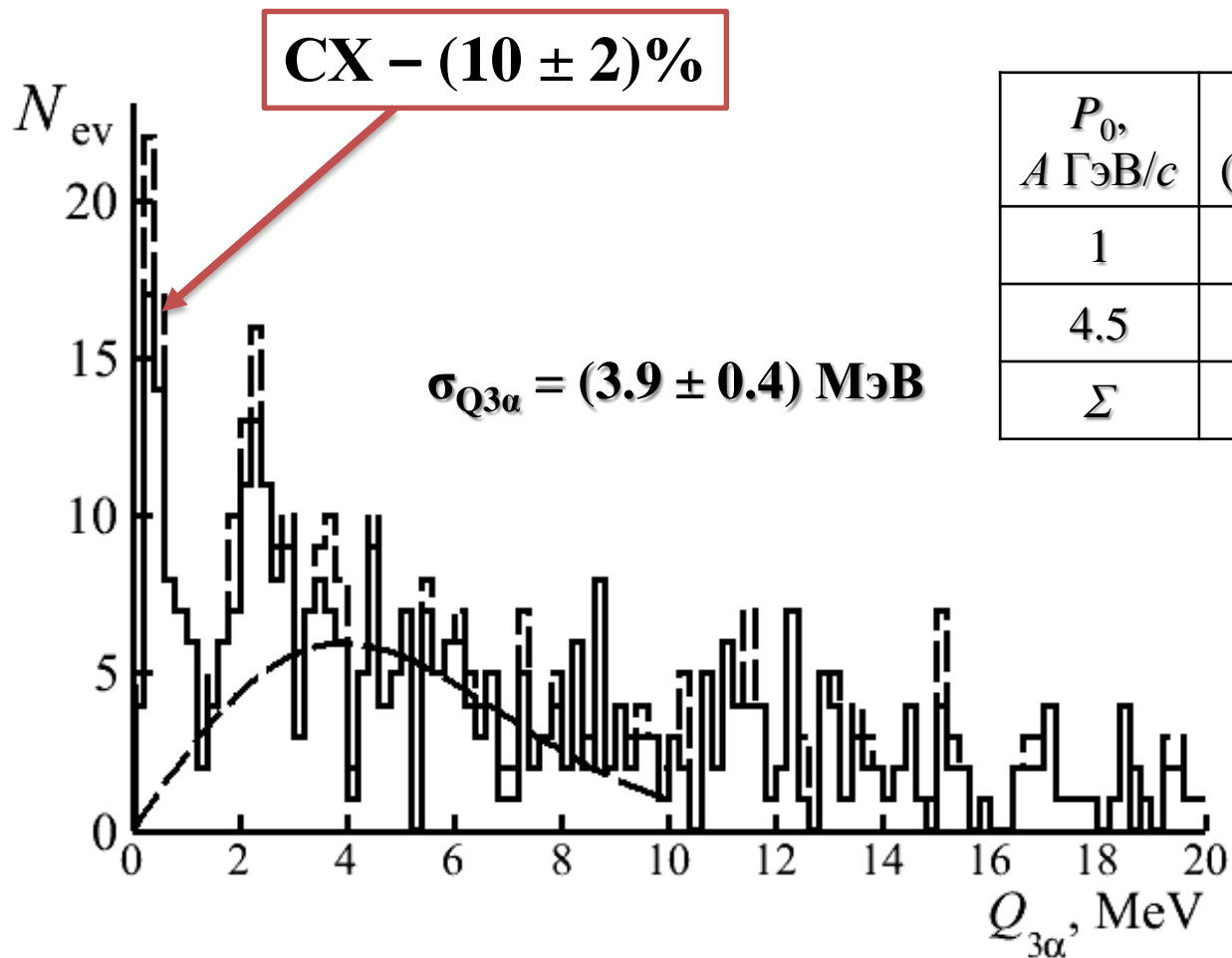
Наблюдение узких струй α -частиц в диссоциации ^{12}C



$^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Be} + \alpha - (20 \pm 2) \%$



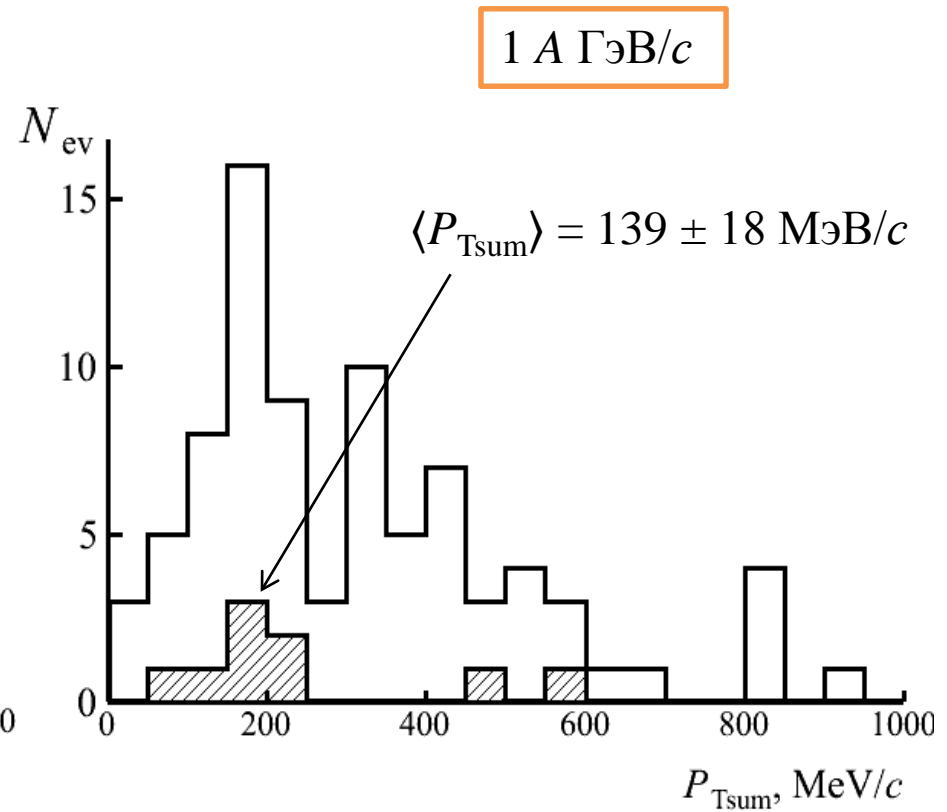
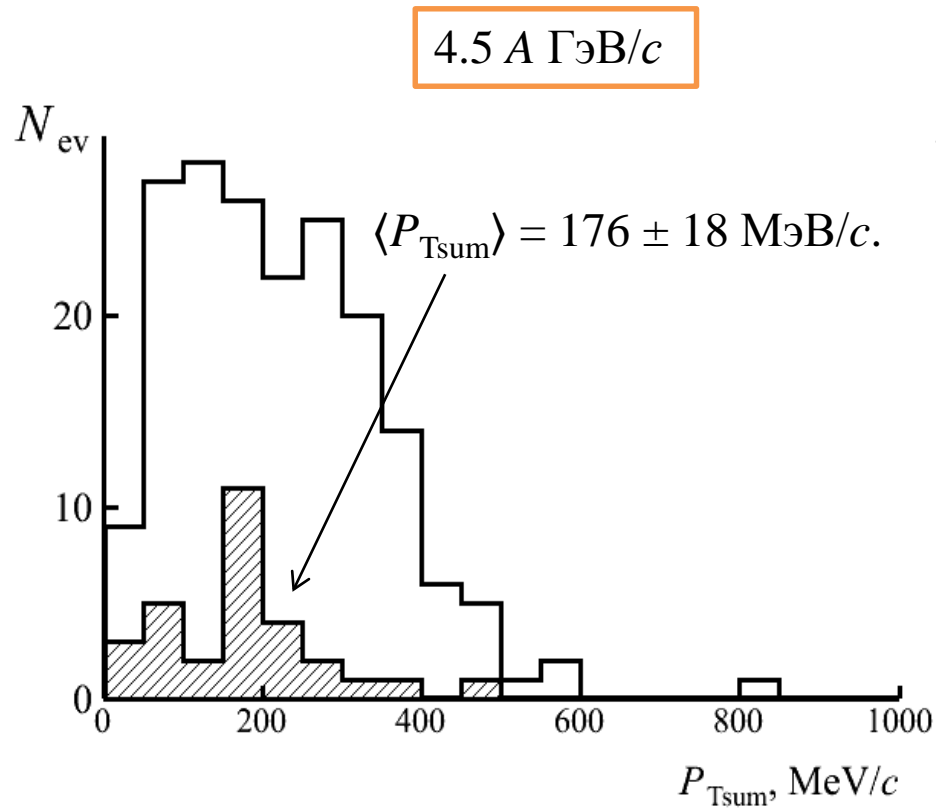
Идентификация событий в состоянии Хойла



Распределение по инвариантной массе α -троек $Q_{3\alpha}$ в диссоциации $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ при импульсе 4.5 А ГэВ/с (заштриховано) и 1 А ГэВ/с (добавлено); на вставке: область по $Q_{2\alpha}$ до 2 МэВ.

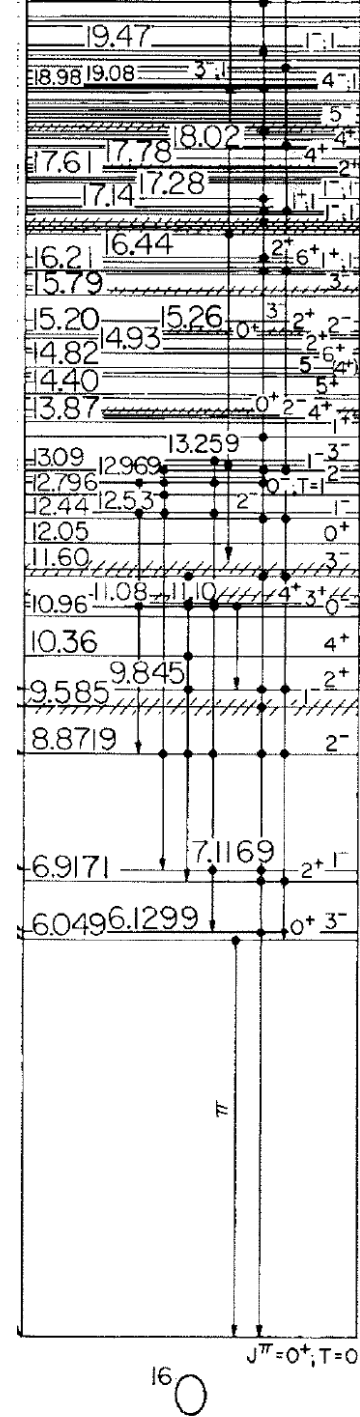
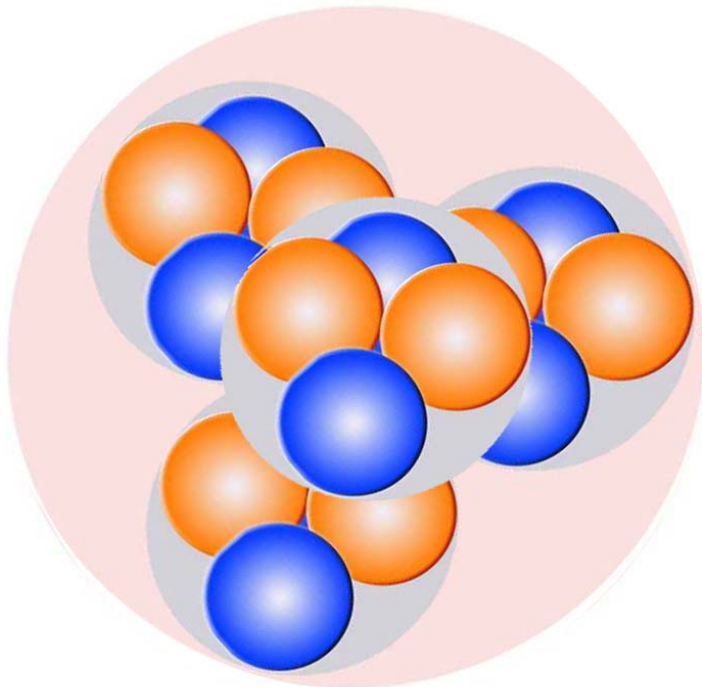
$$Q_{3\alpha} = \sqrt{\sum_{i \neq j} (E_{\alpha_i} E_{\alpha_j} - P_{\alpha_i} P_{\alpha_j} \cos \Theta_{2\alpha})} - 3m_{\alpha}$$

Импульсные распределения системы 3α -частиц



Распределение по полному поперечному импульсу P_{Tsum} троек α -частиц в событиях диссоциации ядер ^{12}C при импульсе 4.5 А ГэВ/с (а) и 1 А ГэВ/с (б); события $Q_{3\alpha} < 1$ МэВ отмечены штриховкой.

E_x (MeV \pm keV)	$J^\pi; T$	K^π	$\Gamma_{c.m.}$ or τ_m (keV)	Decay
14.620 ± 20	$4^{(+)}$		490 ± 15	α
14.660 ± 20	5^-	0^-	670 ± 15	α
14.8153 ± 1.6	$6^+; 0$		70 ± 8	α
14.926 ± 2	2^+		54 ± 5	p, α
15.097 ± 5	0^+		166 ± 30	p, α
15.196 ± 3	$2^-; 0$		63 ± 4	p, α
15.26 ± 50	$2^+; (0)$		300 ± 100	p, α

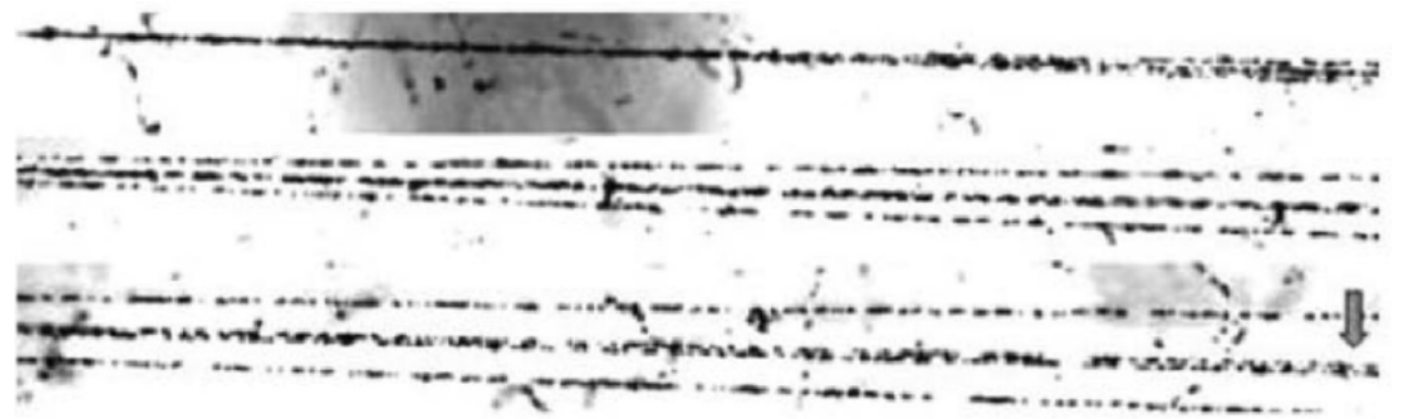
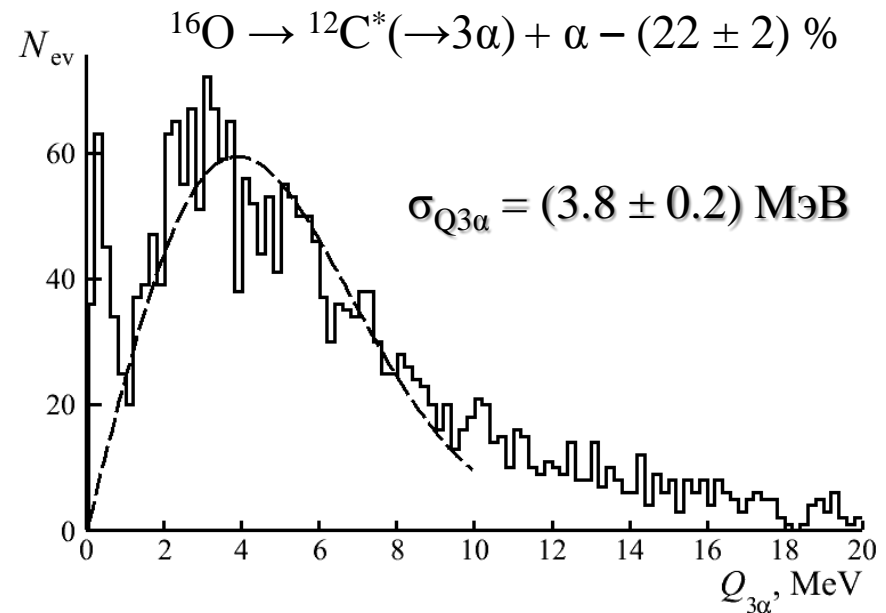
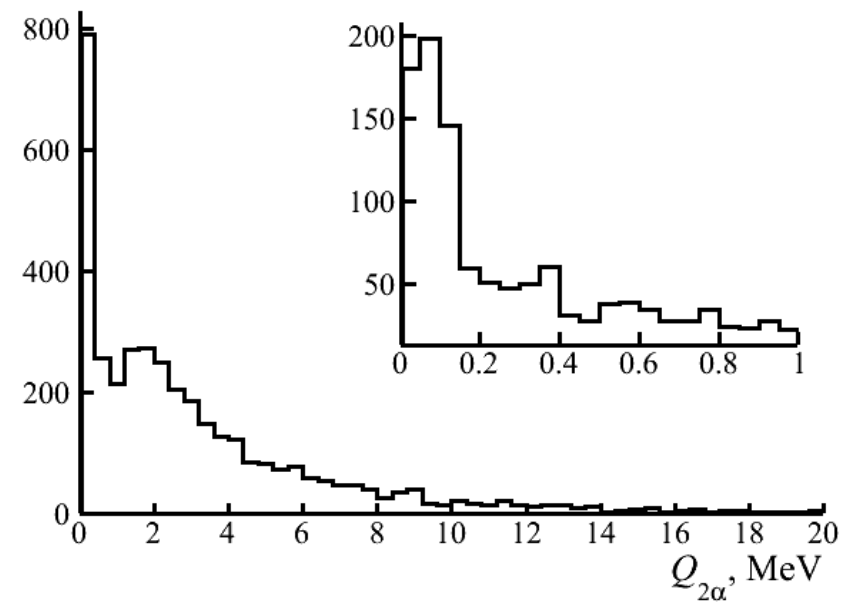


4 α
14.52 MeV

$^{15}\text{N} + p$
12.278 MeV

$^{12}\text{C} + \alpha$
7.162 MeV

Когерентная диссоциация ^{16}O

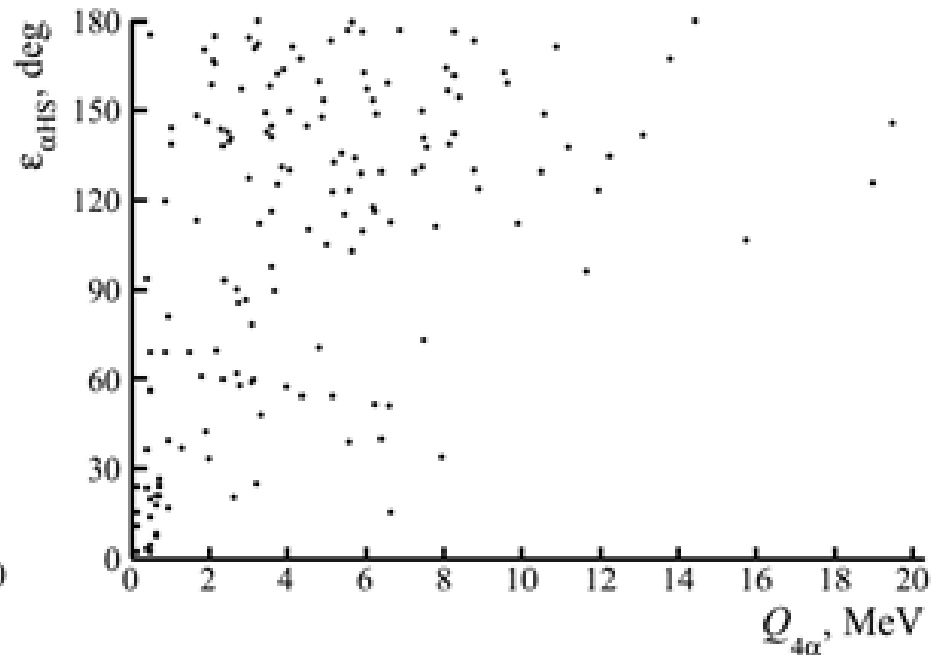
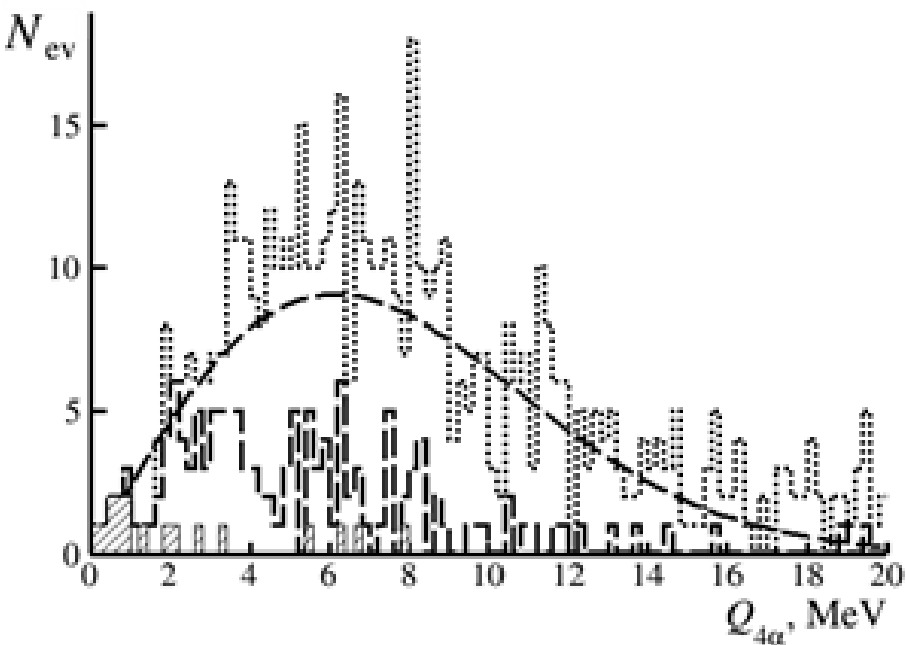


Фрагментация
релятивистского ядра
 $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ с импульсом
4.5 A ГэВ/ c в
периферическом
взаимодействии на ядре
эмульсии.

Инвариантная масса системы 4 α -частиц

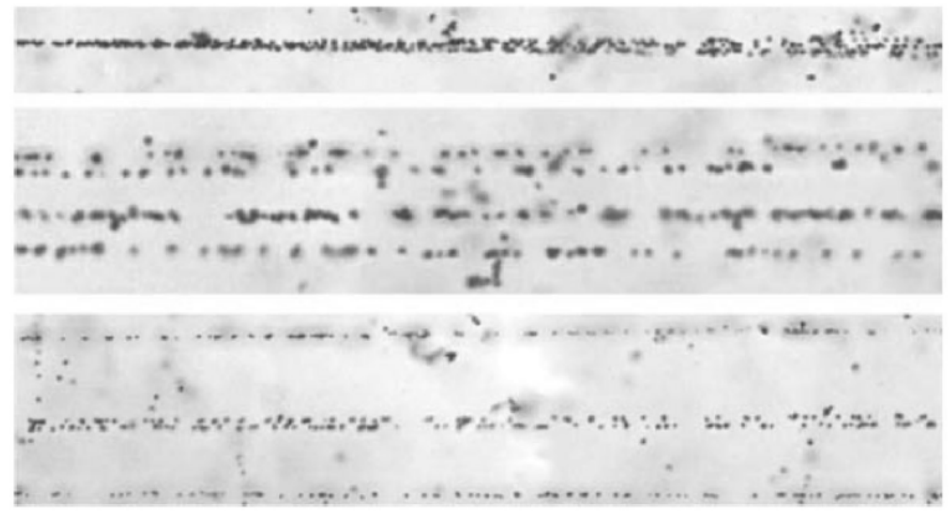
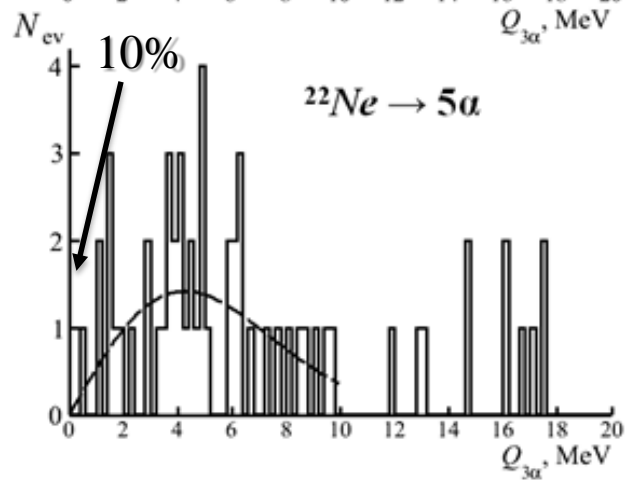
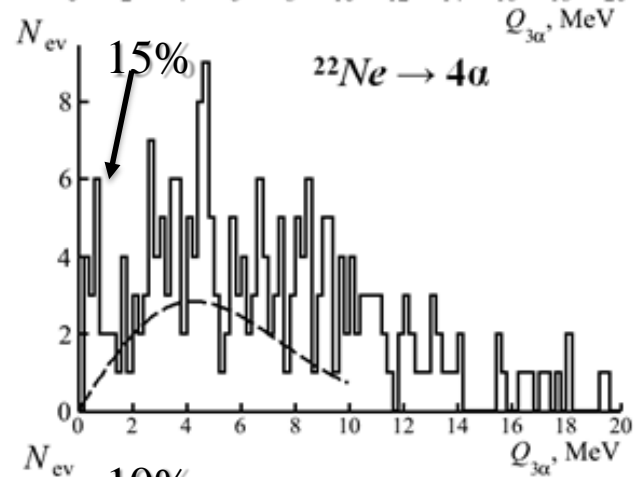
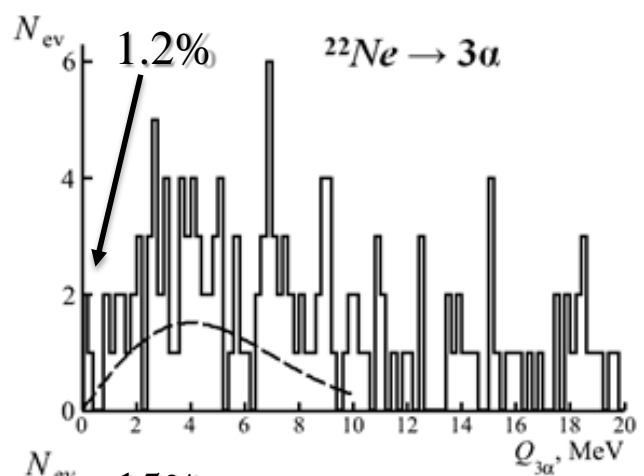
$$\sigma_{Q_{4\alpha}} = (6.1 \pm 0.2) \text{ МэВ}$$

$$\langle Q_{4\alpha} \rangle = (624 \pm 84) \text{ кэВ}$$

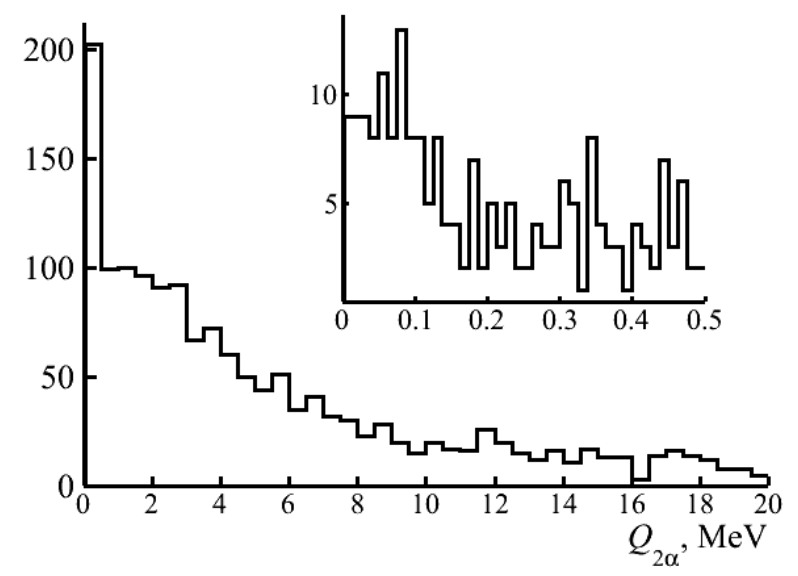


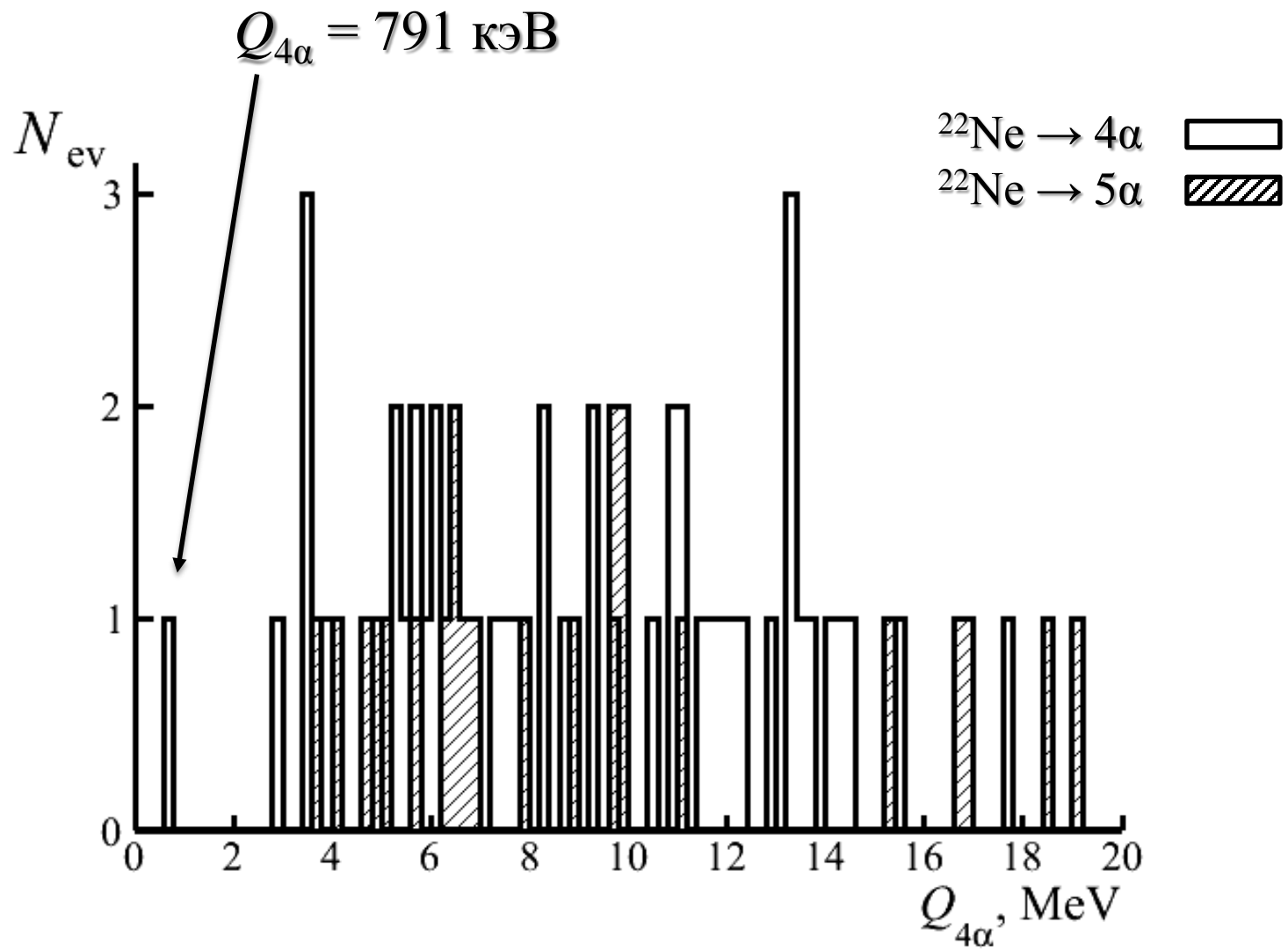
Распределение по инвариантной массе $Q_{4\alpha}$ в 641 "белой" звезде $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ при 3.65 А ГэВ всех 4α -квартетов (пунктир), событий αHS (пунктир) и событий αHS , удовлетворяющих $\epsilon_{\alpha\text{HS}} < 45^\circ$ (заштрихованы); линия - распределение Рэлея.

Фрагментация ядер ^{22}Ne



Фрагментация релятивистского ядра $^{16}\text{Ne} \rightarrow 5\alpha$ с импульсом 4.1 А ГэВ/с в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии.





Перспектива исследования ^{14}N

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2007, том 70, № 7, с. 1271–1275

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

ПЕРИФЕРИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР ^{14}N С ЯДРАМИ ФОТОЭМУЛЬСИИ

© 2007 г. Т. В. Щедрина^{1)*}, В. Браднава¹⁾, С. Вокал^{1),2)}, А. Вокалова^{1),2)}, П. И. Зарубин^{1)**}, И. Г. Зарубина¹⁾, А. Д. Коваленко¹⁾, А. И. Малахов¹⁾, Г. И. Орлова³⁾, П. А. Рукояткин¹⁾, В. В. Русакова¹⁾, М. Хайдук⁴⁾, С. П. Харламов³⁾, М. М. Чернявский³⁾

Таблица 2. Распределение по зарядовой топологии “белых звезд” и взаимодействий с образованием фрагментов ядра-мишени при диссоциации ядер ^{14}N с импульсом 2.86 А ГэВ/с (Z_{fr} — заряд тяжелого фрагмента, $N_{Z=1}$ и $N_{Z=2}$ — число однозарядных и двухзарядных фрагментов в событии, N_{ws} — число “белых звезд”, N_{fr} — число звезд с фрагментами ядра-мишени, N_{Σ} — полное число звезд (и их доля в %))

Z_{fr}	6	5	5	4	3	3	—	—
$N_{Z=1}$	1	—	2	1	4	2	3	1
$N_{Z=2}$	—	1	—	1	—	1	2	3
N_{ws}	13	4	3	1	1	1	6	17
N_{fr}	15	1	3	3	—	2	5	32
N_{Σ}	28	5	6	4	1	3	11	49
$N_{\Sigma}, \%$	26	5	5	4	1	3	10	46

Число событий

$^{14}\text{N} \rightarrow ^8\text{Be} - 25\%$

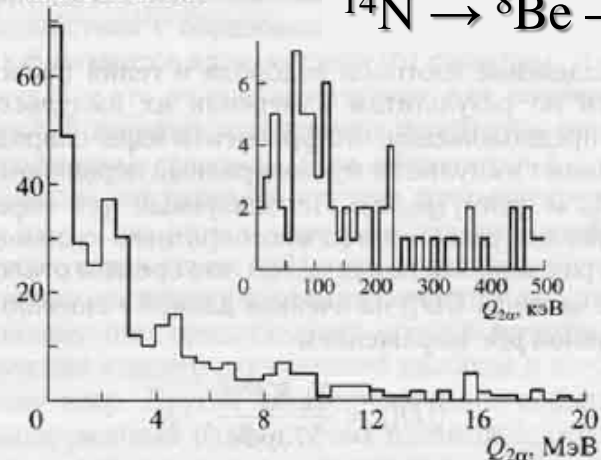


Рис. 4. Распределение по инвариантной энергии возбуждения $Q_{2\alpha}$ для пар α -частиц для процесса $^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha + X$. На вставке: часть распределения в интервале между 0–500 кэВ.

Число событий

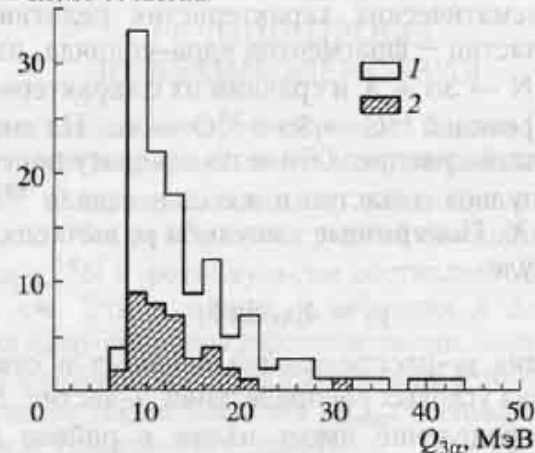


Рис. 3. Распределение по инвариантной энергии возбуждения $Q_{3\alpha}$ 3α -системы относительно основного состояния ядра ^{12}C для процесса $^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha + X$ (1 — все события данной реакции диссоциации, 2 — “белые звезды”).

Заключение

- Выполнен анализ данных по диссоциации релятивистских ядер ^{12}C , ^{16}O и ^{22}Ne в каналах с образованием α -частиц.
- Определен вклад нестабильного ядра ^8Be в $n\alpha$ -каналы диссоциации ядер ^{12}C , ^{16}O и ^{22}Ne .
- Идентифицированы события с образованием троек α -частиц в состоянии Хойла. Установлено, что вероятность наблюдения таких событий в диссоциации $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ ($11 \pm 3\%$), $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ ($22 \pm 2\%$) и $^{22}\text{Ne} \rightarrow 3\alpha$ ($1.2 \pm 0.7\%$), $\rightarrow 4\alpha$ ($15 \pm 4\%$), $\rightarrow 5\alpha$ (10%).
- В распределении по инвариантной массе ансамбля четырех α -частиц в диссоциации ядра ^{16}O дано указание на вклад распадов состояния 0^+_6 в $7 \pm 2\%$ событий.
- Для проверки универсальности образования состояния Хойла возобновлен поиск периферической диссоциации ядра ^{14}N в лидирующем канале $3\text{He} + \text{H}$.

