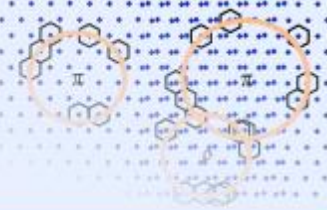




XI

Черенковские  
чтения

Новые методы в  
экспериментальной ядерной  
физике и физике частиц



Москва, ФИАН, 17 апреля 2018 г.

# Состояние Хойла в диссоциации релятивистских ядер $^{12}\text{C}$

*А. А. Зайцев*

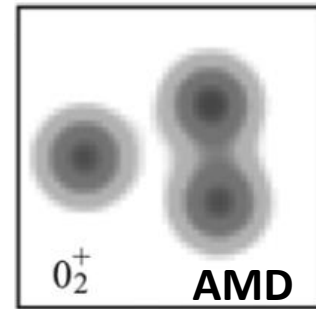
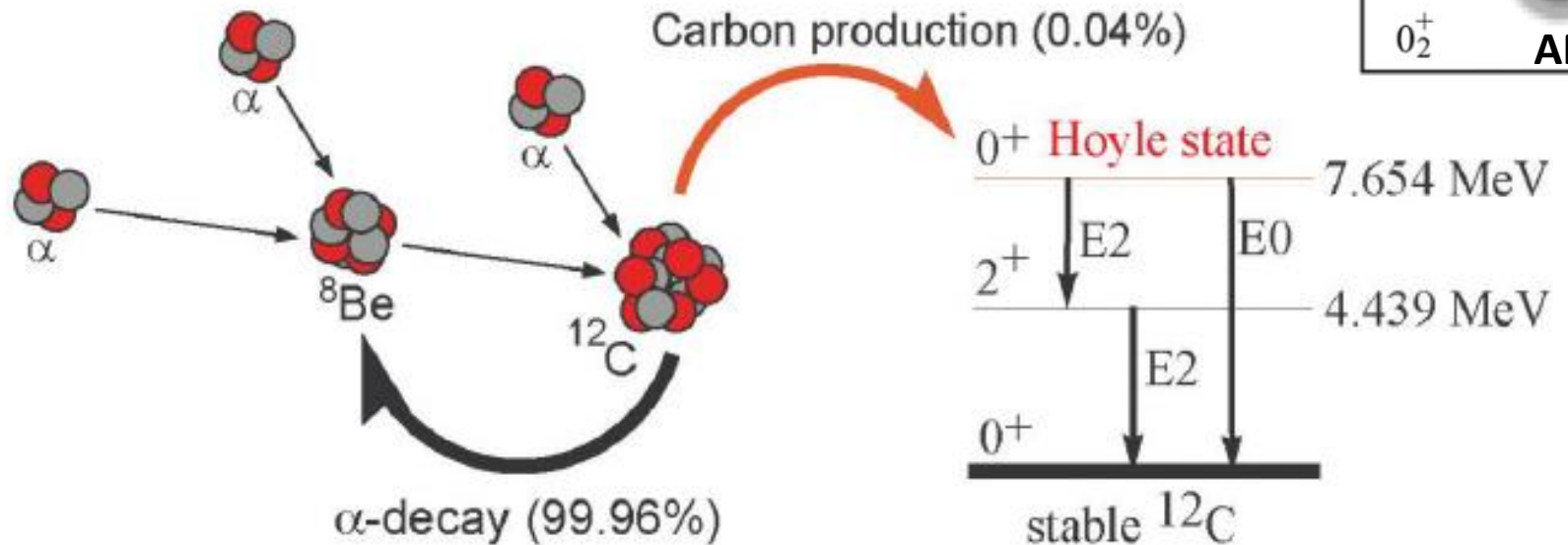
# ON NUCLEAR REACTIONS OCCURRING IN VERY HOT STARS. I. THE SYNTHESIS OF ELEMENTS FROM CARBON TO NICKEL



F. HOYLE\*

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

*Received December 22, 1953*



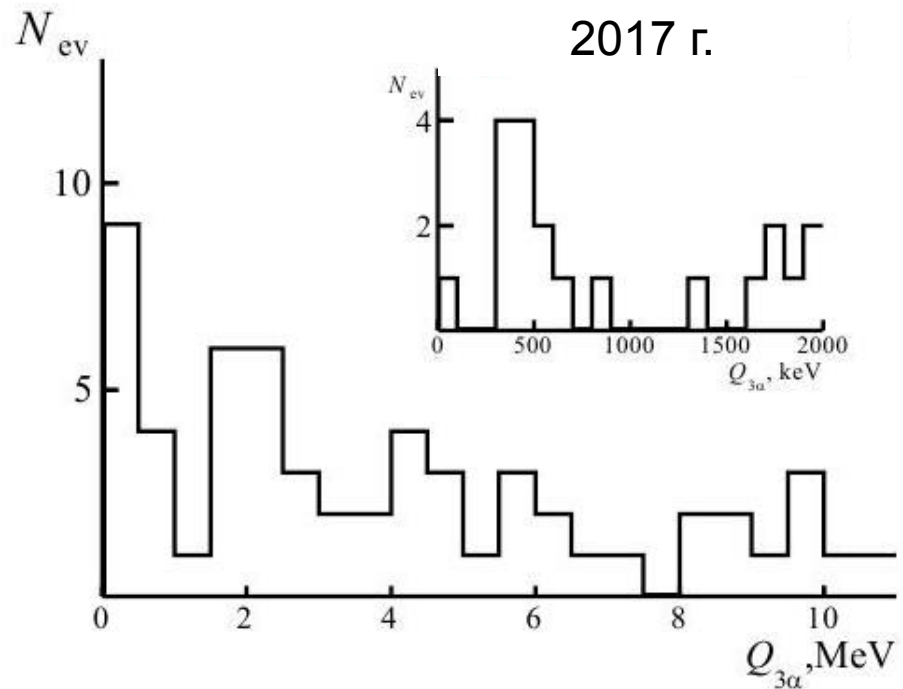
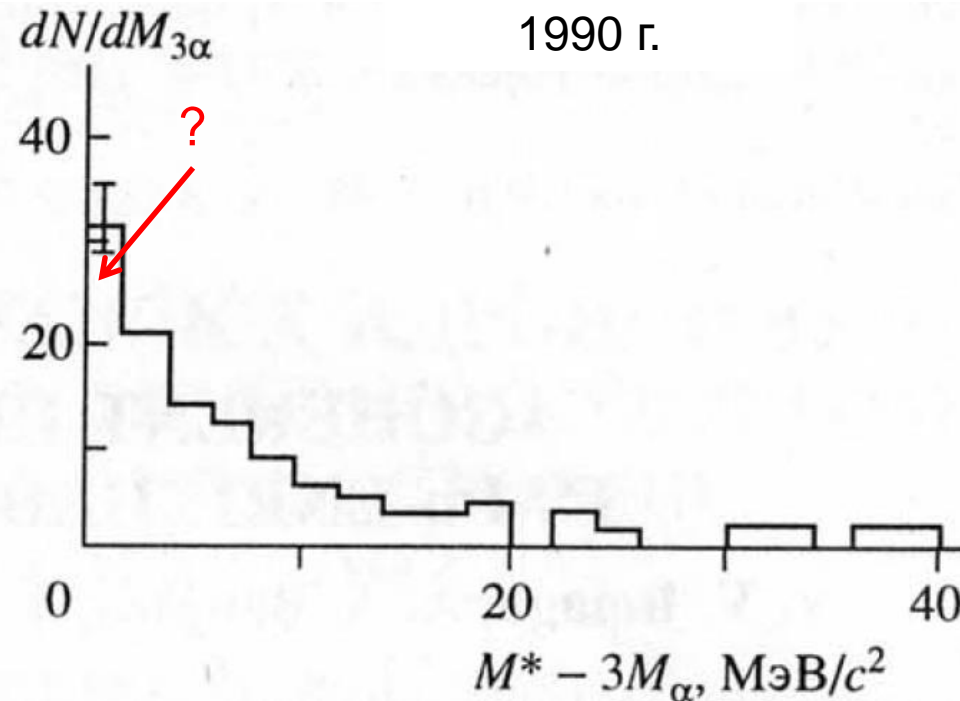
**КОГЕРЕНТНАЯ ДИССОЦИАЦИЯ  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  ПРИ 4.5A ГЭВ/с  
НА ЯДРАХ ЭМУЛЬСИИ, ОБОГАЩЕННОЙ СВИНЦОМ**

© 1995 г. В. В. Белага, А. А. Бенджаза<sup>1)</sup>, В. В. Русакова, Дж. А. Саломов<sup>2)</sup>, Г. М. Чернов

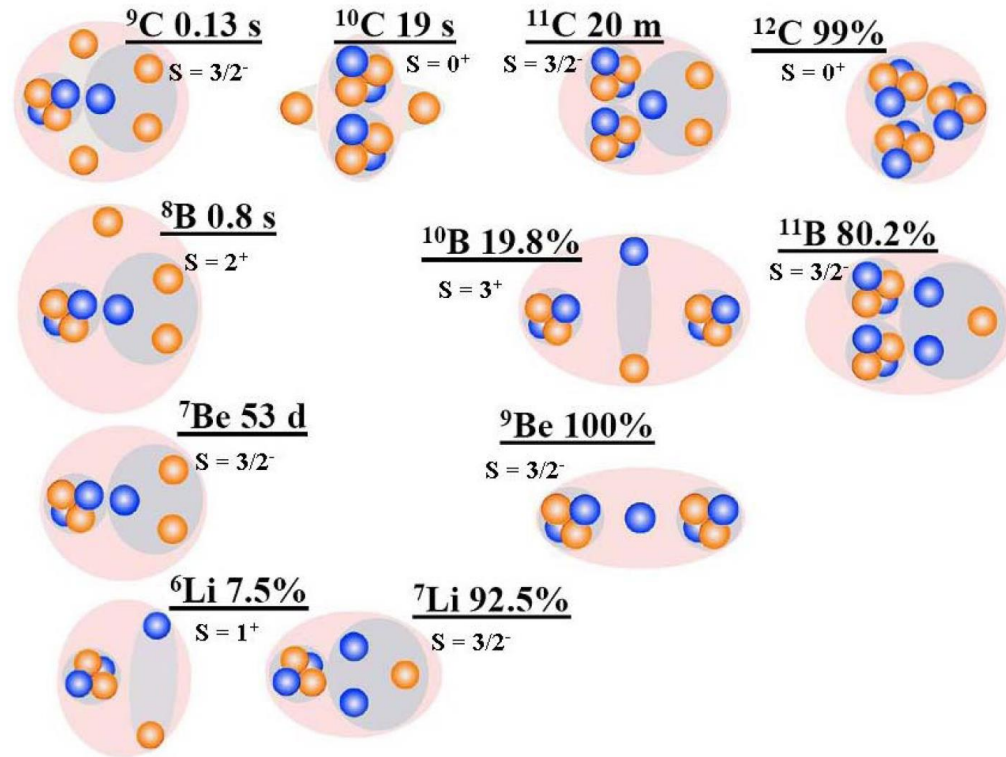
*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия*

Поступила в редакцию 16.05.94 г.; после доработки 06.03.95 г.

Изучались распределения по поперечным импульсам и корреляционные характеристики релятивистских  $\alpha$ -частиц из реакции когерентной диссоциации ядра углерода на три  $\alpha$ -частицы при  $p_0 = 4.5A$  ГЭВ/с в эмульсии, обогащенной свинцом. Проведен сравнительный анализ данных, полученных в обычных и обогащенных свинцом эмульсионных стопках. Показано, что статистическая модель быстрой фрагментации не описывает импульсные и корреляционные характеристики  $\alpha$ -частиц в с.ц.и. ядра углерода. Оценена распадная температура ядра  $^{12}\text{C}$ , которая слабо зависит от массы ядра-мишени. Показано, что фрагментирующее ядро углерода приобретает в соударении угловой момент.



# Проект БЕККЕРЕЛЬ на Нуклотроне ОИЯИ



В рамках проекта ведется изучение эволюции кластерной структуры при когерентной диссоциации релятивистских ядер методом ядерной эмульсии. Исследования обеспечиваются проявочной лабораторией и лабораторией просмотровых и измерительных микроскопов сектора толстослойных ядерных фотоэмульсий Лаборатории физики высоких энергий имени В.И. Векслера и А.М. Балдина ОИЯИ.

**Grain -  $0.2 \mu m$**

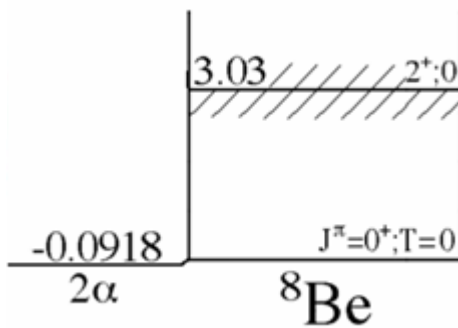
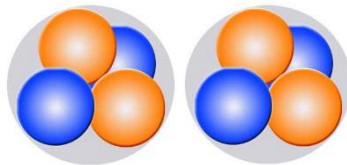
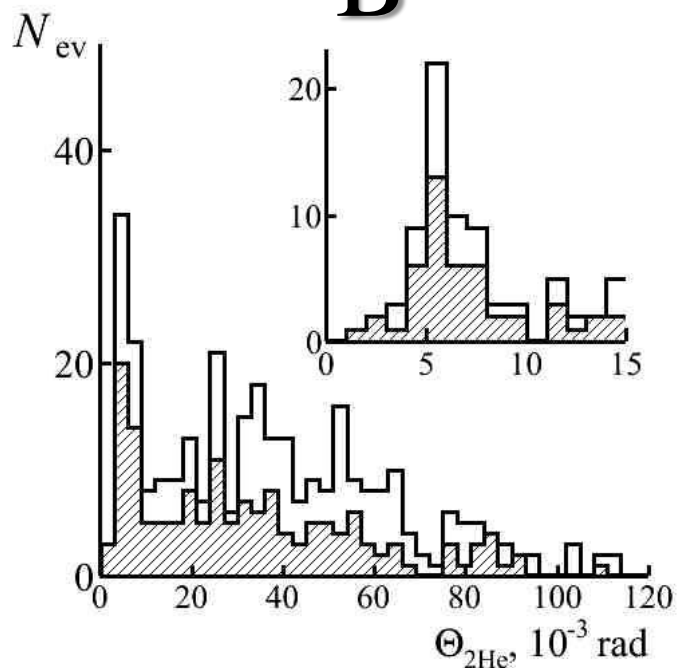
**Atom -  $10^{-4} \mu m$**

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

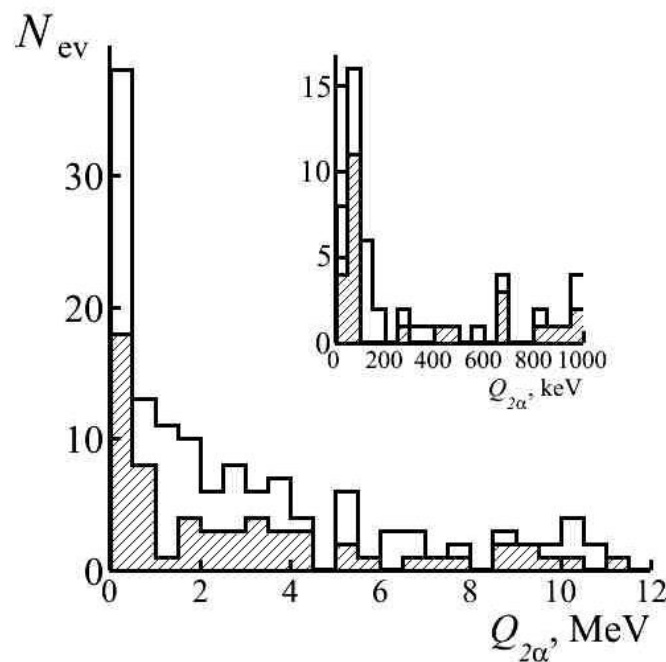
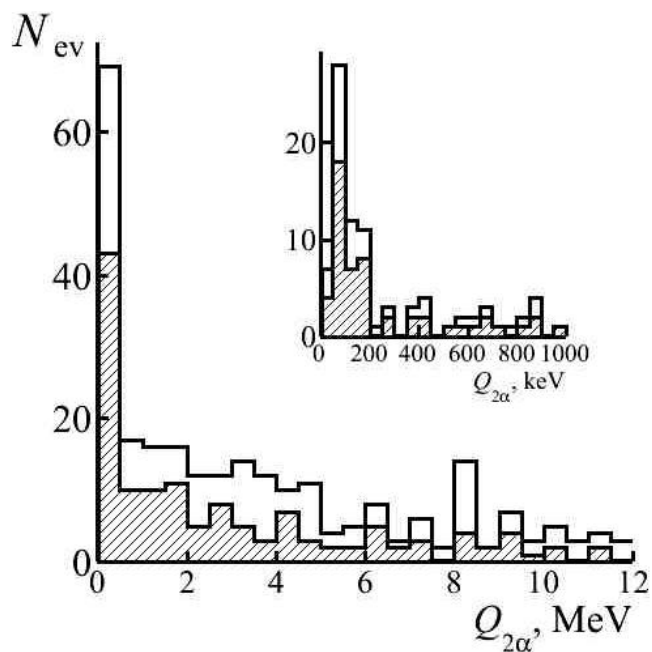
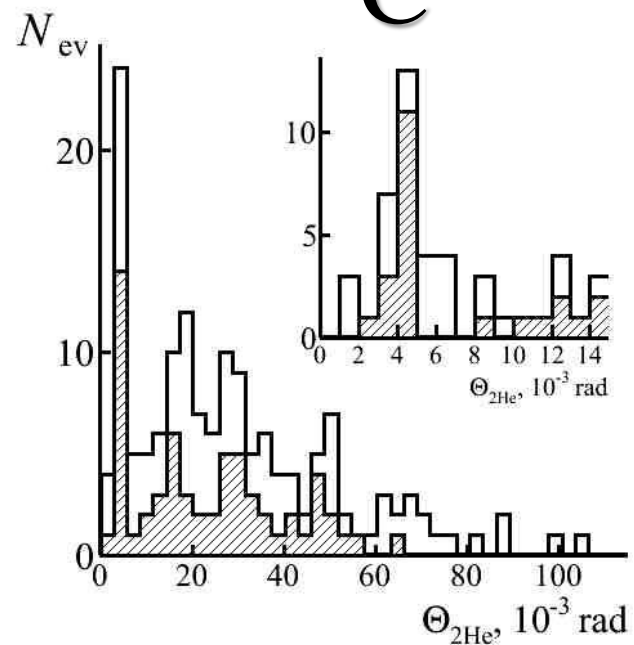
**$60 \mu m$**



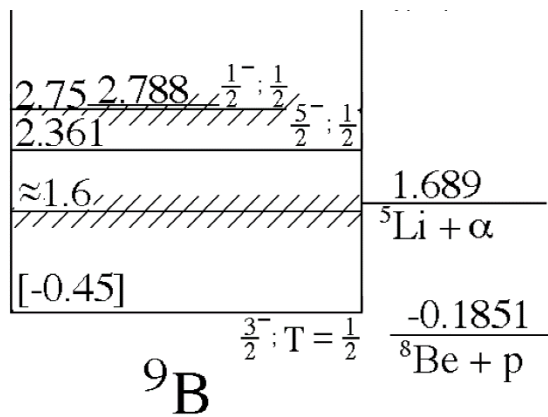
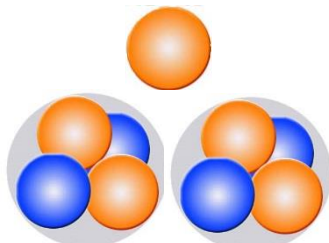
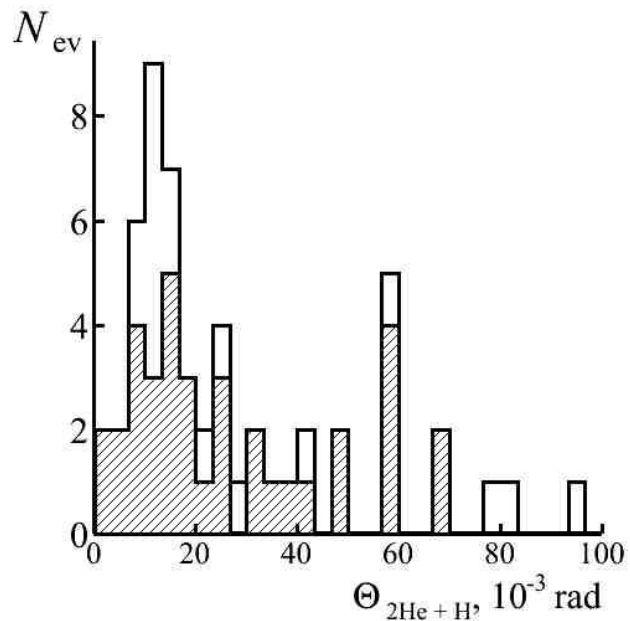
# $^{10}\text{B}$



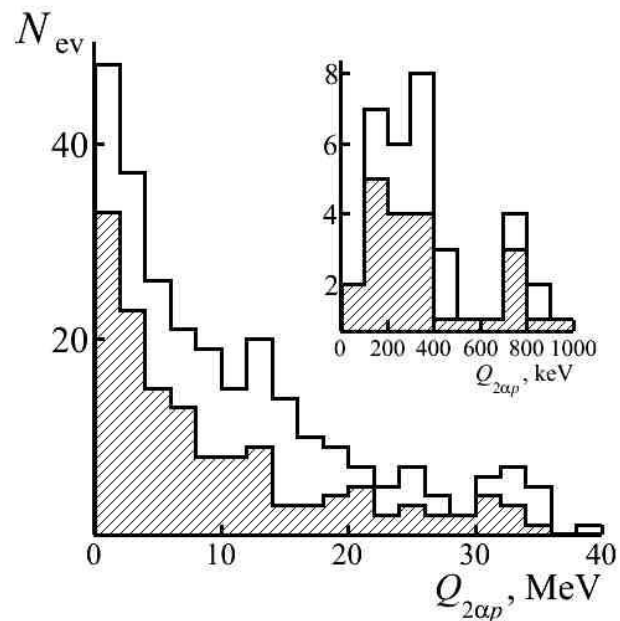
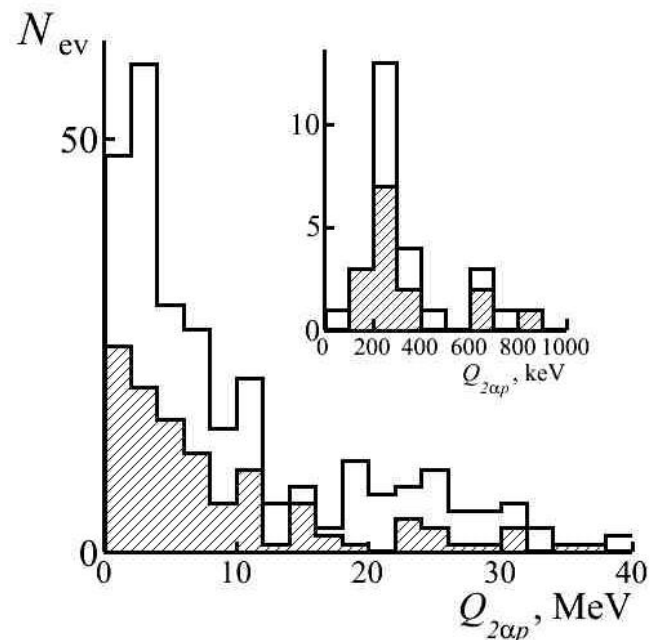
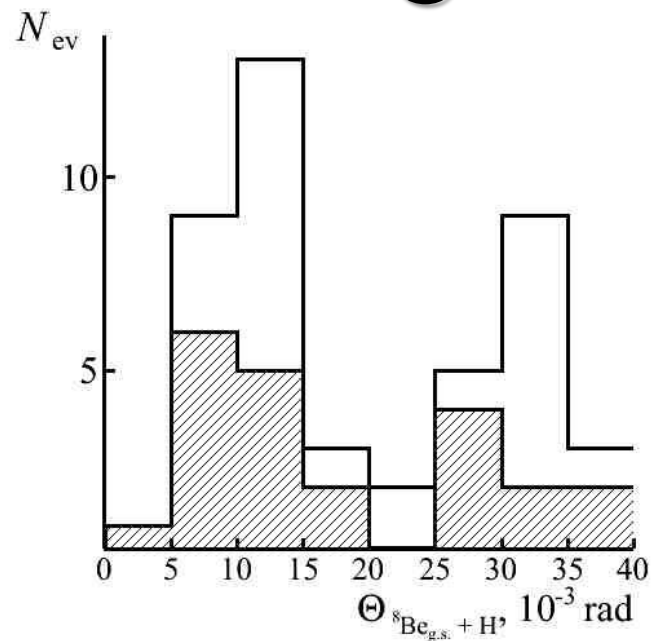
# $^{11}\text{C}$



# $^{10}\text{B}$

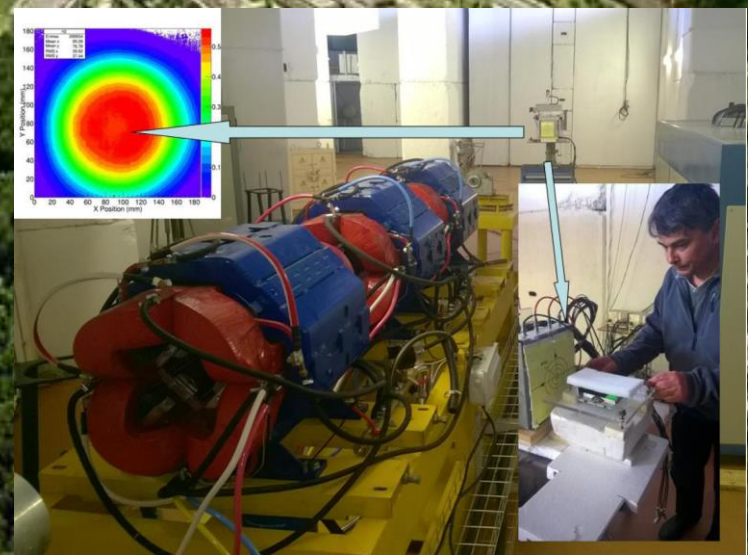
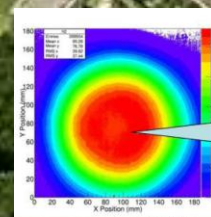


# $^{11}\text{C}$



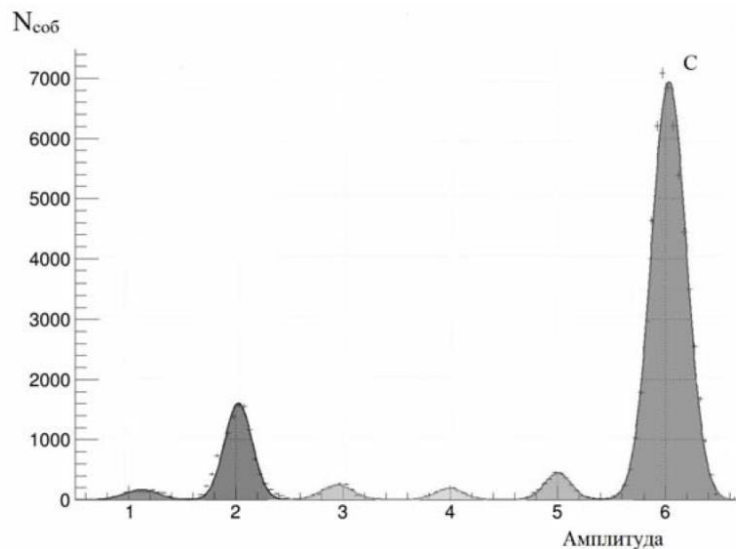
# ИФВЭ, Протвино

## $^{12}\text{C}$ 450 А МЭВ

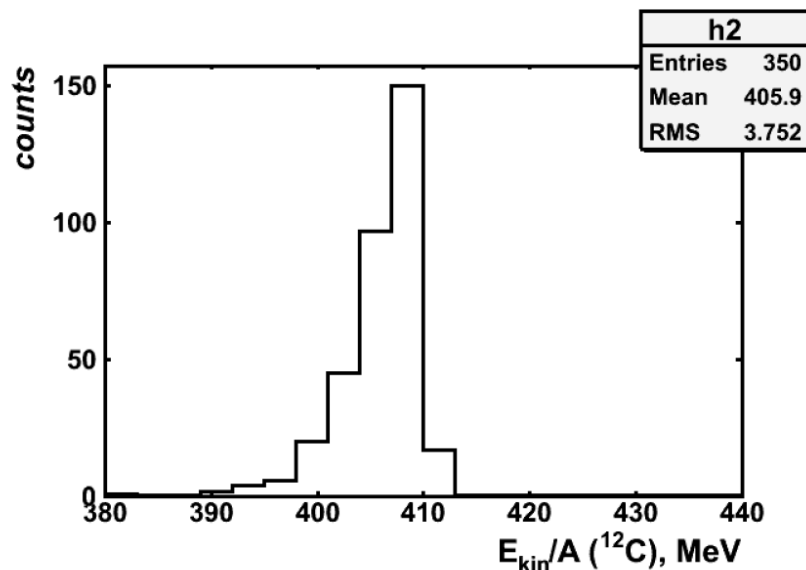




Мероприятия, осуществленные в декабре 2016 г., позволили контролируемым образом облучить слои ЯЭ толщиной 500 мкм. Производство таких слоев возобновлено компанией “Славич” (г. Переславль Залесский). Для обеспечения плотности частиц в месте облучения 2000-4500 ядер/см<sup>2</sup> был изменен режим медленного вывода, снижена эффективность вывода, точка облучения ЯЭ перенесена дополнительно на 8 метров по направлению пучка, длительность вывода сокращена с 600 до 400 мс.



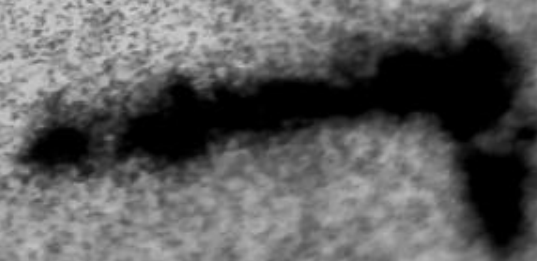
Состав пучка ядер углерода медицинского канала У-70 в месте облучения ядерной эмульсии



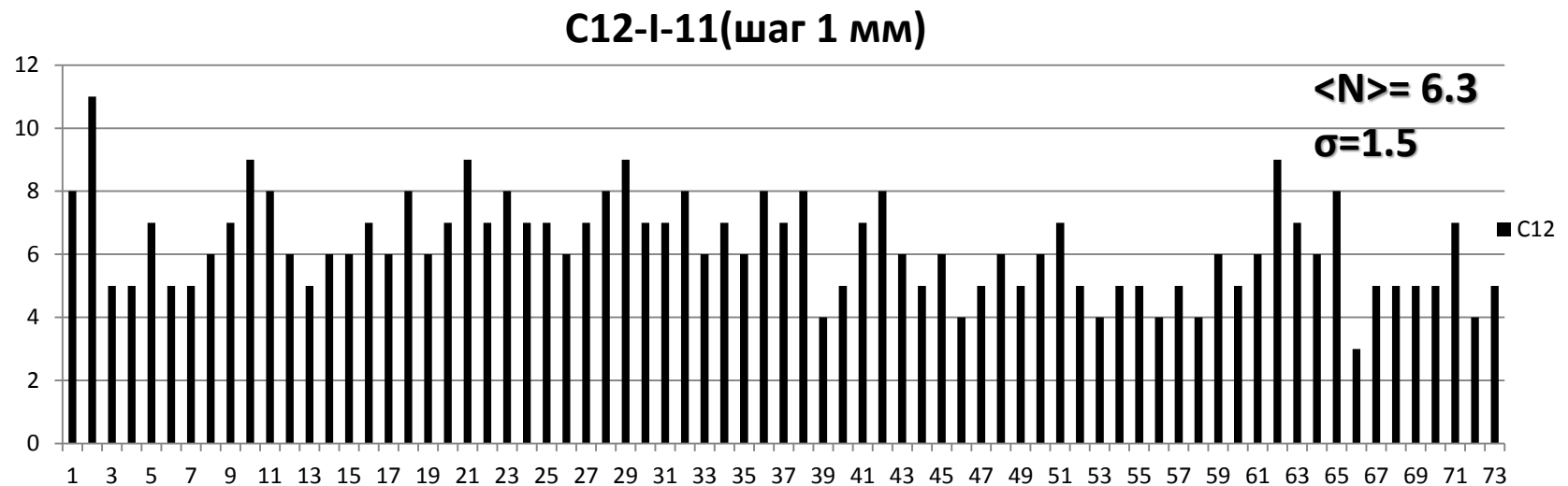
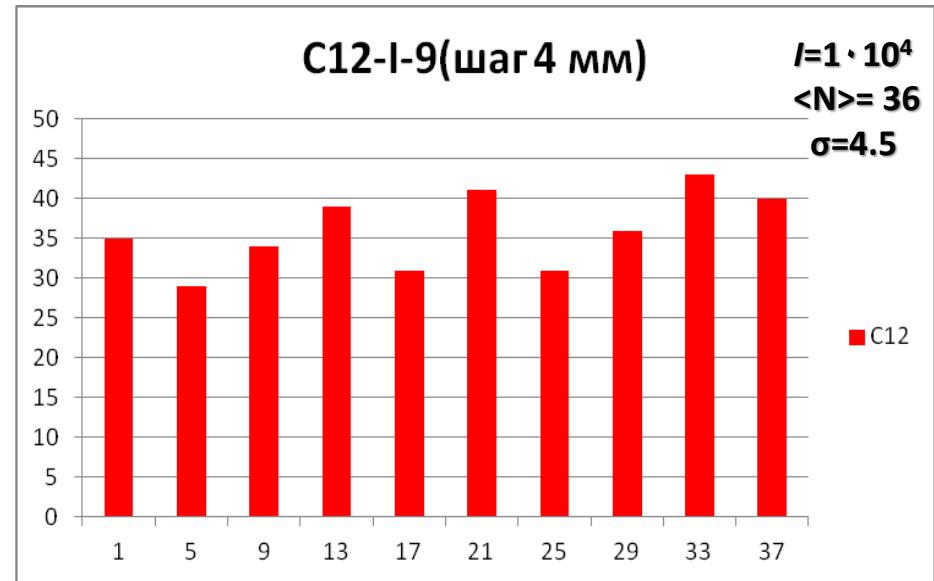
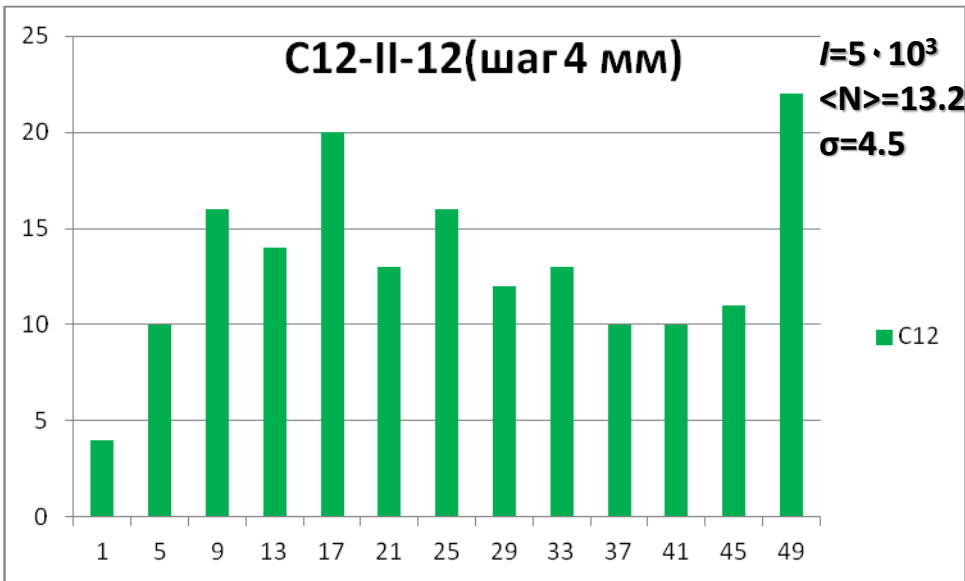
Моделирование прохождения <sup>12</sup>C по каналу

Для контроля облучения ядерных эмульсий были использованы три счётчика: на основе сцинтилляторов производства ИФВЭ (пластический полистирольный типа СЦ-301) размером 10×10 мм<sup>2</sup> с толщиной 1 мм и ФЭУ-85. При облучении стопки слоев ЯЭ устанавливались перед счётчиками. На рис. 6. представлен состав пучка ядер углерода медицинского канала У-70 в месте облучения ЯЭ. Доля ядер с зарядом 6 составила около 78%, 5 – 2%, 4 – 2%, 3 – 2%, 2 – 14%, 1 – 2%. Такая смесь является ожидаемым следствием отсутствия вакуумного ионопровода и сепарирующих магнитов. Этот факт не затрудняет отбор “белых” звезд. Напротив, возникает возможность попутных калибровок по заряду и многократному рассеянию.

Плотность пучка  $^{12}\text{C}$  в слое ЯЭ



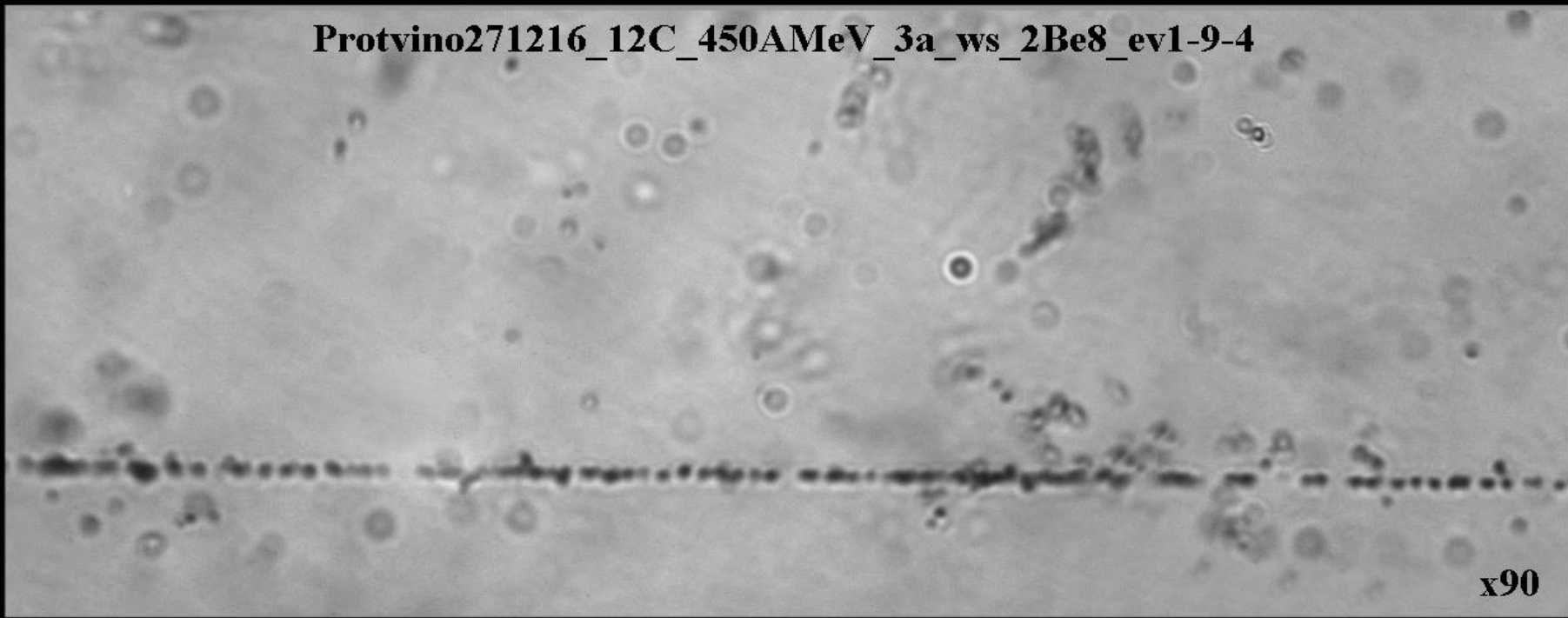
# Плотность входящего пучка в ЯЭ



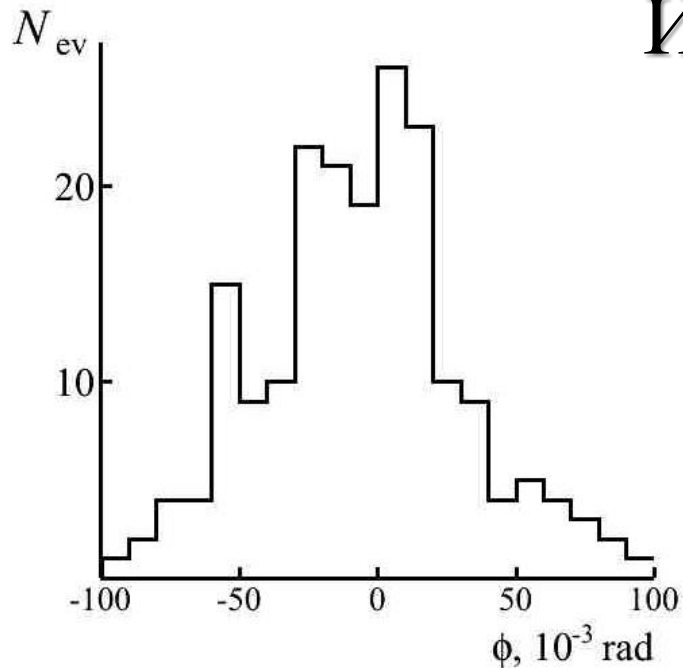
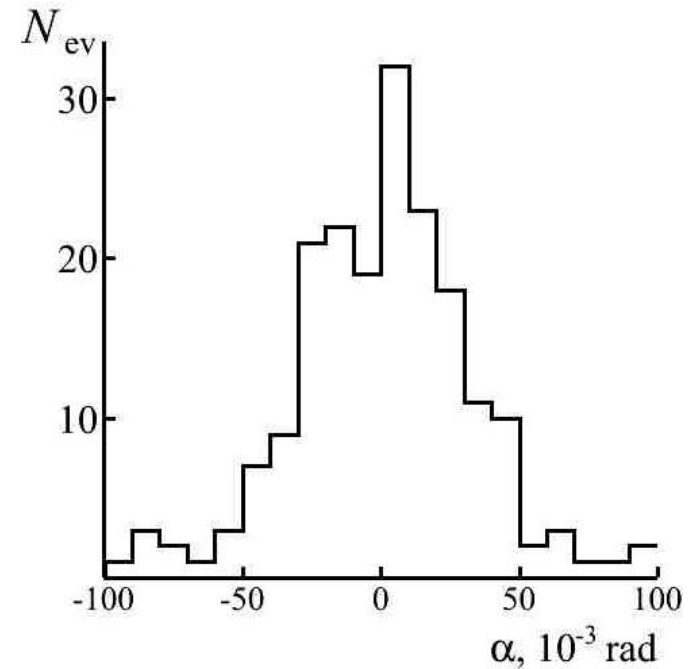
# Поиск событий $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$

Protvino271216\_12C\_450AMeV\_3a\_ws\_2Be8\_ev1-9-4

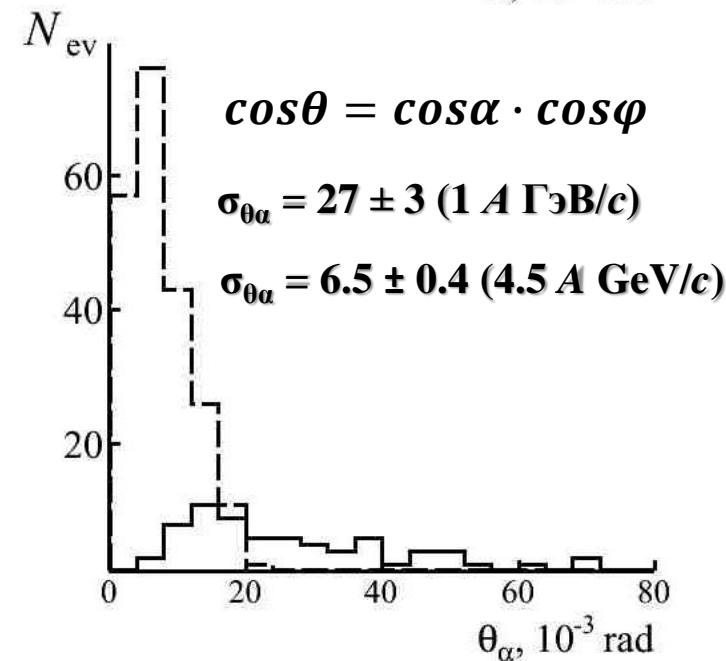
x90



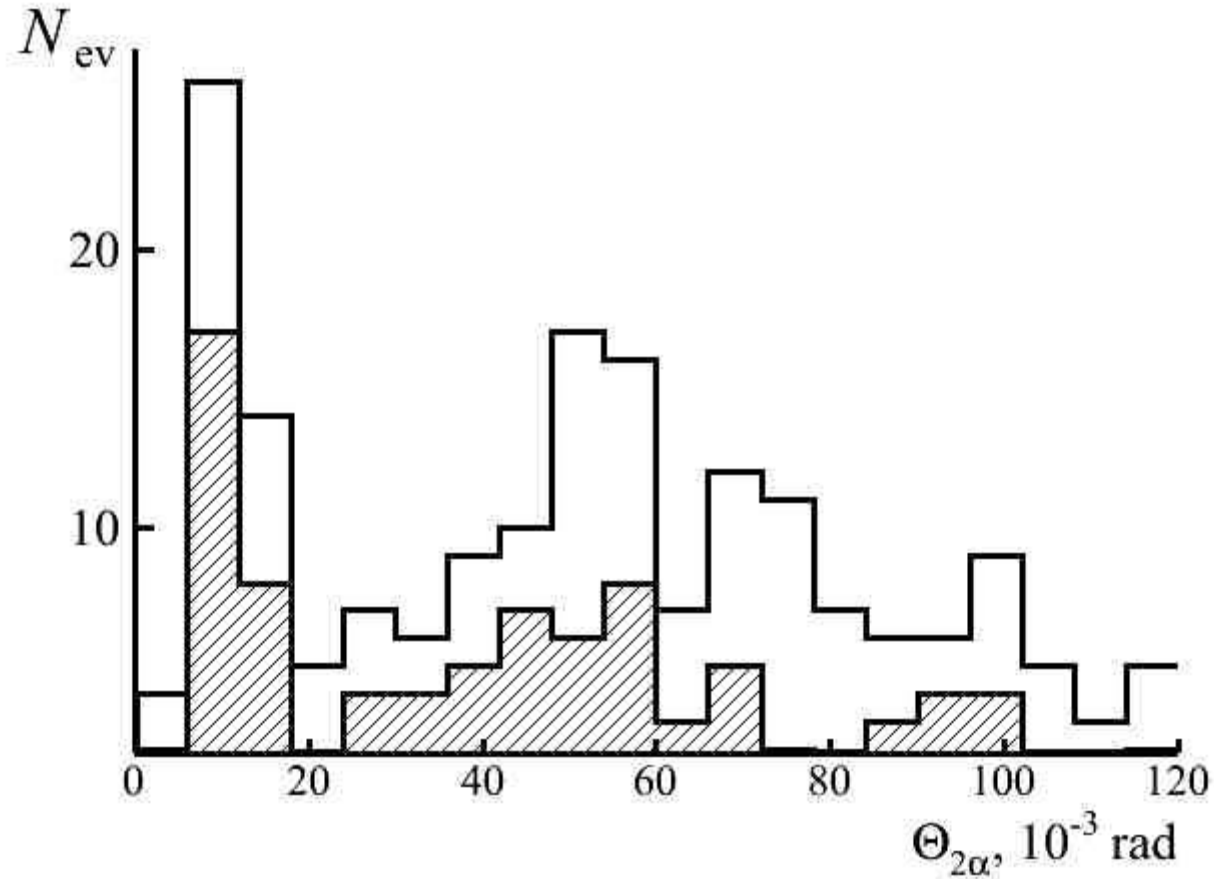
# Угловые измерения треков $\alpha$ -частиц



Измерено 74  
события  
 $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$

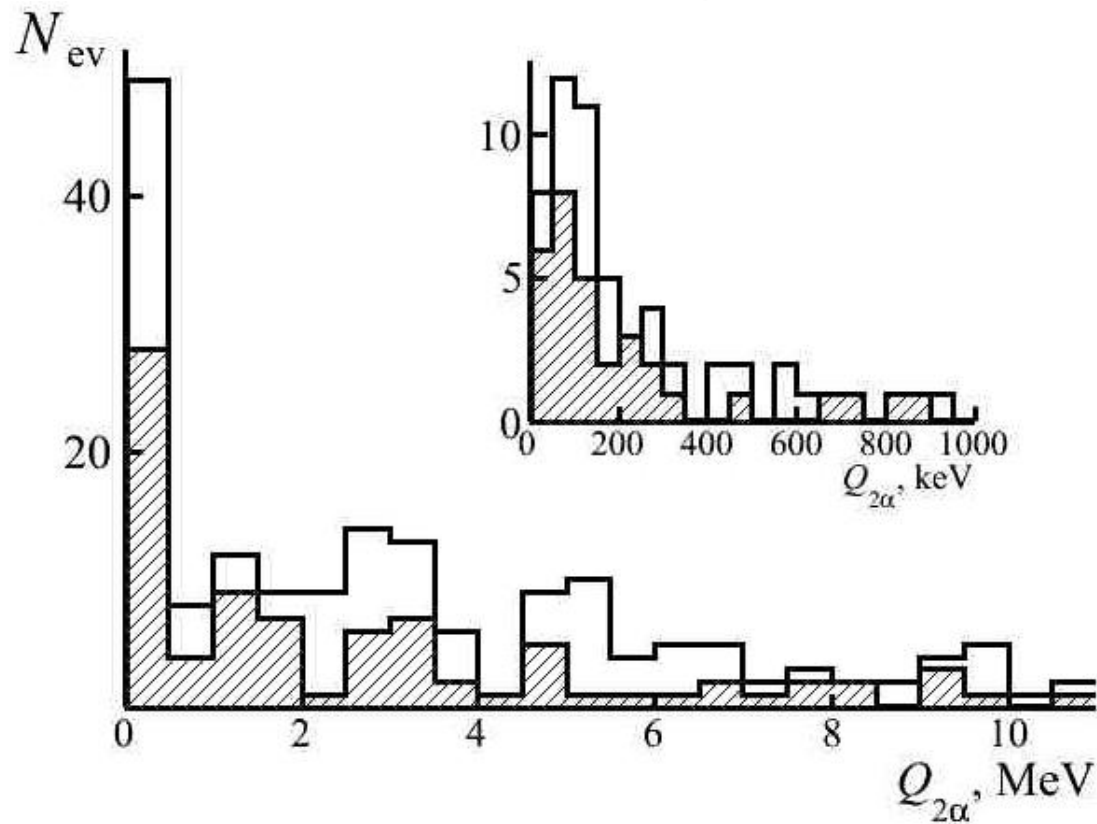


# Распределения по пространственному углу между парами $\alpha$ -частиц



$$\langle \theta_{2\alpha} \rangle (< 20 \text{ мрад}) = 11.4 \pm 0.7 (4.8) \text{ мрад}$$

# Распределения по энергии возбуждения системы 2 $\alpha$ -частиц



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

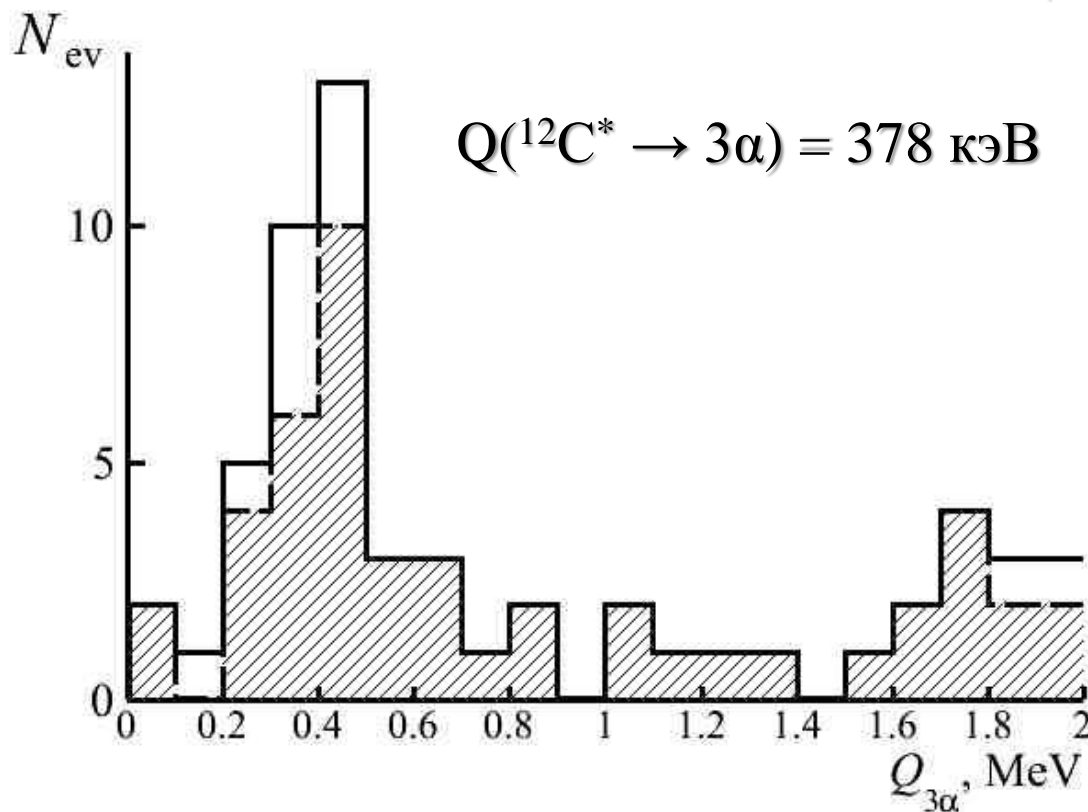
$$\langle Q_{2\alpha} \rangle (<300 \text{ кэВ}) = 116 \pm 12 (75) \text{ кэВ}$$

**Средние значения  $\Theta_{2\alpha}$  (для  $Q_{2\alpha} < 300$  кэВ) и  $Q_{2\alpha}$  в области распада нестабильного ядра  ${}^8\text{Be}_{\text{gs}}$**

<b>Ядро (<math>P_0</math>, А ГэВ/с)</b>	<b><math>\langle\Theta_{2\alpha}\rangle</math> (RMS), <math>10^{-3}</math> рад (<math>Q_{2\alpha} &lt; 300</math> кэВ)</b>	<b><math>\langle Q_{2\alpha}\rangle</math> (RMS), кэВ</b>
<b><math>{}^{12}\text{C}</math> (4.5)</b>	<b><math>2.1 \pm 0.1</math> (0.8)</b>	<b><math>109 \pm 11</math> (83)</b>
${}^{14}\text{N}$ (2.9)	$2.9 \pm 0.2$ (1.9)	$119.6 \pm 9.5$ (72)
${}^9\text{Be}$ (2.0)	$4.4 \pm 0.2$ (2.1)	$86 \pm 4$ (48)
${}^{10}\text{C}$ (2.0)	$4.6 \pm 0.2$ (1.9)	$63 \pm 7$ (83)
${}^{11}\text{C}$ (2.0)	$4.7 \pm 0.3$ (1.9)	$77 \pm 7$ (40)
${}^{10}\text{B}$ (1.6)	$5.9 \pm 0.2$ (1.6)	$101 \pm 6$ (46)
<b><math>{}^{12}\text{C}</math> (1.0)</b>	<b><math>10.4 \pm 0.6</math> (3.7)</b>	<b><math>117 \pm 12</math> (75)</b>



# Распределения по энергии возбуждения системы 3 $\alpha$ -частиц



Данные:

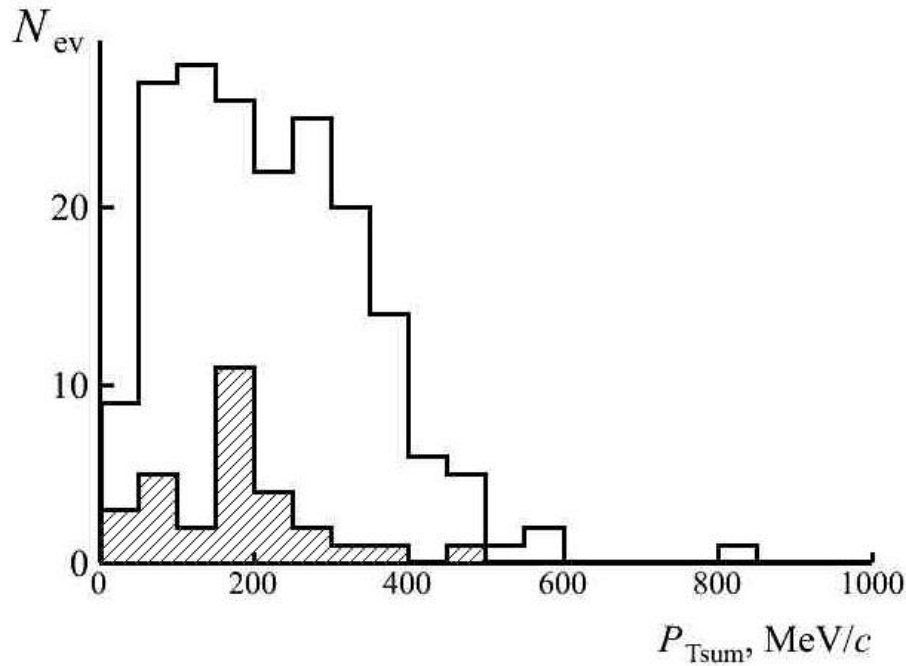
1.  $^{12}\text{C} + Em$  (4.5 ГэВ/с) – Г.М. Чернов (Ташкент);
2.  $^{12}\text{C} + Em$  (4.5 ГэВ/с) – А. Ш. Гайтинов (Алма-Ата);
3.  $^{12}\text{C} + Em$  (1 ГэВ/с) – ОИЯИ.

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

$$\langle Q_{3\alpha} \rangle = 441 \pm 34 \text{ (190) кэВ для } 4.5 \text{ А ГэВ/с}$$

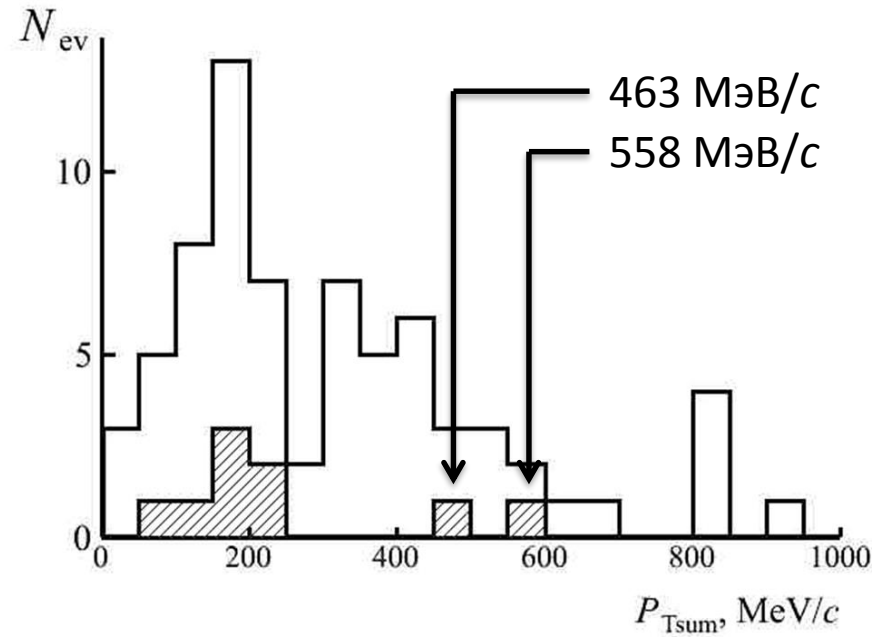
$$\langle Q_{3\alpha} \rangle = 346 \pm 28 \text{ (85) кэВ для } 1 \text{ А ГэВ/с}$$

# Распределение по суммарному импульсу $3\alpha$ -частиц



$$\langle P_{Tsum} \rangle = 238 \pm 14 (118) \text{ МэВ/с}$$

$$\langle P_{Tsum} \rangle_{CX} = 223 \pm 13 (68) \text{ МэВ/с}$$



$$\langle P_{Tsum} \rangle = 220 \pm 24 (128) \text{ МэВ/с}$$

$$\langle P_{Tsum} \rangle_{CX} = 160 \pm 18 (47) \text{ МэВ/с}$$

# Распределение событий СХ по числу $\alpha$ -пар

Число ${}^8\text{Be}$ в событии СХ	4.5 А ГэВ/с в 30 событиях СХ	1 А ГэВ/с в 9 событиях СХ (в том числе в 5 «белых» звездах СХ)
1	3	0 (0)
2	16	4 (1)
3	11	5 (4)

# Заключение

- Успешно проведены облучения 40 слоев ЯЭ в 2 сеансах (декабрь 2016 и апрель 2017 гг.) ускорителя ИФВЭ;
- Первые данные по поиску СХ в облучении 2017 г. обнадеживают. СХ наблюдаются в 12% найденных событиях;
- Среднее значение по суммарному поперечному импульсу  $3\alpha$ -частиц в СХ соответствуют ядерно-дифракционному механизму реакции;
- Наблюдаются уникальные события СХ с большими поперечным импульсом;
- Продолжается набор данных в группах ОИЯИ и ФИАН (Н.Г. Пересадько).

# Protvino271216\_12C\_450AMeV\_3a\_ws\_3Be8\_ev2-13-14

$$E_{12C} \approx 406 \text{ A MeV}, \quad P_0 \approx 1 \text{ A GeV}/c$$

## Lab. System

### Planar angles:

$$\varphi_1 = -11 \text{ mrad}, \quad \varphi_2 = -12 \text{ mrad}, \quad \varphi_3 = -17 \text{ mrad}$$

### Deep angles:

$$\alpha_1 = -1 \text{ mrad}, \quad \alpha_2 = -7 \text{ mrad}, \quad \alpha_3 = 5 \text{ mrad}$$

### Pair solid angles:

$$\theta_{\alpha_1\alpha_2} = 7 \text{ mrad}, \quad \theta_{\alpha_1\alpha_3} = 9 \text{ mrad}, \quad \theta_{\alpha_2\alpha_3} = 13 \text{ mrad}$$

### Transverse momentum:

$$P_{T\alpha_1} = 41 \text{ MeV}/c, \quad P_{T\alpha_2} = 52 \text{ MeV}/c, \quad P_{T\alpha_3} = 69 \text{ MeV}/c$$

$$P_{T\text{sum}} = 152 \text{ MeV}/c$$

### Excitation energy:

$$Q_{\alpha_1\alpha_2} = 41 \text{ keV}, \quad Q_{\alpha_1\alpha_3} = 70 \text{ keV}, \quad Q_{\alpha_2\alpha_3} = 162 \text{ keV}$$

$$Q_{3\alpha} = 183 \text{ keV}$$

### Azimuthal angle differences:

$$\psi_{\alpha_1\alpha_2} = 28^\circ, \quad \psi_{\alpha_1\alpha_3} = 18^\circ, \quad \psi_{\alpha_2\alpha_3} = 46^\circ$$

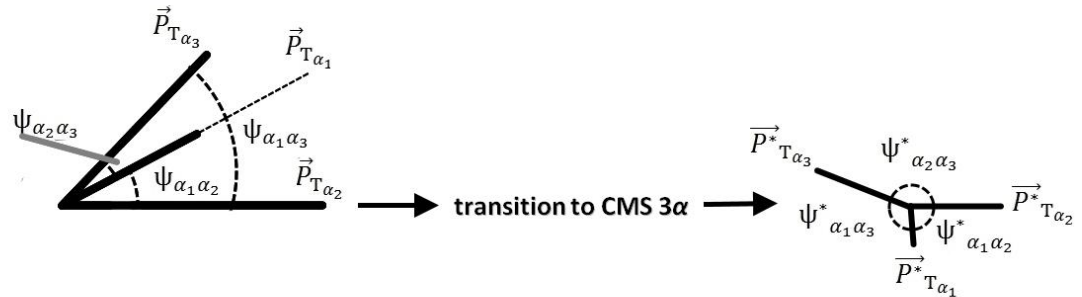
## CMS 3 $\alpha$

### Transverse momentum:

$$P^*_{T\alpha_1} = 10 \text{ MeV}/c, \quad P^*_{T\alpha_2} = 24 \text{ MeV}/c, \quad P^*_{T\alpha_3} = 27 \text{ MeV}/c$$

### Azimuthal angle differences:

$$\psi^*_{\alpha_1\alpha_2} = 85^\circ, \quad \psi^*_{\alpha_1\alpha_3} = 117^\circ, \quad \psi^*_{\alpha_2\alpha_3} = 158^\circ$$



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

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

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

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

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

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

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

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

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