



BECQUEREL
PROJECT

Проект
БЕККЕРЕЛЬ

Beryllium (Boron)

Clustering

Quest in

Relativistic Multifragmentation

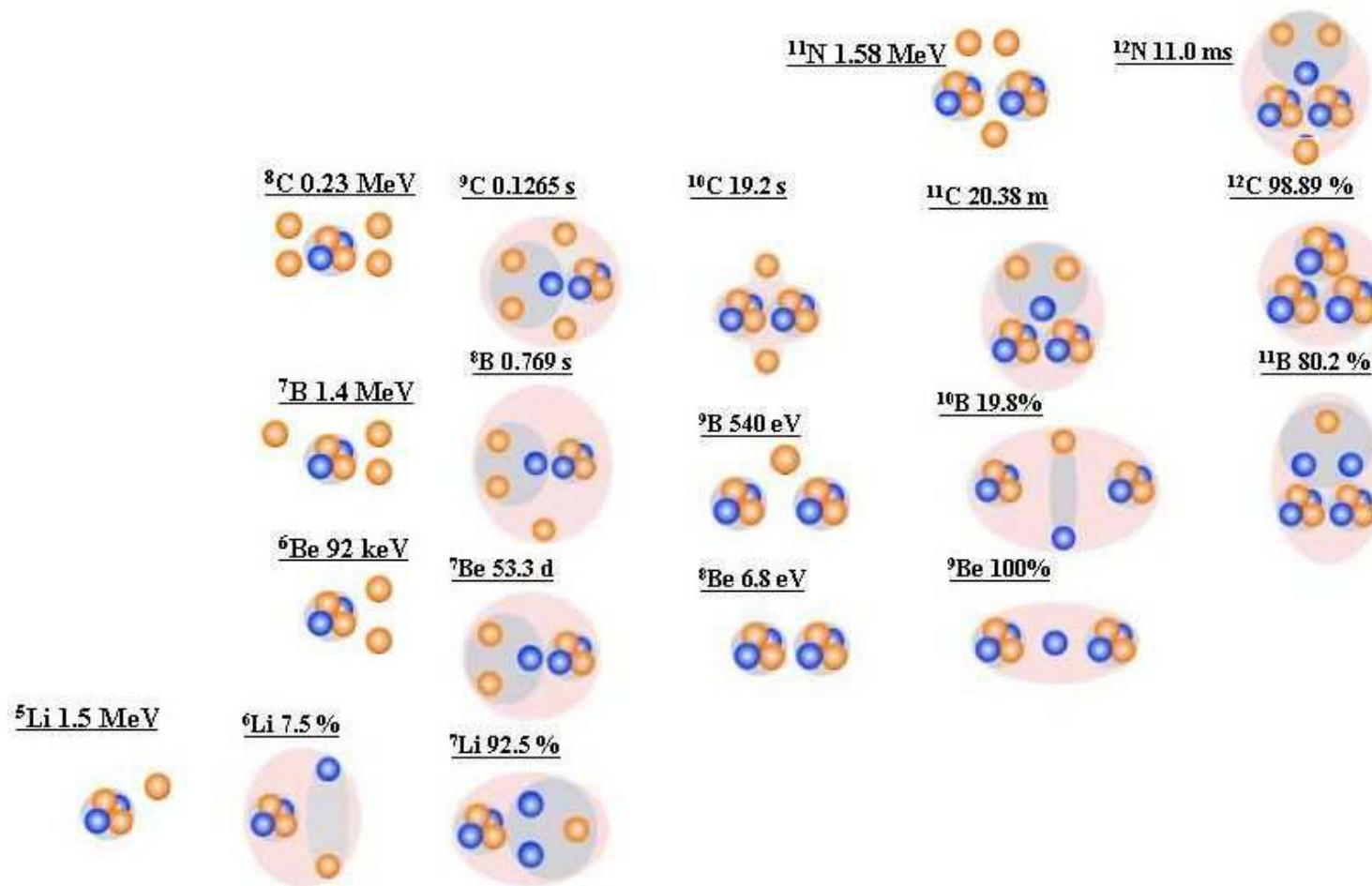
<http://becquerel.jinr.ru>

Новые данные о структуре фрагментации легких ядер

Артеменков Д.А.

сотрудничество БЕККЕРЕЛЬ, Дубна, ЛФВЭ

ОИЯИ, 10.06.2013



Продолжение проекта БЕККЕРЕЛЬ-*D(ripline)* на 2012-14 гг. посвящено обзорному исследованию фрагментации в ядерной эмульсии релятивистских ядер ^9C , ^{10}C и ^{12}N , облучение которыми уже выполнено в предшествующей фазе проекта. Уже облученная эмульсия позволит исследовать ядерно-молекулярную структуру несвязанных ядер ^6Be , ^7B , ^8C и ^{11}N , которые образуются в реакциях фрагментации ядер ^7Be , ^8B , ^9C и ^{12}N со срывом нейтронов. Будут продолжены исследования кластерных степеней свободы в ядрах ^7Be и $^{8,10,11}\text{B}$ на новом уровне статистики и детальности описания.

Secondary nuclear fragment beams for investigations of relativistic fragmentation of light radioactive nuclei using nuclear photoemulsion at Nuclotron

P.A. Rukoyatkin^a, L.N. Komolov, R.I. Kukushkina, V.N. Ramzhin, and P.I. Zarubin

ISSN 1063-7788, Physics of Atomic Nuclei, 2008, Vol. 71, No. 9, pp. 1565–1571. © Pleiades Publishing, Ltd., 2008.

ELEMENTARY PARTICLES AND FIELDS Experiment

Fragmentation of Relativistic Nuclei in Peripheral Interactions in Nuclear Track Emulsion*

D. A. Artemenkov^{1)**}, V. Bradnova¹⁾, M. M. Chernyavsky²⁾, L. A. Goncharova²⁾, M. Haiduc³⁾, N. A. Kachalova¹⁾, S. P. Kharlamov²⁾, A. D. Kovalenko¹⁾, A. I. Malakhov¹⁾, A. A. Moiseenko⁴⁾, G. I. Orlova²⁾, N. G. Peresadko²⁾, N. G. Polukhina²⁾, P. A. Rukoyatkin¹⁾, V. V. Rusakova¹⁾, V. R. Sarkisyan⁴⁾, R. Stanoeva⁵⁾, T. V. Shchedrina¹⁾, S. Vokál¹⁾, A. Vokálová¹⁾, P. I. Zarubin^{1)***}, and

Few Body Syst (2008) 44: 273–276
DOI 10.1007/s00601-008-0307-6
Printed in The Netherlands

Few-
Body
Systems

Detailed study of relativistic ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ fragmentation in peripheral collisions in a nuclear track emulsion*

D. A. Artemenkov^{**}, D. O. Krivenkov, T. V. Shchedrina, R. Stanoeva, P. I. Zarubin

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2009, том 72, № 4, с. 731–742

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ДИССОЦИАЦИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР ${}^8\text{B}$ В ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ

© 2009 г. Р. Станоева^{1,2)}, Д. А. Артеменков¹⁾, В. Баднова¹⁾, С. Вокал^{1,3)}, Л. А. Гончарова⁴⁾, П. И. Зарубин^{1)*}, И. Г. Зарубина¹⁾, Н. А. Качалова¹⁾, А. Д. Коваленко¹⁾, Д. О. Кривенков¹⁾, А. И. Малахов¹⁾, Г. И. Орлова⁴⁾, Н. Г. Пересадько⁴⁾, Н. Г. Полухина⁴⁾, П. А. Рукойаткин¹⁾, В. В. Русакова¹⁾, М. Хайдук⁵⁾, С. П. Харламов⁴⁾, М. М. Чернявский⁴⁾, Т. В. Щедрина¹⁾

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2010, том 73, № 12, с. 2159–2165

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

КОГЕРЕНТНАЯ ДИССОЦИАЦИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР ${}^9\text{C}$

© 2010 г. Д. О. Кривенков¹⁾, Д. А. Артеменков¹⁾, В. Баднова¹⁾, С. Вокал²⁾, П. И. Зарубин^{1)*}, И. Г. Зарубина¹⁾, Н. В. Кондратьева¹⁾, А. И. Малахов¹⁾, А. А. Моисеенко³⁾, Г. И. Орлова⁴⁾, Н. Г. Пересадько⁴⁾, Н. Г. Полухина⁴⁾, П. А. Рукойаткин¹⁾, В. В. Русакова¹⁾, В. Р. Саркисян³⁾, Р. Станоева¹⁾, М. Хайдук⁵⁾, С. П. Харламов⁴⁾

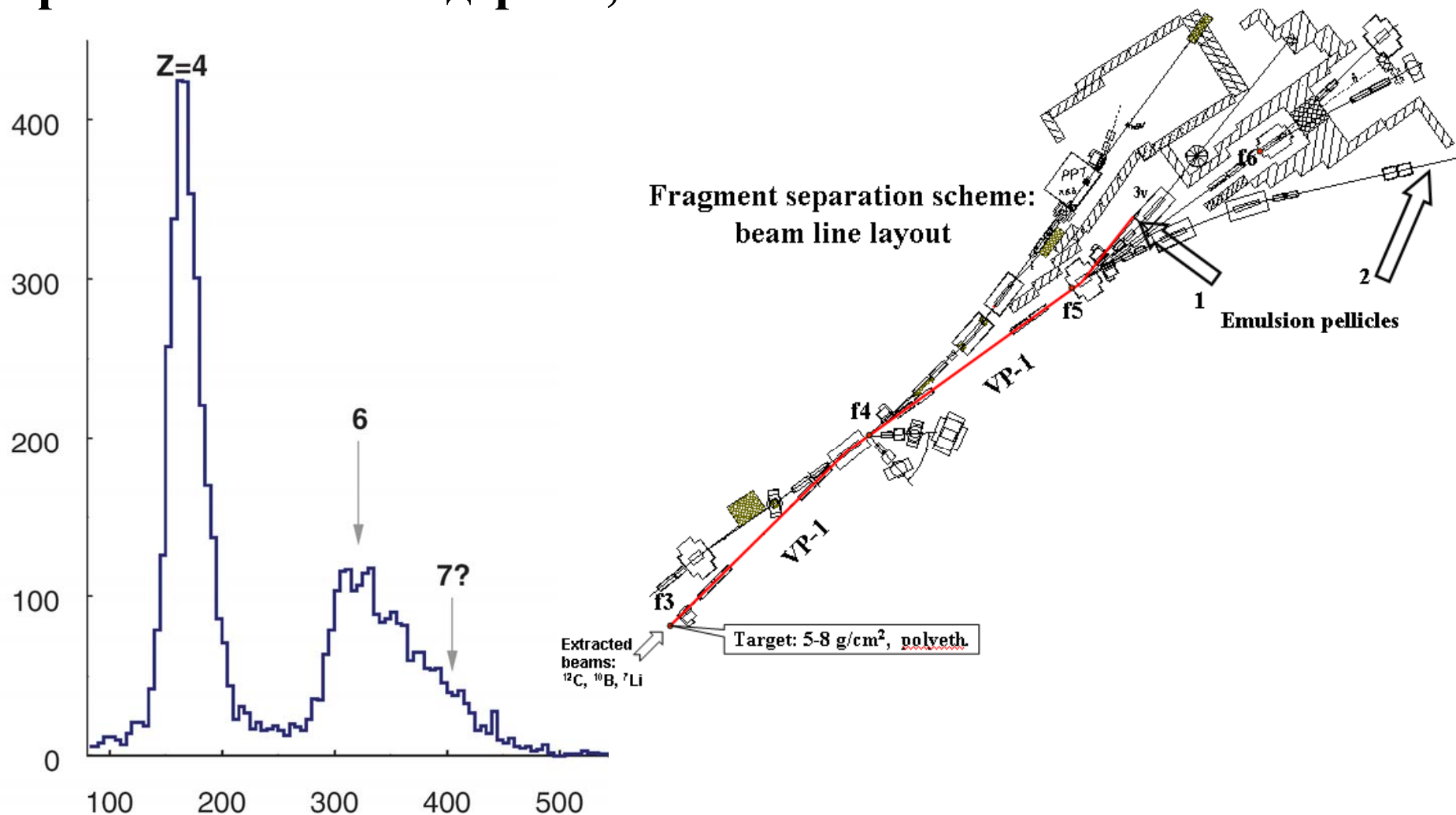
ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2010, том 73, № 12, с. 2166–2171

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

ОБЛУЧЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ В СМЕШАННОМ ПУЧКЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР ${}^{12}\text{N}$, ${}^{10}\text{C}$ И ${}^7\text{Be}$

© 2010 г. Р. Р. Каттабеков^{1,2)}, К. З. Маматкулов^{1,3)}, Д. А. Артеменков¹⁾, В. Баднова¹⁾, С. Вокал⁴⁾, Д. М. Жомуродов^{1,3)}, П. И. Зарубин^{1)*}, И. Г. Зарубина¹⁾, З. А. Игамкулов^{1,3)}, Н. В. Кондратьева¹⁾, Н. К. Корнегруца¹⁾, Д. О. Кривенков¹⁾, А. И. Малахов¹⁾, Г. И. Орлова⁵⁾, Н. Г. Пересадько⁵⁾, Н. Г. Полухина⁵⁾, П. А. Рукойаткин¹⁾, В. В. Русакова¹⁾, Р. Станоева^{1,6)}, М. Хайдук⁷⁾, С. П. Харламов⁵⁾

Анализ облучения в смешанном пучке релятивистских ядер ^{12}N , ^{10}C и ^7Be



Амплитудный спектр со сцинтиляционного счетчика, установленного на месте облучения эмульсионной стопки при настройке канала транспортировки пучка на сепарацию ядер ^{12}N ; указаны положения пиков для ядер с зарядами $Z_{pr} = 4, 6$ и 7

Генерация ядер ^{12}N и ^{10}C осуществлена по средствам реакций перезарядки и фрагментации ускоренных ядер ^{12}C .

Для ядер ^{10}C и ^{12}N отношений зарядов к весам $Z_{\text{pr}}/A_{\text{pr}}$ отличаются всего на 3%, а импульсный аксептанс сепарирующего канала нуклотрона 2 - 3 %. В этой связи сепарация этих ядер невозможна, и ядра ^{10}C и ^{12}N присутствуют в пучке, образуя так называемый пучковый коктейль. В составе пучка присутствуют и ядра ^7Be , у которых отличие по $Z_{\text{pr}}/A_{\text{pr}}$ от ^{12}N только 2%. Для соседних ядер ^8B , ^9C и ^{11}C отличие по $Z_{\text{pr}}/A_{\text{pr}}$ от ^{12}N оказывается около 10%, что обуславливает их подавление при облучении эмульсии.

Идентификация ядер ^{12}N и ^7Be в облученной эмульсии возможна по зарядам пучковых ядер Z_{pr} , определяемых методом счета δ -электронов на пучковых следах. В случае ^{10}C необходимо убедиться в малом вкладе соседних изотопов C на основе зарядовой топологии «белых» звезд $\sum Z_{\text{fr}}$.

| Стопка - 602. (12 пластинок) | Всего звёзды | "Белые" звёзды | λ Общая длина (см) |
|---|-------------------------|---------------------------|--|
| Σ | 7241 | 608 | 108810.74 |

Анализ облучения ядрами ^{12}N

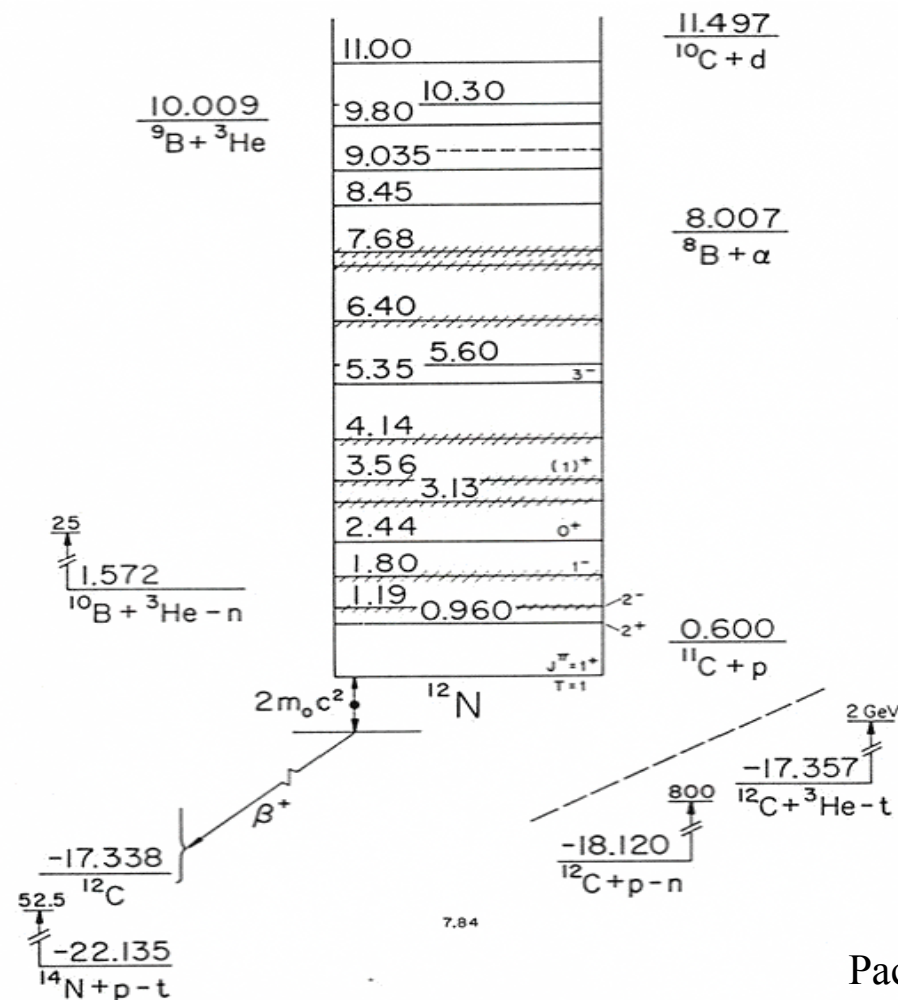
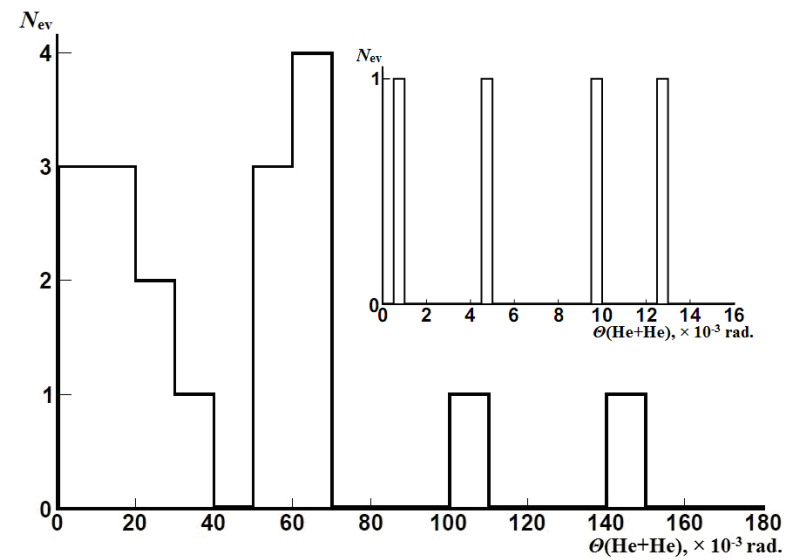
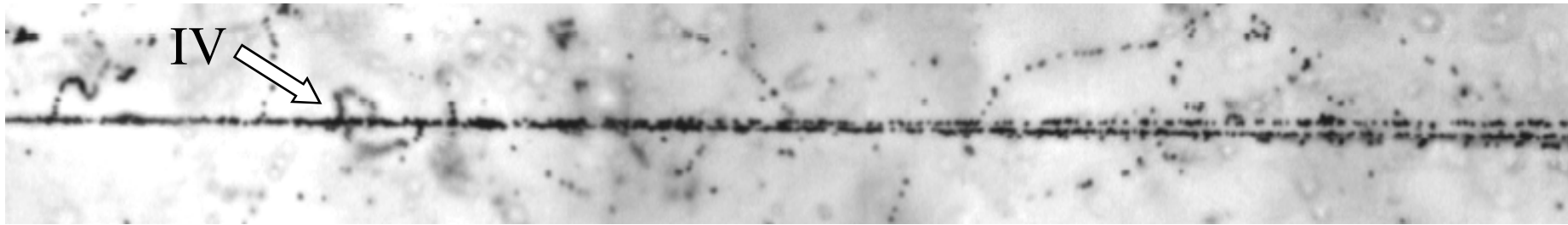


Диаграмма возбужденных состояний ядра ^{12}N ; указаны пороги диссоциации

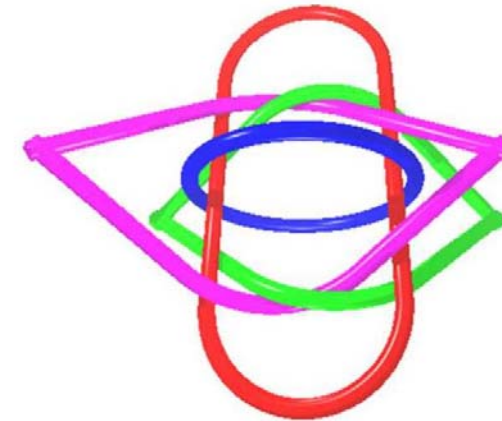
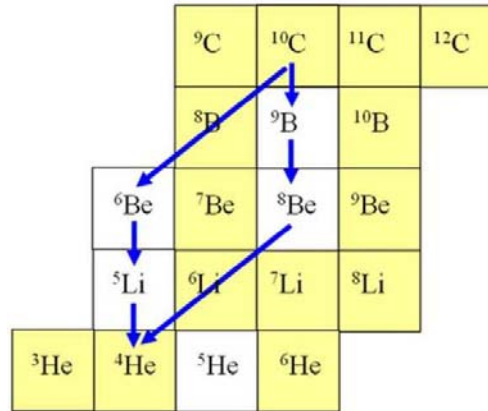
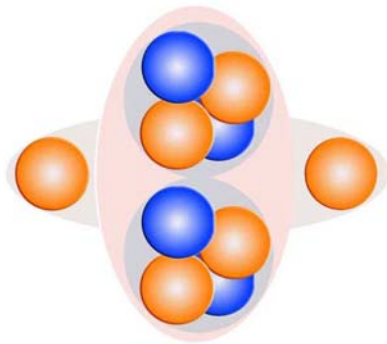
| | | |
|--------------------------------------|----|----|
| He + 5H | 9 | 2 |
| 2He + 3H | 24 | 12 |
| 3He + H | 2 | 2 |
| $^7\text{Be} + 3\text{H}$ | 10 | 5 |
| $^7\text{Be} + \text{He} + \text{H}$ | 9 | 8 |
| $^8\text{B} + 2\text{H}$ | 11 | 9 |
| $^8\text{B} + \text{He}$ | 3 | 3 |
| C + H | 4 | 4 |

Распределение числа «белых» звезд по каналам диссоциации с суммарным зарядом фрагментов: средний столбец – отбор с условием $\theta_{\text{fr}} < 11^\circ$ (72 события); правый столбец – отбор с условием $\theta_{\text{fr}} < 6^\circ$ (45 событий)



Распределение по углам разлета $\theta(\text{He} + \text{He})$ пар фрагментов He для «белых» звезд $2\text{He} + 3\text{H}$ и $3\text{He} + \text{H}$; на вставке увеличенное распределение $\theta(\text{He} + \text{He})$ в области наименьших значений.

Анализ облучения ядрами ^{10}C

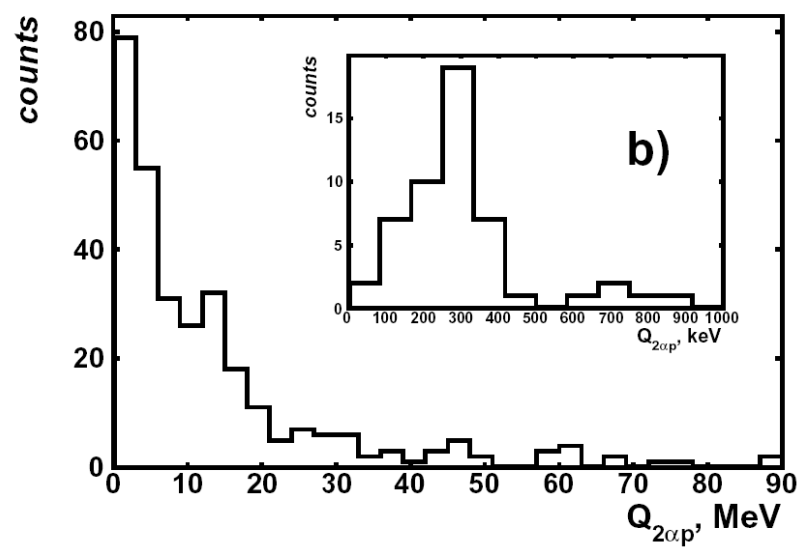
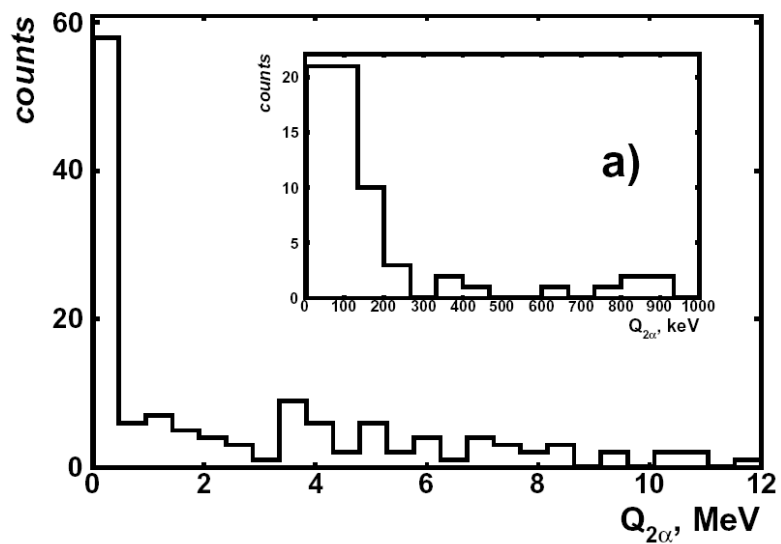
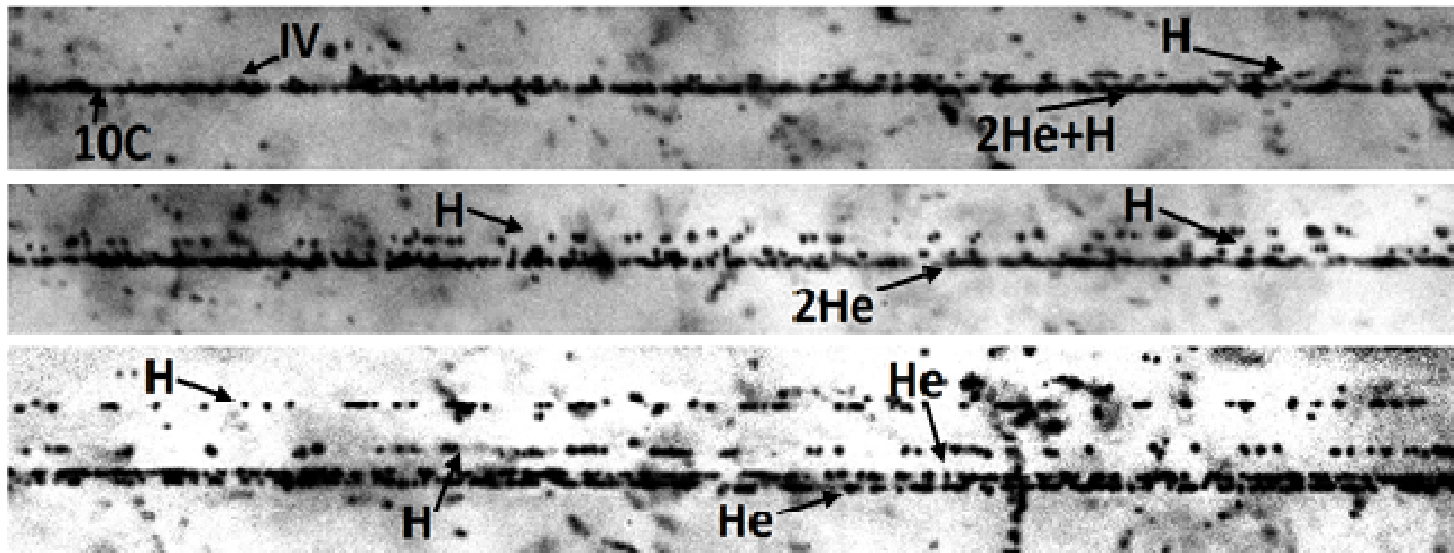


Ядро ^{10}C является обладает супербороминовскими свойствами, поскольку удаление из него одного из четырех кластеров в структуре $2\alpha + 2p$ (порог 3.8 МэВ) ведет к несвязанному состоянию

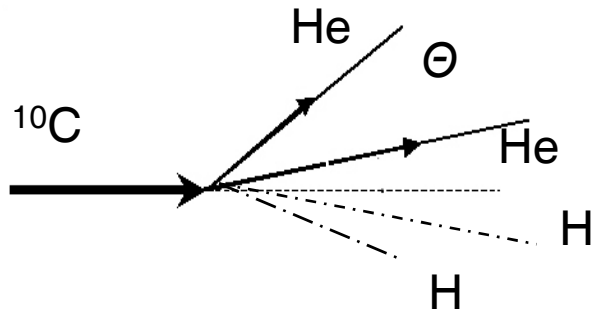
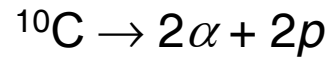
| | | | |
|---------------|--------------------------|-------------------------|-------------|
| $\sum Z_{fr}$ | $2\text{He} + 2\text{H}$ | $\text{He} + 4\text{H}$ | 6H |
| N_{ws} | 159 | 16 | 8 |
| N_{tf} | 211 | 76 | 16 |

Распределение по каналам диссоциации числа «белых» звезд N_{ws} и событий с фрагментами мишени или рожденными мезонами N_{tf} , для которых выполняется условие $\sum Z_{fr} = 6$

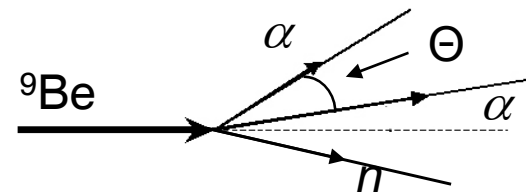
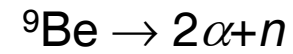
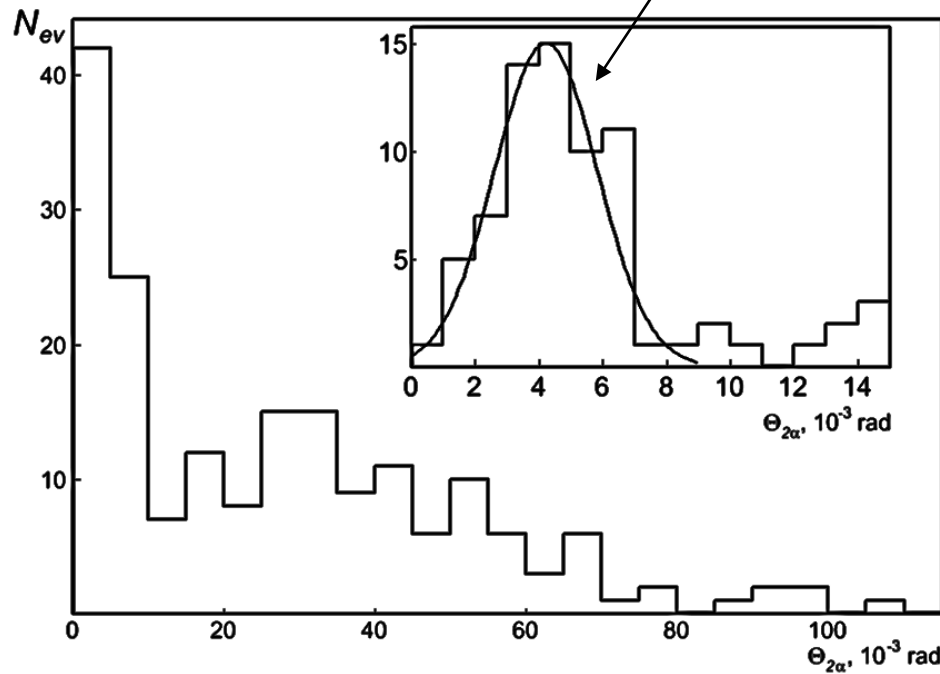
Распады несвязанных ядер ^8Be и ^9B



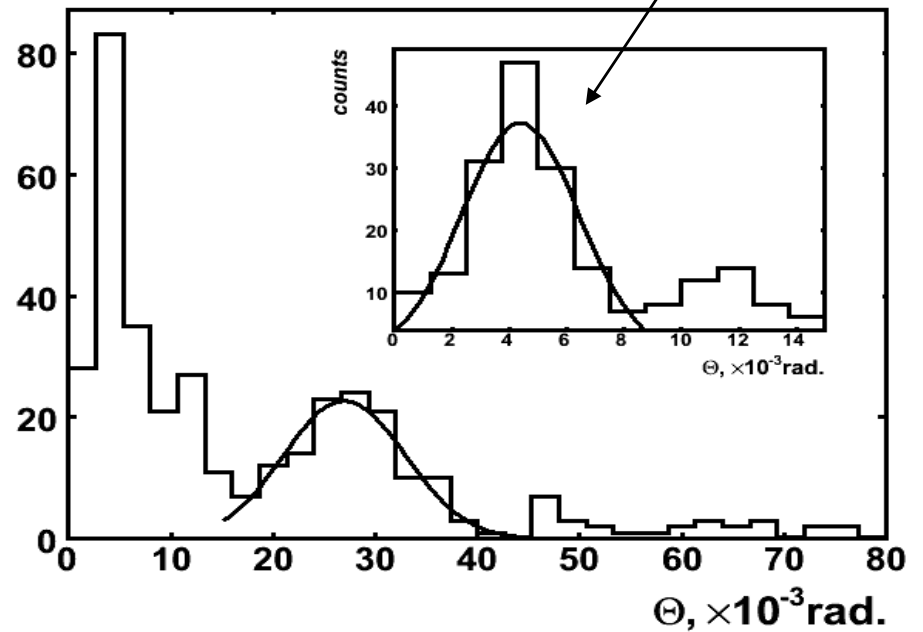
Распределение фрагментов He по «парным» углам

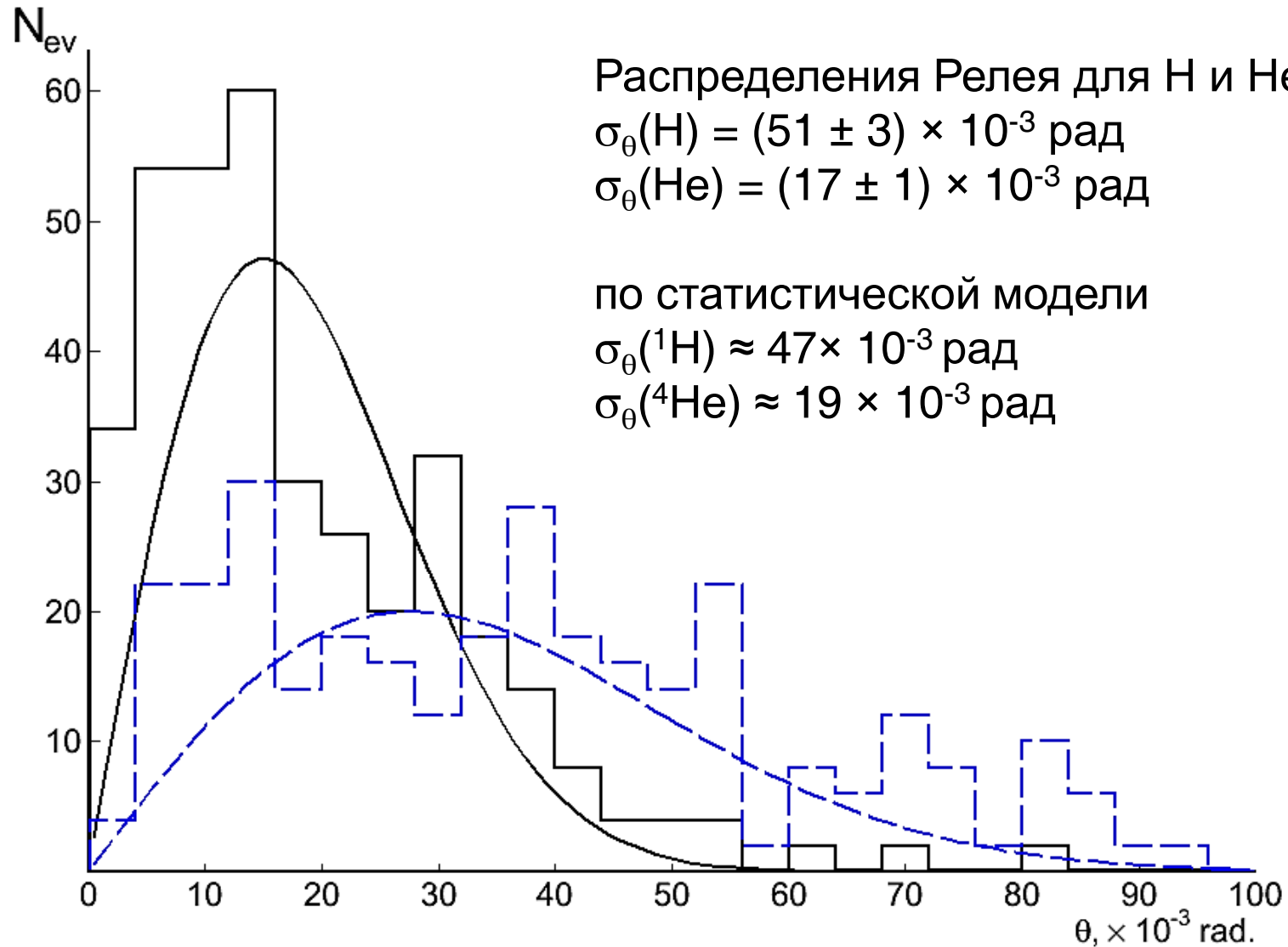


$\langle \Theta \rangle = 4.2 \pm 0.2$ мрад
 $\sigma_{\Theta} = 1.6 \pm 0.1$ мрад



$\langle \Theta \rangle = 4.4 \pm 0.2$ мрад
 $\sigma_{\Theta} = 2.1 \pm 0.2$ мрад





Распределение фрагментов по полярному углу вылета образующихся в «белых звездах» в канале ${}^{10}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$. (пунктирная линия – H, сплошная линия – He, кривая - распределения Релея)

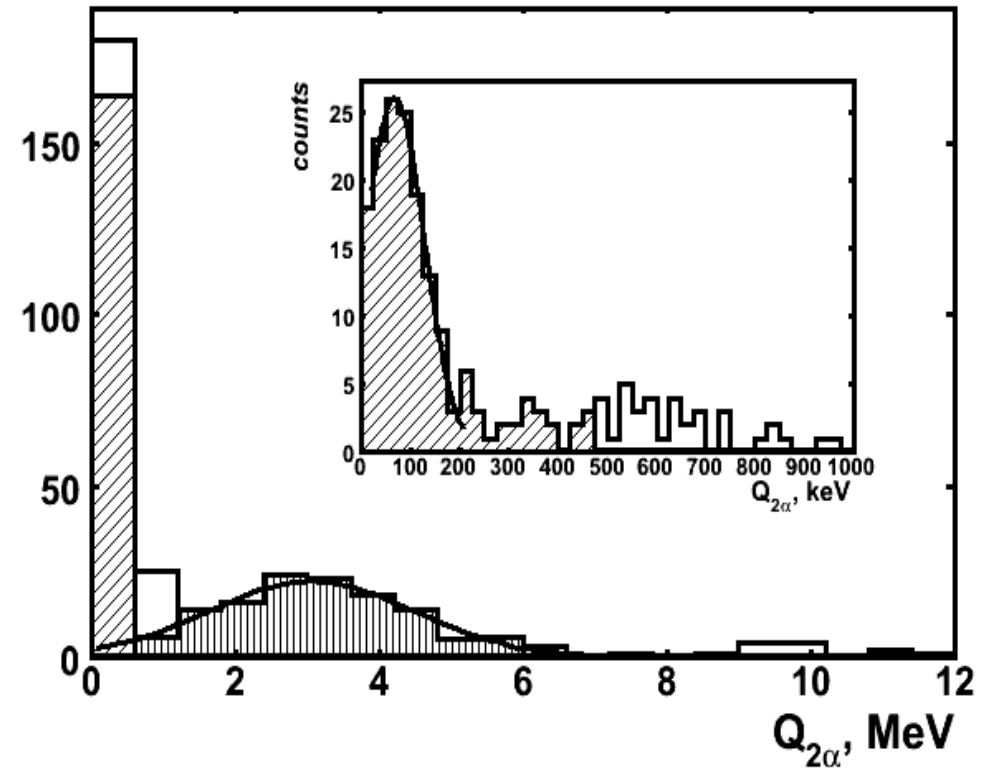
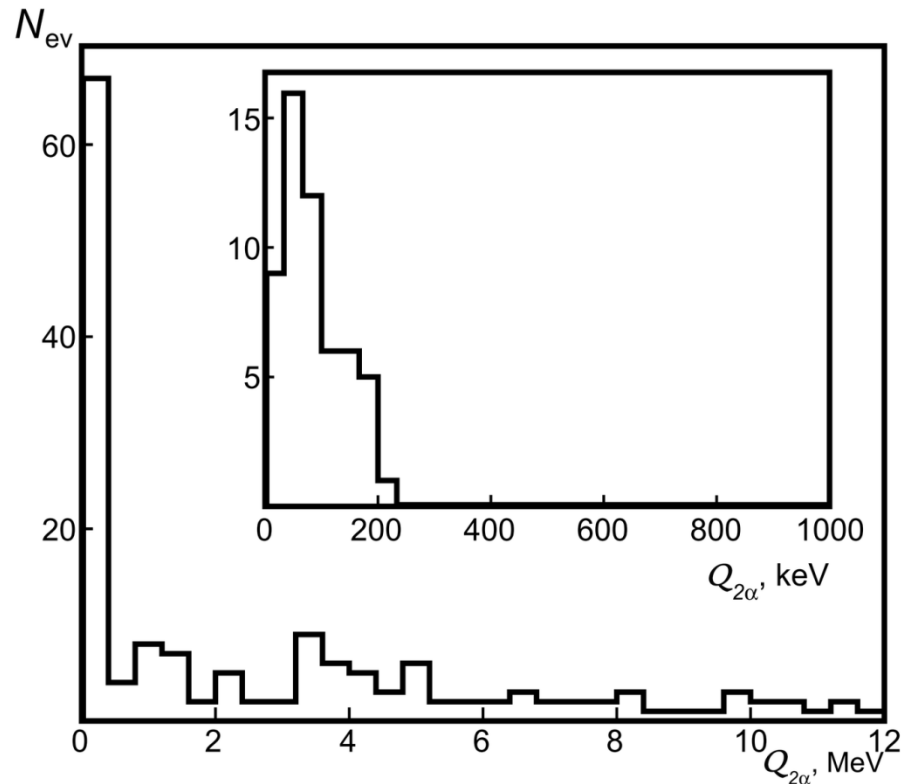
Распределение событий фрагментации по величине энергии $Q_{2\alpha}$ пары α -частиц

$$M_{2\alpha} = \left[2 \left(m_{\alpha}^2 + E_{\alpha 1} E_{\alpha 2} - p_{\alpha 1} p_{\alpha 2} \cos(\Theta_{12}) \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

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

$^{10}\text{C} \rightarrow 2\alpha + 2p$

$^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha + n$



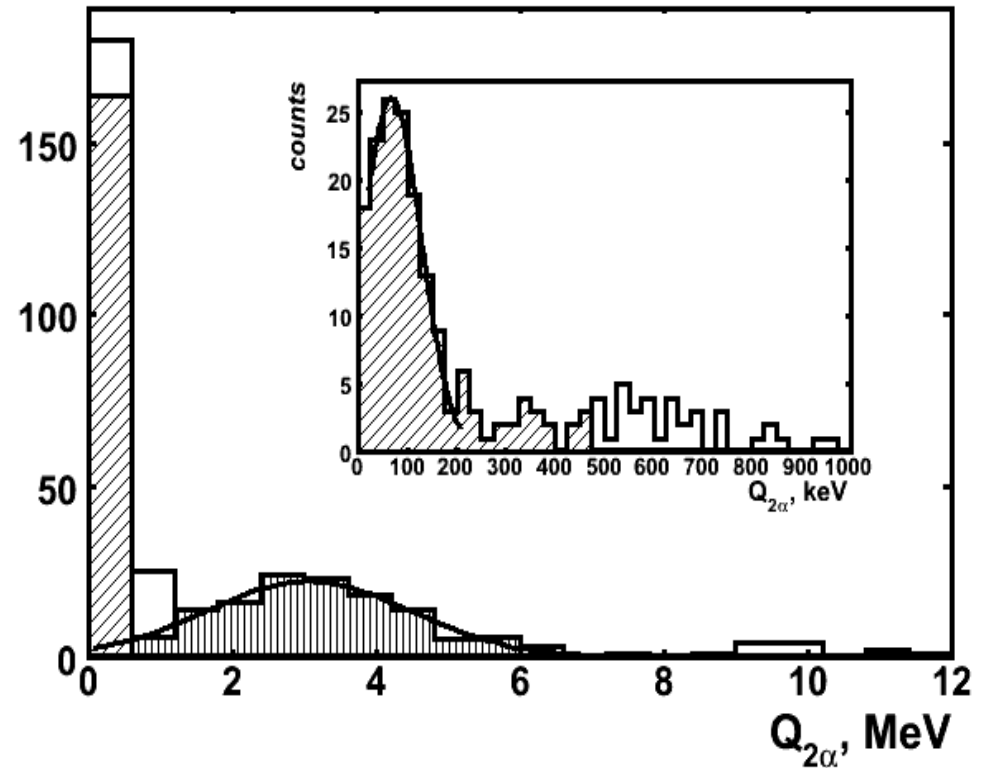
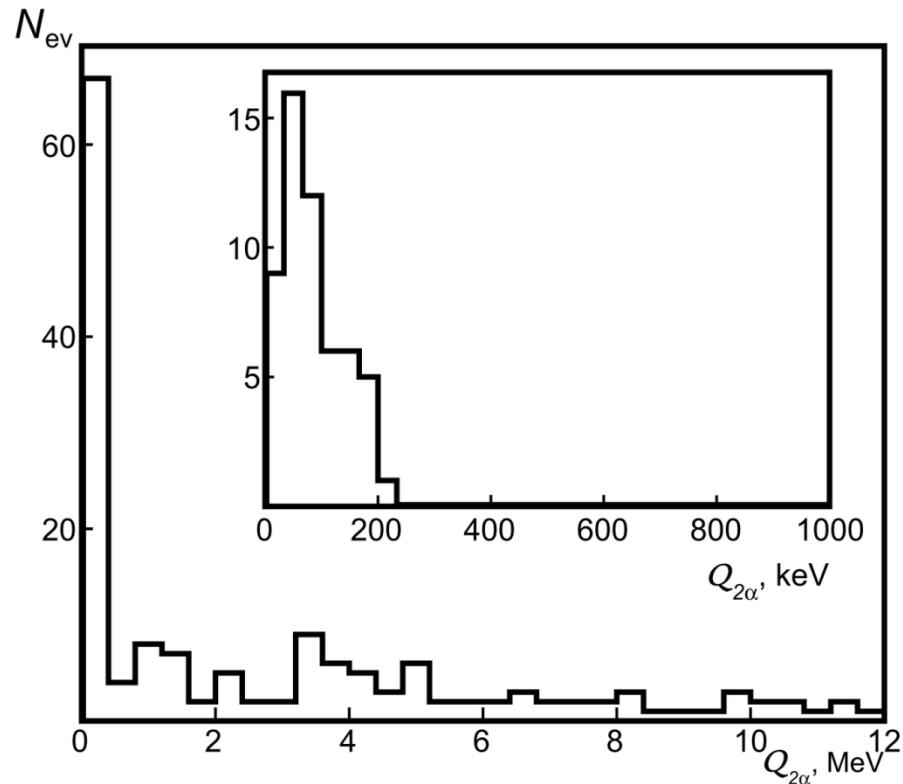
Распределение событий фрагментации по величине энергии $Q_{2\alpha}$ пары α -частиц

$$M_{2\alpha} = \left[2 \left(m_{\alpha}^2 + E_{\alpha 1} E_{\alpha 2} - p_{\alpha 1} p_{\alpha 2} \cos(\Theta_{12}) \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

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

$^{10}\text{C} \rightarrow 2\alpha + 2p$

$^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha + n$



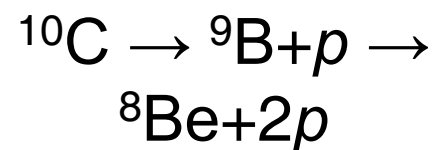
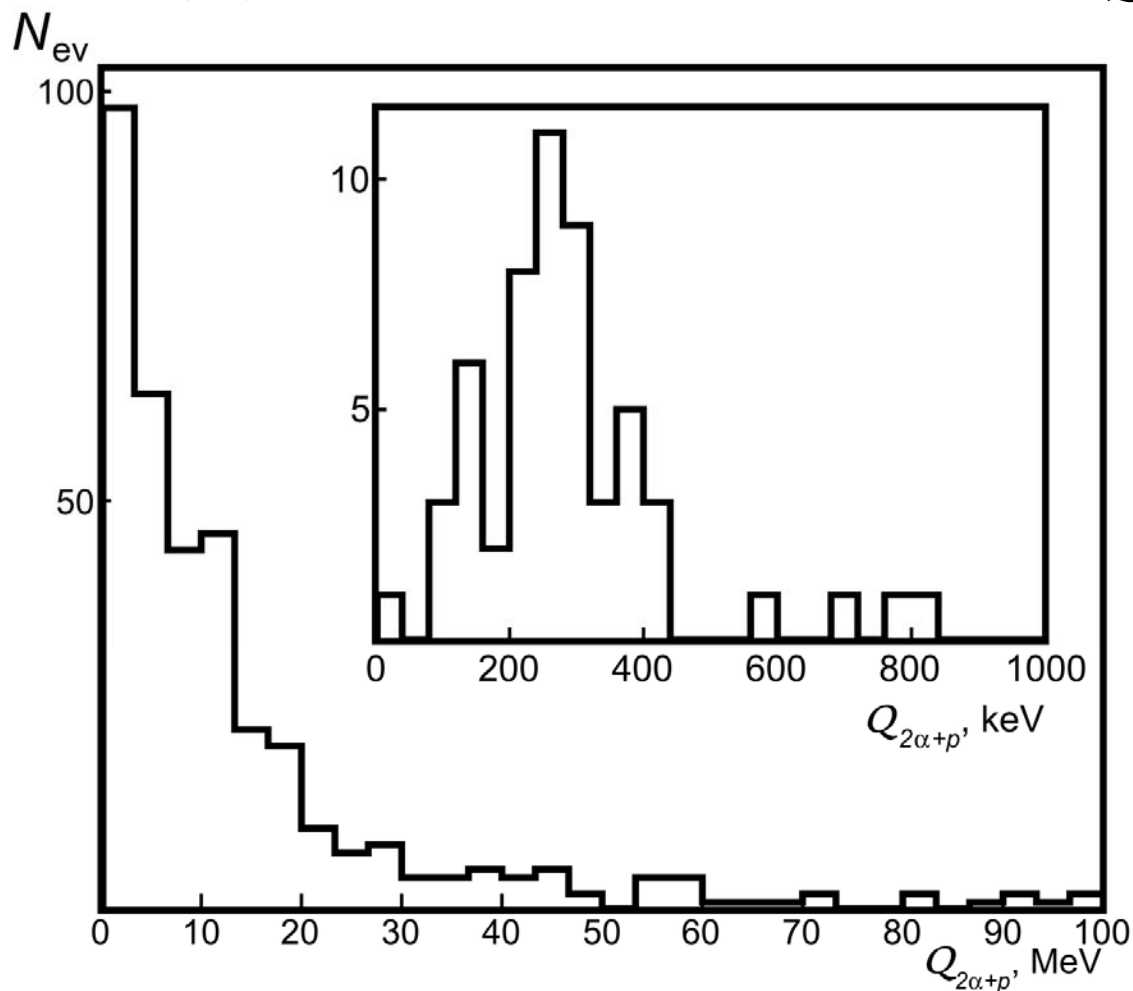
Распределение событий фрагментации по величине энергии $Q_{2\alpha+p}$ α -частиц и протонов

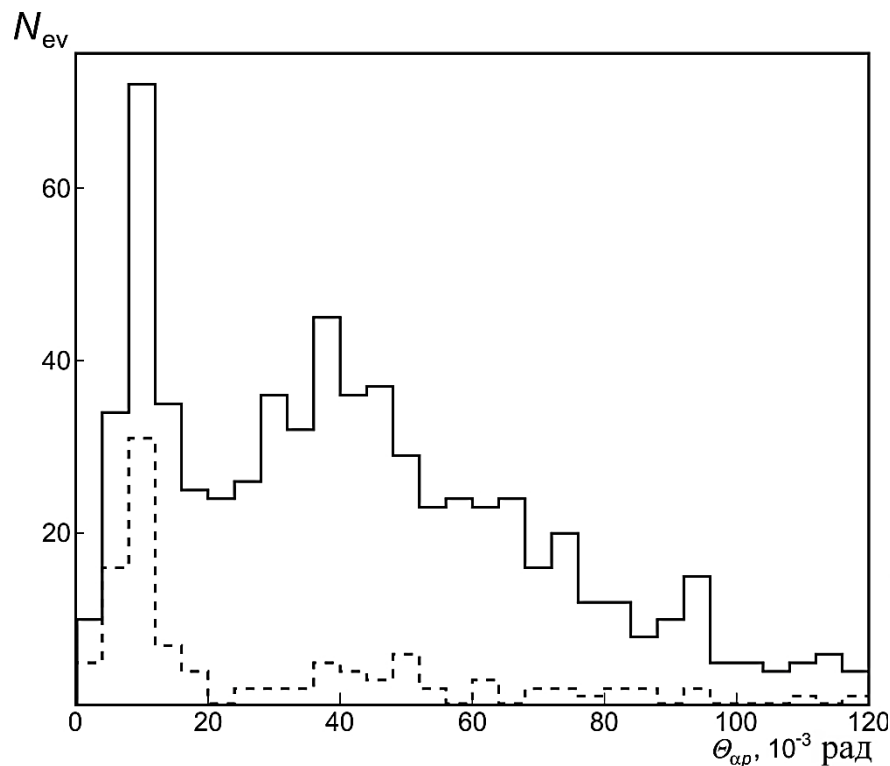
$^{10}\text{C} \rightarrow 2\alpha + 2p$ при условии, что $\text{He} = ^4\text{He}$, $\text{H} = ^1\text{H}$

$$M_{2\alpha+p}^2 = -\left[\sum P_i\right]^2$$

$$M(^9\text{B}) - 2 \cdot M(^4\text{He}) - M(^1\text{H}) = 280 \text{ кэВ}$$

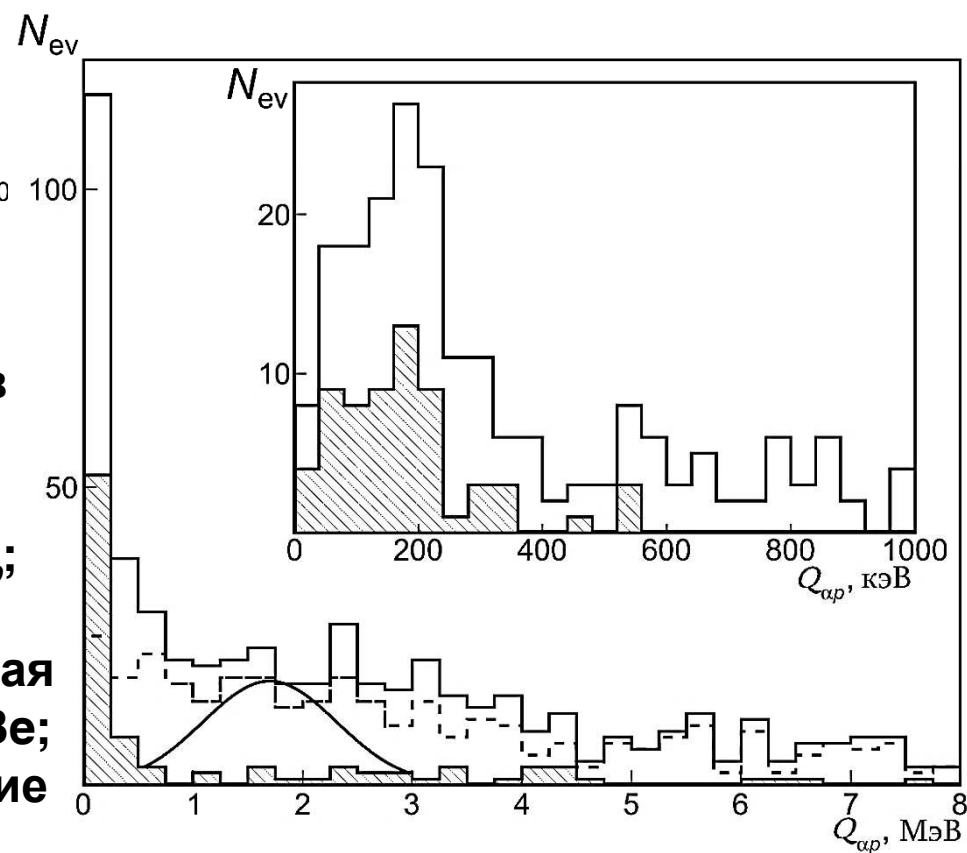
$$Q_{2\alpha+p} = M_{2\alpha+p} - 2 \cdot m_\alpha - m_p$$





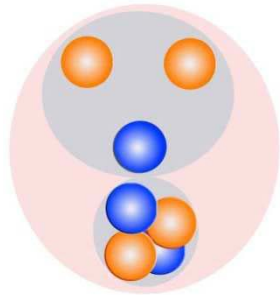
Сплошная гистограмма
распределение по углу разлета Θ_{ap} ;
штриховая гистограмма –
распределение Θ_{ap} с образованием ${}^9\text{B}$
и ${}^8\text{Be}$.

Распределение по энергии
возбуждение пар фрагментов α и p в
«белых звездах» ${}^{10}\text{C} \rightarrow 2\alpha + 2p$.
Сплошная гистограмма –
распределение всех комбинаций Q_{ap} ;
штриховая - в событиях без
образования ${}^9\text{B}$ и ${}^8\text{Be}$; заштрихованная
– в событиях с образованием ${}^9\text{B}$ и ${}^8\text{Be}$;
линией указано ожидаемое положение
резонанса ${}^5\text{Li}$;



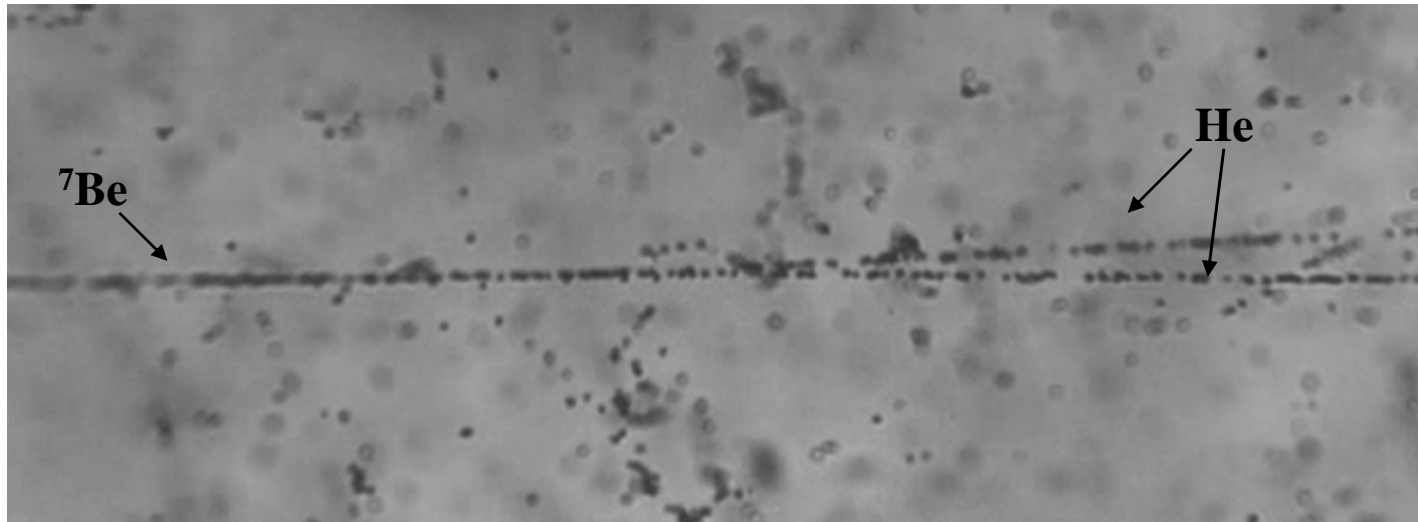
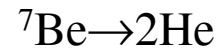
Анализ облучения ядрами ${}^7\text{Be}$

Попутно в этом облучении для ядра ${}^7\text{Be}$ набрана большая статистика по каналам диссоциации числа «белых» звезд N_{ws} и событий с фрагментами мишени или рожденными мезонами N_{tf} , для которых выполняется условие $\sum Z_{fr} = 4$.



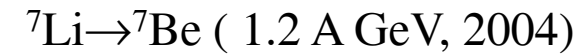
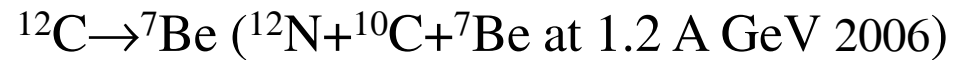
| Канал | 2He | He + 2H | 4H | Li + H |
|----------|-----|---------|----|--------|
| N_{ws} | 115 | 157 | 14 | 3 |
| N_{tf} | 154 | 226 | - | - |

Распределение по каналам диссоциации ядер ${}^7\text{Be}$ для «белых» звезд N_{ws} и событий с фрагментами мишени или рожденными мезонами N_{tf}

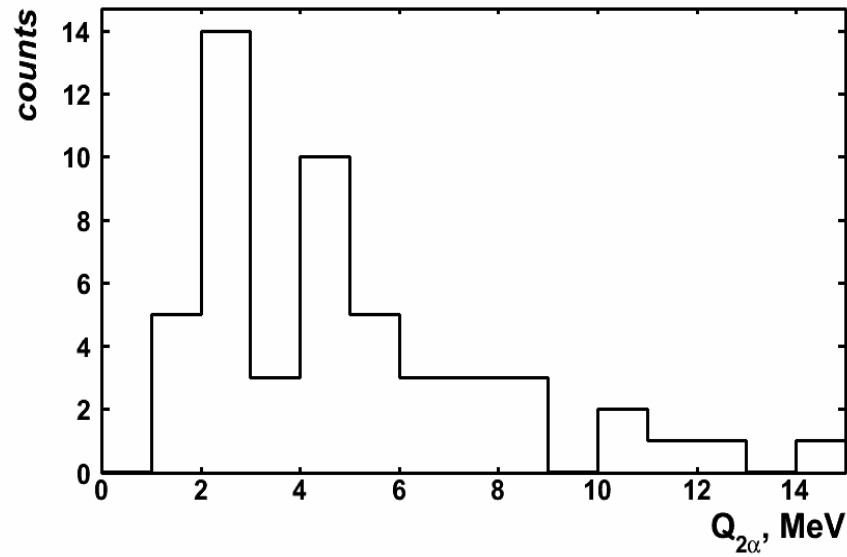


| канал | 2He | | число |
|---------------------------------|-------|---------|-------|
| | белые | небелые | |
| ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ | 32 | 24 | 56 |
| ${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$ | 14 | 9 | 23 |

| Fragmentation channel | 2He | | Total event number |
|---------------------------------|-----------|-----------|--------------------|
| | $n_b = 0$ | $n_b > 0$ | |
| ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ | 30 | 11 | 41 |
| ${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$ | 11 | 7 | 18 |



$^{12}\text{C} \rightarrow ^7\text{Be}$
 ($^{12}\text{N} + ^{10}\text{C} + ^7\text{Be}$ at 1.2 A GeV)
 2006



$^7\text{Li} \rightarrow ^7\text{Be}$
 (1.2 A GeV)
 2004

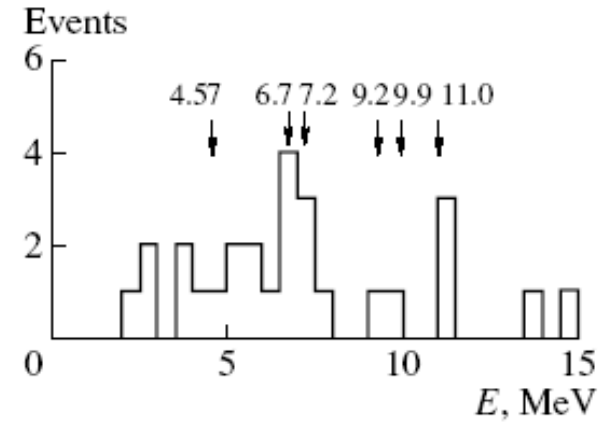
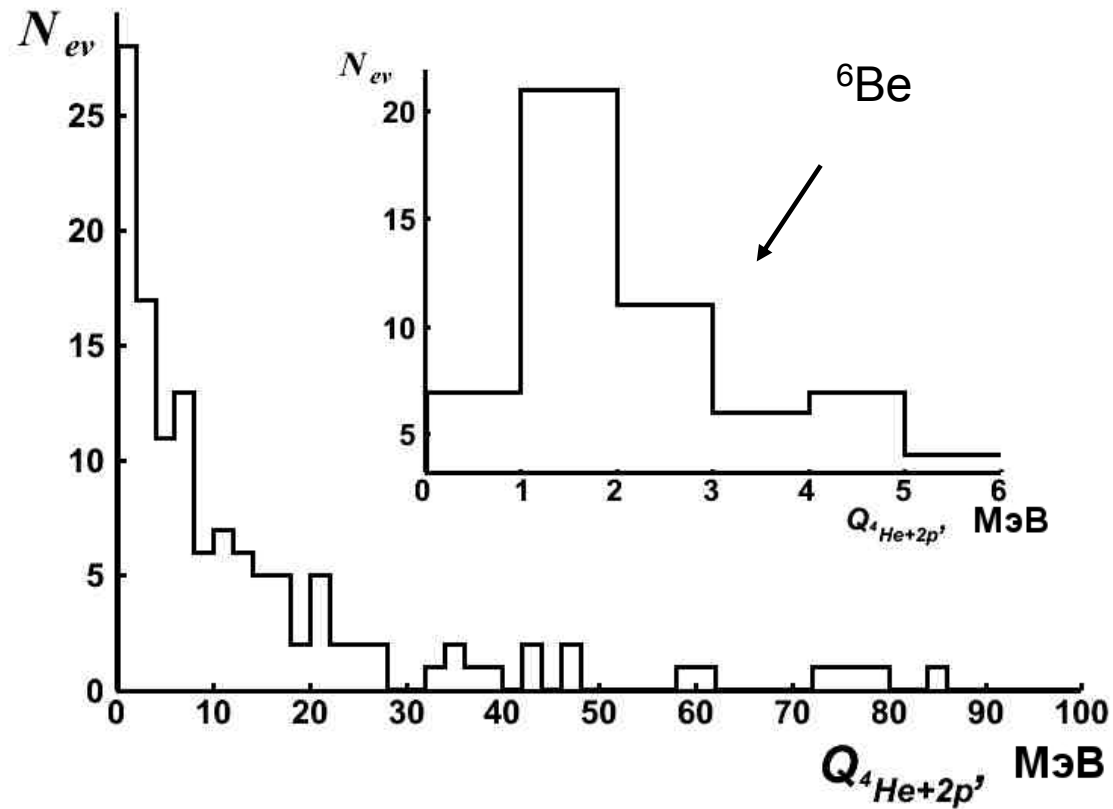
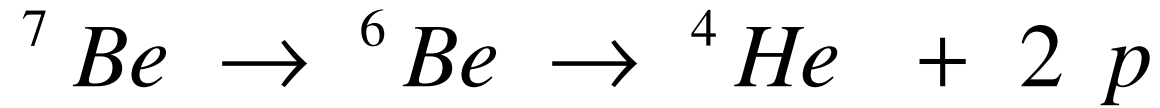


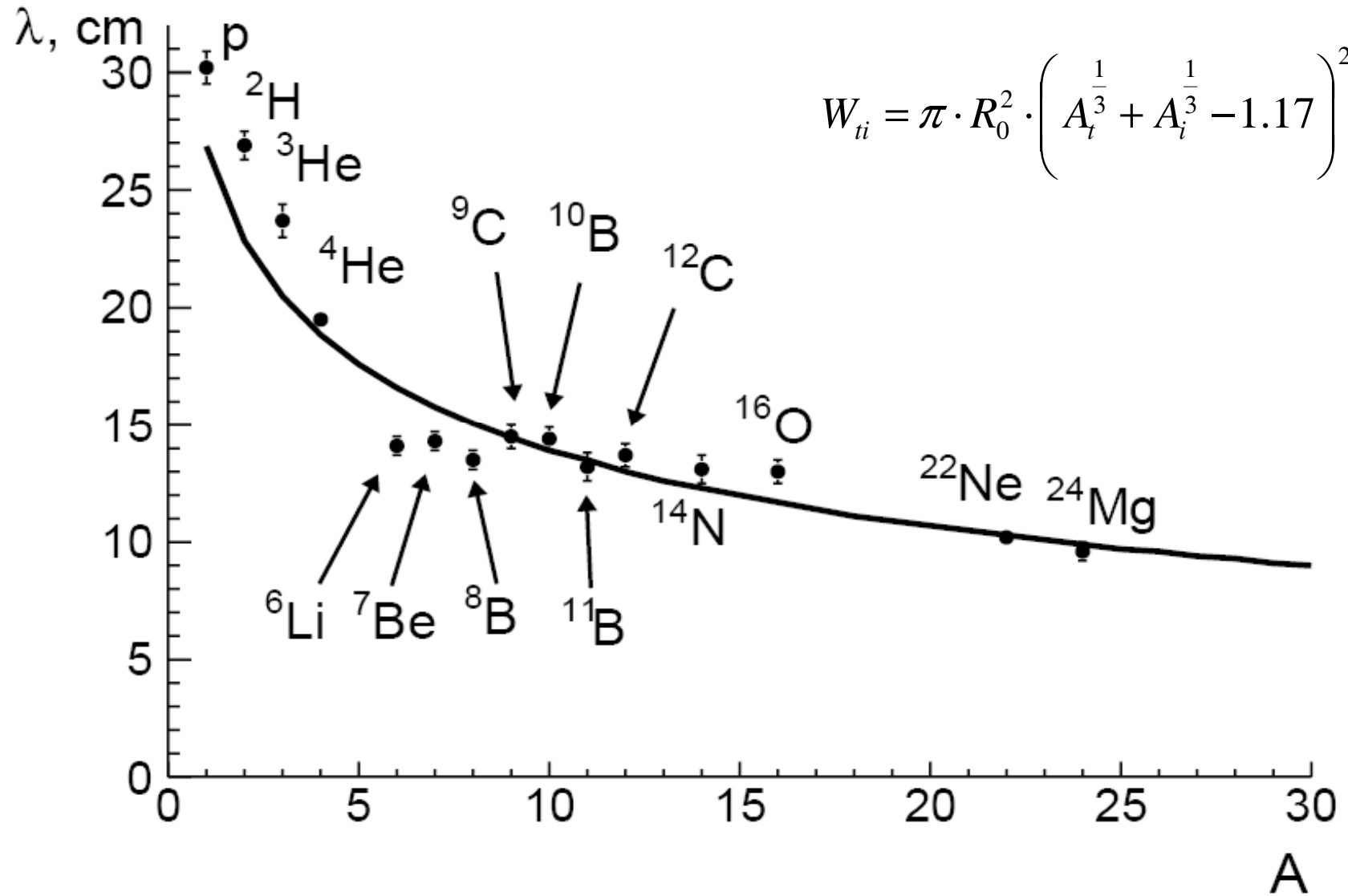
Fig. 2. Distribution of the $^4\text{He} + ^3\text{He}$ events in E . The numbers near the arrows are the excitation energies in the ^7Be nucleus in MeV.

$$Q_{^4\text{He}+^3\text{He}} = M_{^4\text{He}+^3\text{He}} - m_{^4\text{He}} - m_{^3\text{He}} + 1,59 \text{ MeV}$$

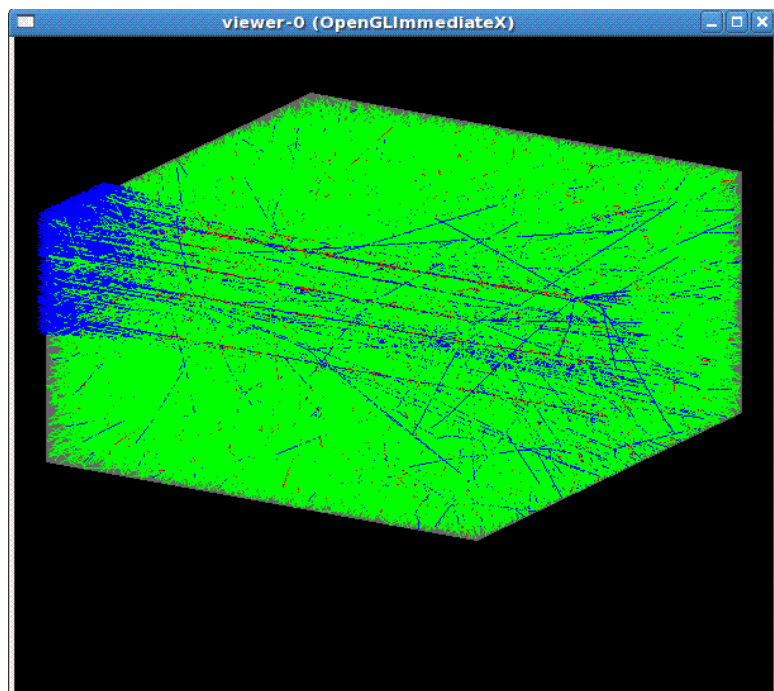
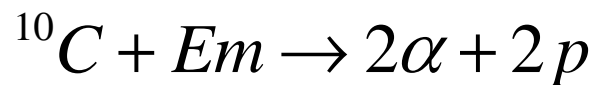


$$Q_{4He+2p} = M_{4He+2p} - m_{4He} - 2m_p$$

Пробеги ядер

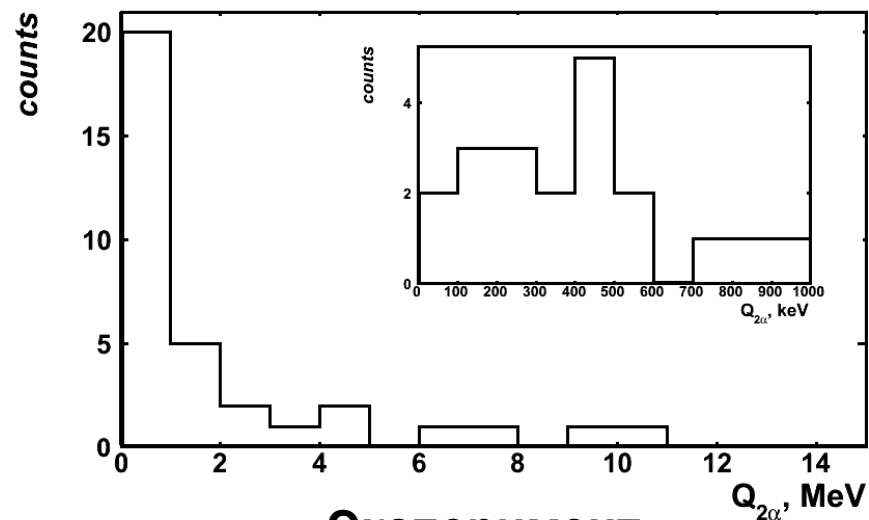


Моделирование взаимодействия релятивистских ядер с ядрами эмульсии в Geant4

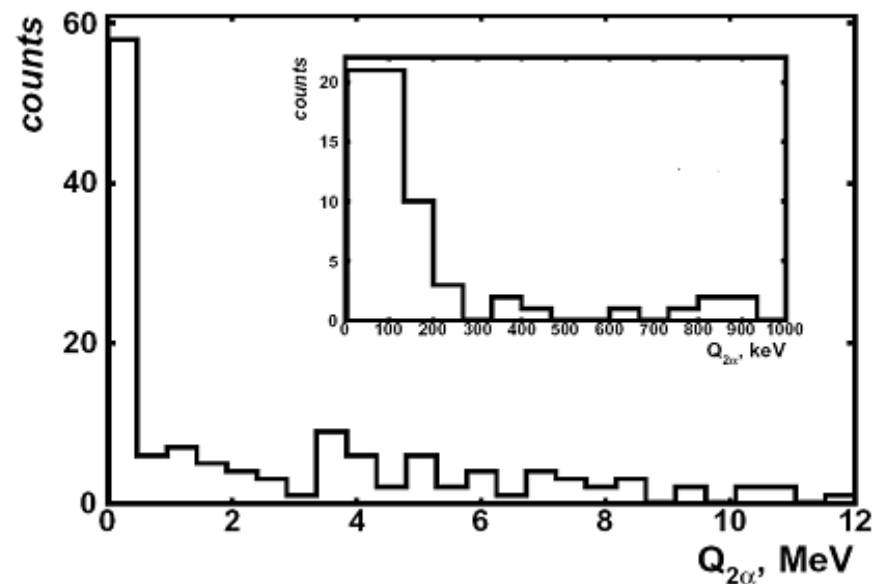


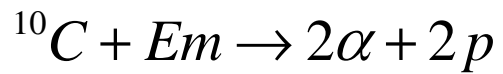
$$Q_{2\alpha} = M_{2\alpha} - 2 \cdot m_{\alpha}$$

Модель

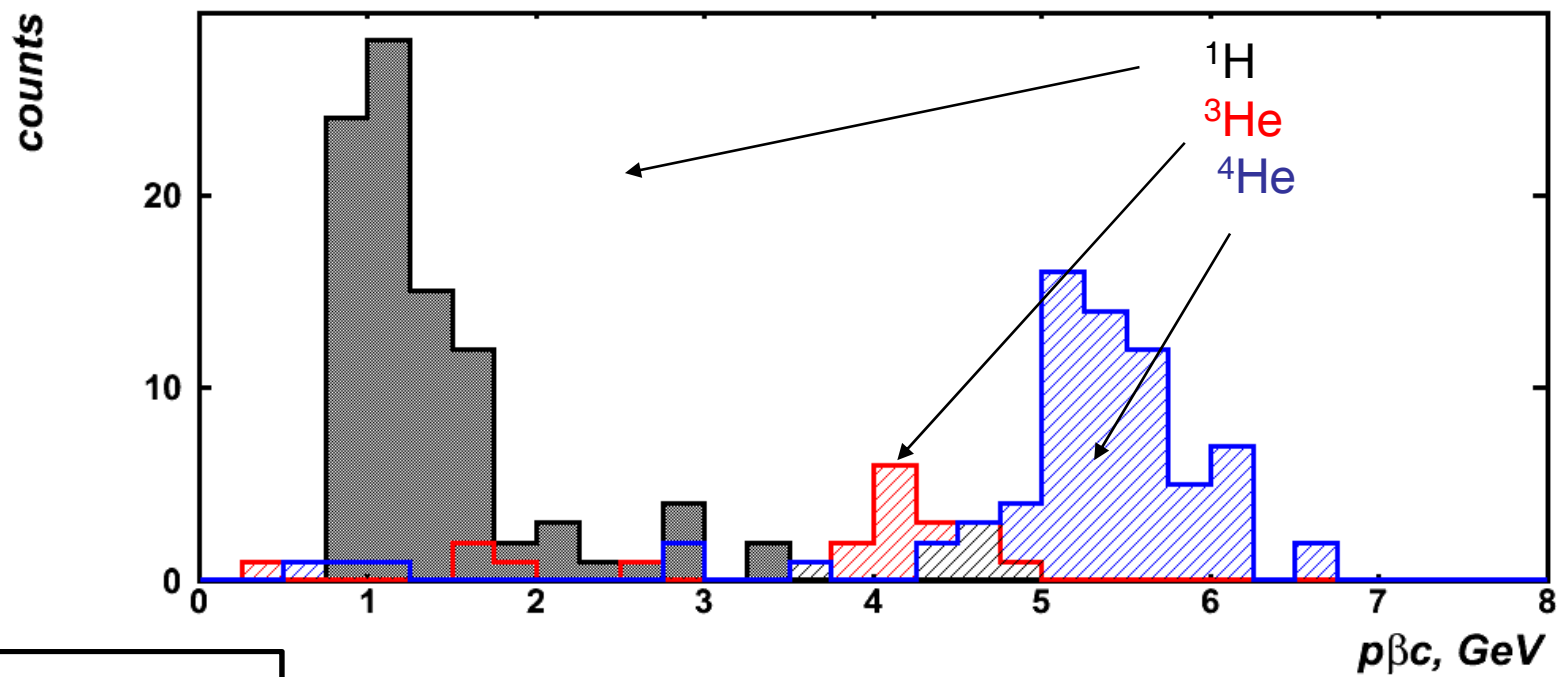


Эксперимент

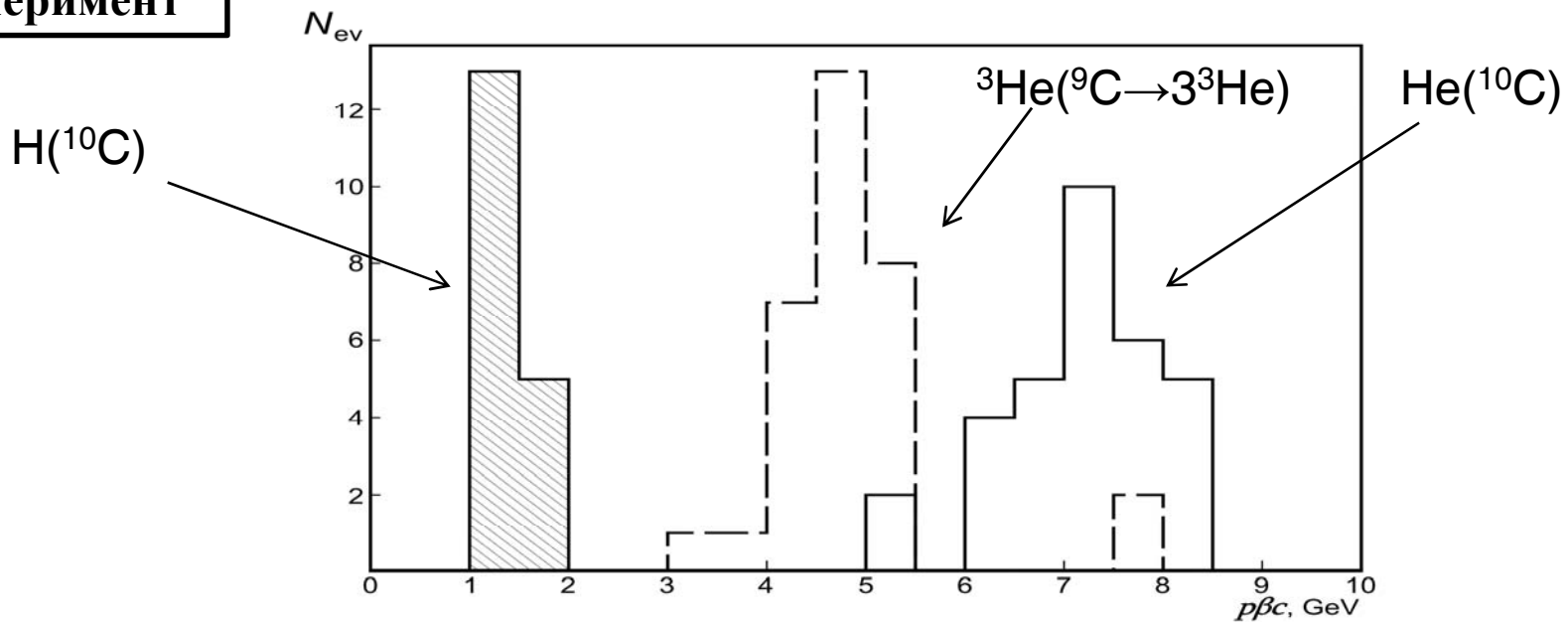




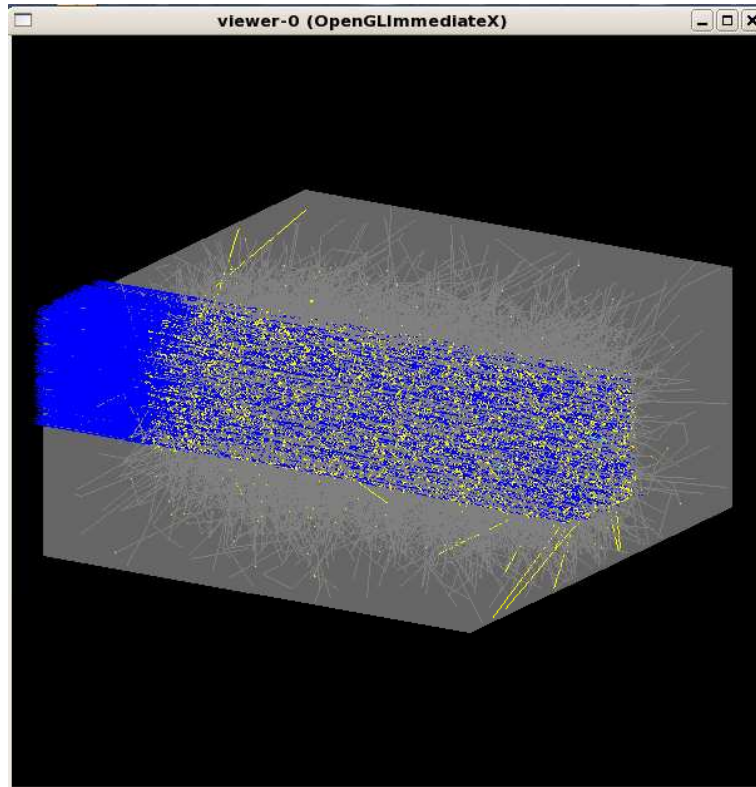
Модель



Эксперимент



Data modeling of ${}^7\text{Be}$ EM dissociation at 1.2 A GeV



G4EMDissociation

G4EMDissociationCrossSection

Started: 3000 of ${}^7\text{Be}$ nuclei at 1.2 A GeV

Produced: 7 events of ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Be} + n$;

${}^6\text{Be}$

Atomic Mass: 6.0197258 ± 0.0000059 amu

Excess Mass: 18374.465 ± 5.468 keV

Binding Energy: 26924.058 ± 5.468 keV

Spin: 0+

Half life: 92 keV ($5.0 \cdot 10^{-6}$ fs)

Mode of decay: 2 Proton to He-4

Decay energy: 1.372 MeV

Geant 4

[Download](#) | [User Forum](#) | [Gallery](#)
[Contact Us](#)

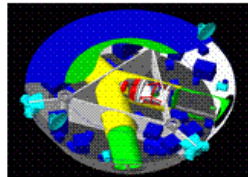
Search Geant4

Geant4 is a toolkit for the simulation of the passage of particles through matter. Its areas of application include high energy, nuclear and accelerator physics, as well as studies in medical and space science. The two main reference papers for Geant4 are published in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* [506 \(2003\) 250-303](#), and *IEEE Transactions on Nuclear Science* [53 No. 1 \(2006\) 270-278](#).

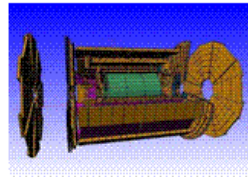
Applications



User Support



Results & Publications



Collaboration



News

- 15 August 2012 - **Geant4-MT prototype 9.5.p01** is available from the [download](#) area.
- 29 June 2012 - **Release 9.6 BETA** is available from the [Beta download](#) area.
- 20 April 2012 - **Patch-04 to release 9.4** is available from the [archive download](#) area.