ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ ЛЕГКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ЯДЕР МЕТОДОМ ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ

Проект BECQUEREL-C на 2009 - 11

П. И. Зарубин

Сотрудничество БЕККЕРЕЛЬ

Д. А. Артеменков, В. Браднова, П. И. Зарубин, И. Г. Зарубина, Д. О. Кривенков, А. И. Малахов, П. А. Рукояткин, В. В. Русакова, Т. В. Щедрина
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия (ОИЯИ)

В. Р. Саркисян, А. А. Моисеенко
Ереванский физический институт, Ереван, Армения

М. Хайдук, А. Неагу, Е. Штефан
Институт космических исследований, Магурель-Бухарест, Румыния

С. Г. Герасимов, Л. А. Гончарова, В. А. Дронов, Г. И. Орлова, Н. Г. Пересадько, Н. Г. Полухина, М. М. Чернявский, В. Н. Фетисов, С. П. Харламов
Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия (ФИАН)

С. Вокал, А. Кравчакова
Университет имени П. Й. Шафарика, Кошице, Словакия

Р. Станоева, И. Цаков
Институт ядерных исследований БАН, София, Болгария.

Достоинства метода ядерной эмульсии

Совмещенные микрофотографии взаимодействия релятивистского ядра ^{32}S и волоса полученные с помощью микроскопа МБИ-9 при 60-кратном увеличении и цифровой фотокамеры NIKON.

Введение

Создание пучков стабильных и радиоактивных ядер на ускорителях высоких энергий открывает качественно новые возможности для изучения структурных особенностей атомных ядер и их возбужденных состояний. Среди разнообразия ядерных взаимодействий события периферической диссоциации несут уникальную по полноте информацию о возбужденных состояниях ядер над порогами распадов на нуклоны.

С 2002 г. Сотрудничеством БЕККЕРЕЛЬ осуществляется облучение ядерных эмульсий на вновь формируемых пучках нуклотрона ОИЯИ, включая вторичные пучки радиоактивных ядер. Экспериментальная программа Сотрудничества ориентирована на создание систематических представлений о картине фрагментации стабильных и радиоактивных ядер в периферических взаимодействиях, обеспечивающих наиболее полное наблюдение ядерных фрагментов. Рекордное пространственное разрешение ядерных эмульсий открывает доступ к уникальной информации о кластерных возбуждениях легких ядер вблизи порогов диссоциации. В Сотрудничестве объединены группы, обладающие просмотровыми и измерительными микроскопами, а также оборудованием для обработки ядерной эмульсии.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СОТРУДНИЧЕСТВА В 2005-7 гг.

Т. В. Щедрина, В. Браднова, А. Вокалова, С. Вокал, П. И. Зарубин, И. Г. Зарубина, А. Д. Коваленко, А. И. Малахов, Г. И. Орлова, П. А. Рукояткин, В. В. Русакова, М. Хайдук, С. П.Харламов, М. М. Чернявский, Периферические взаимодействия релятивистских ядер ^{14}N с ядрами фотоэмульсии, Ядерная физика, 70 №7 1271(2007); перевод на англ. яз. T. V. Shchedrina et al., Phys. At. Nucl., 70, 1230 (2007); arXiv:nucl-ex/0605022.

N. P.Andreeva, D. A. Artemenkov, V. Bradnova, M. M.Chernyavsky, A. Sh. Gaitinov, N. A. Kachalova, S. P. Kharlamov, A. D. Kovalenko, M. Haiduc, S. G. Gerasimov, L. A. Goncharova, V. G. Larionova, A. I. Malakhov, A. A. Moiseenko, G. I. Orlova, N. G. Peresadko, N. G. Polukhina, P. A. Rukoyatkin,V. V. Rusakova, V. R. Sarkisyan, T. V. Shchedrina, E. Stan, R. Stanoeva, I. Tsakov, S. Vokal, A. Vokalova, P. I. Zarubin, I. G. Zarubina, Clustering in light nuclei in fragmentation above *1A* GeV, Eur. Phys. J. A27 S1 295(2006), arXiv:nucl-ex/0604003.

Д. А. Артеменков, В. Браднова, П. И. Зарубин, И. Г. Зарубина, Н. А. Качалова, А. Д. Коваленко, А. И. Малахов, Г. И. Орлова, М. М Чернявский, П. А. Рукояткин, Р. Станоева, В. В Русакова, Е. Стан, М. Хайдук, С. П. Харламов, И. Цаков, Т. В. Щедрина, Особенности фрагментации ^{9}Be в *2He* при энергии *1.2A* ГэВ, Ядерная физика, 70 №7 1222(2007); перевод на англ. яз. D. A. Artemenkov et al., Phys. At. Nucl., 70, 1226 (2007); arXiv:nucl-ex/0605018v1.

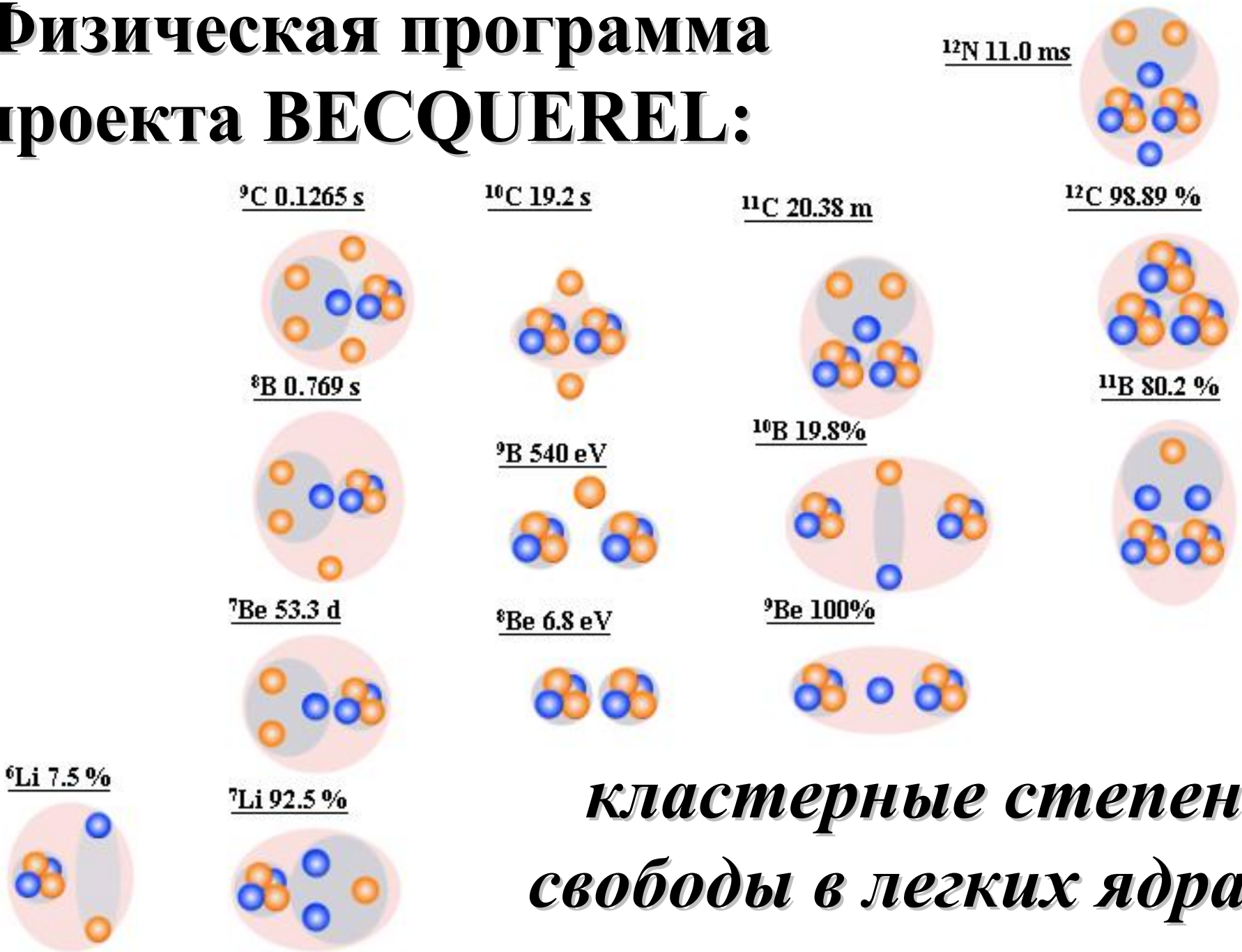
Н. Г. Пересадько, Ю. А. Александров, В. Браднова, С. Вокал, С. Г. Герасимов, В. А. Дронов, П. И. Зарубин, И. Г. Зарубина, А. Д. Коваленко, В. Г. Ларионова, А. И. Малахов, П. А. Рукояткин, В. В. Русакова, С. П. Харламов, В. Н. Фетисов, Каналы фрагментации релятивистских ядер ^{7}Be в периферических взаимодействиях, Ядерная физика, 70 №7 1226(2007); перевод на англ. яз. D. A. Artemenkov et al., Phys. At. Nucl., 70, 1266(2007); arXiv:nucl-ex/0605014.

Р. Станоева, В. Браднова, С. Вокал, П. И. Зарубин, И. Г.Зарубина, Н. А. Качалова, А. Д. Коваленко, А. И. Малахов, Г. И.Орлова, Н. Г. Пересадько, П. А. Рукояткин, В. В. Русакова, Е. Стан, М. Хайдук, С. П. Харламов, И. Цаков, Т. В. Щедрина, Периферическая фрагментация ядер ^{8}B с энергией *1.2A* ГэВ в ядерной эмульсии, Ядерная физика, 70 №7 1255(2007); перевод на англ. яз. R. Stanoeva et al., Phys. At. Nucl., 70, 1216 (2007); arXiv:nucl-ex/0605013v3.

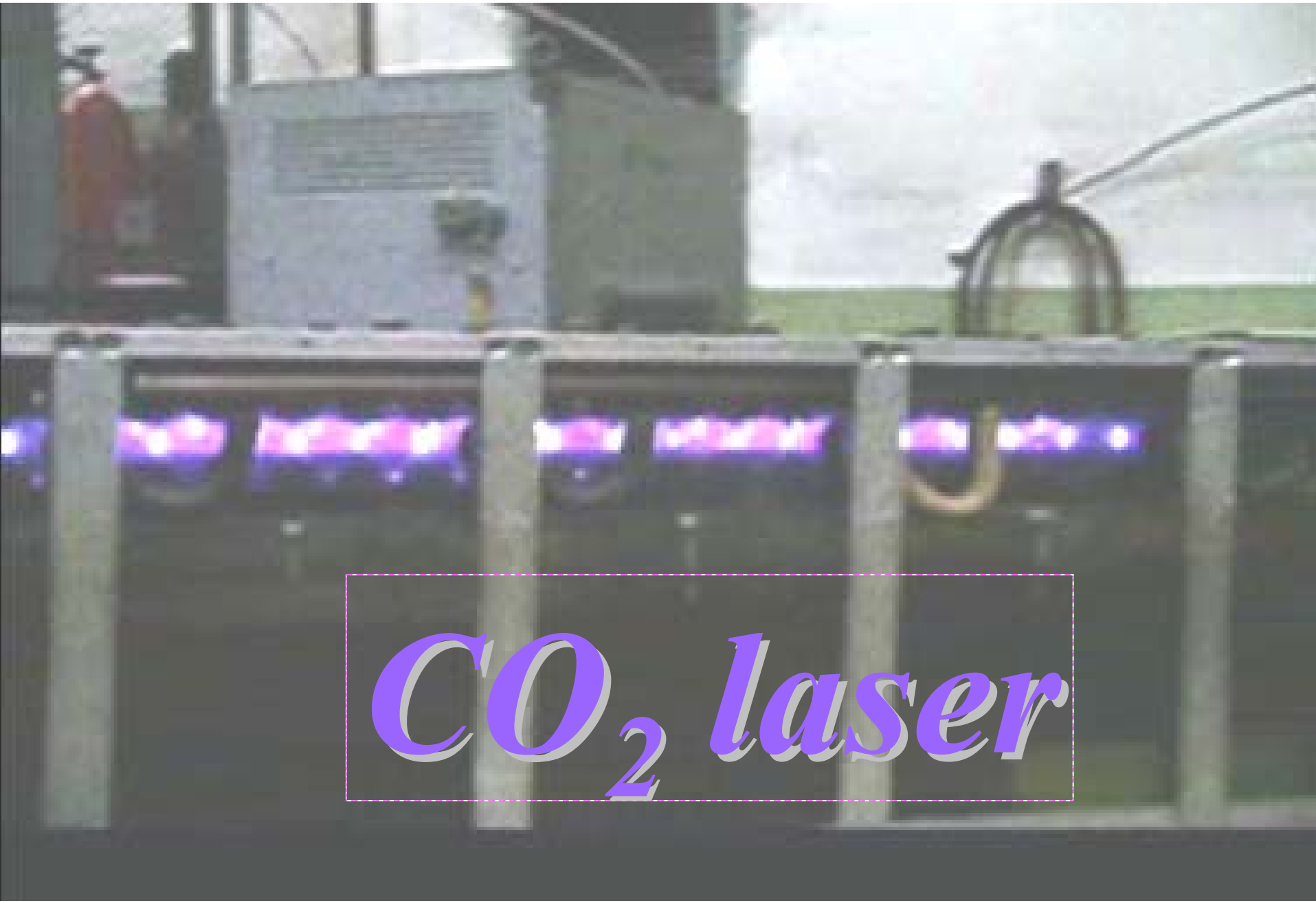
D. A. Artemenkov, T. V. Shchedrina, R. Stanoeva, and P. I. Zarubin, Clustering features of ^{9}Be, ^{14}N, ^{7}Be, and ^{8}B nuclei in relativistic fragmentation, AIP Conf. Proc. 912, 78(2007); arXiv: 0704.0384.

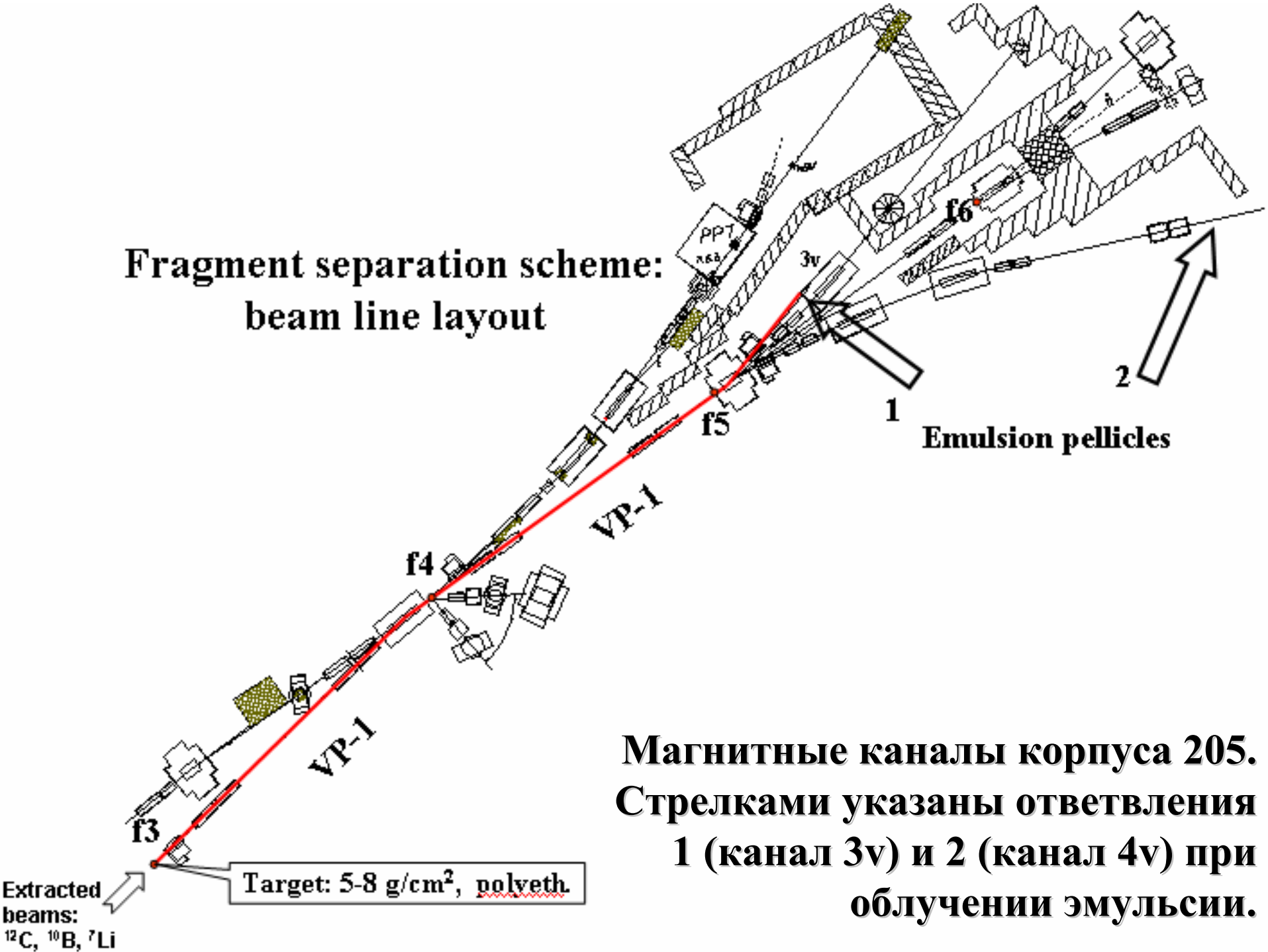
P. A. Rukoyatkin, L. N. Komolov, R. I. Kukushkina, V. N. Ramzhin, Beams of relativistic nuclear fragments at the Nuclotron accelerator facility, Czechoslovak Journal of Physics, Supplement C, Vol. 56, C379 (2006).

Физическая программа проекта BECQUEREL:

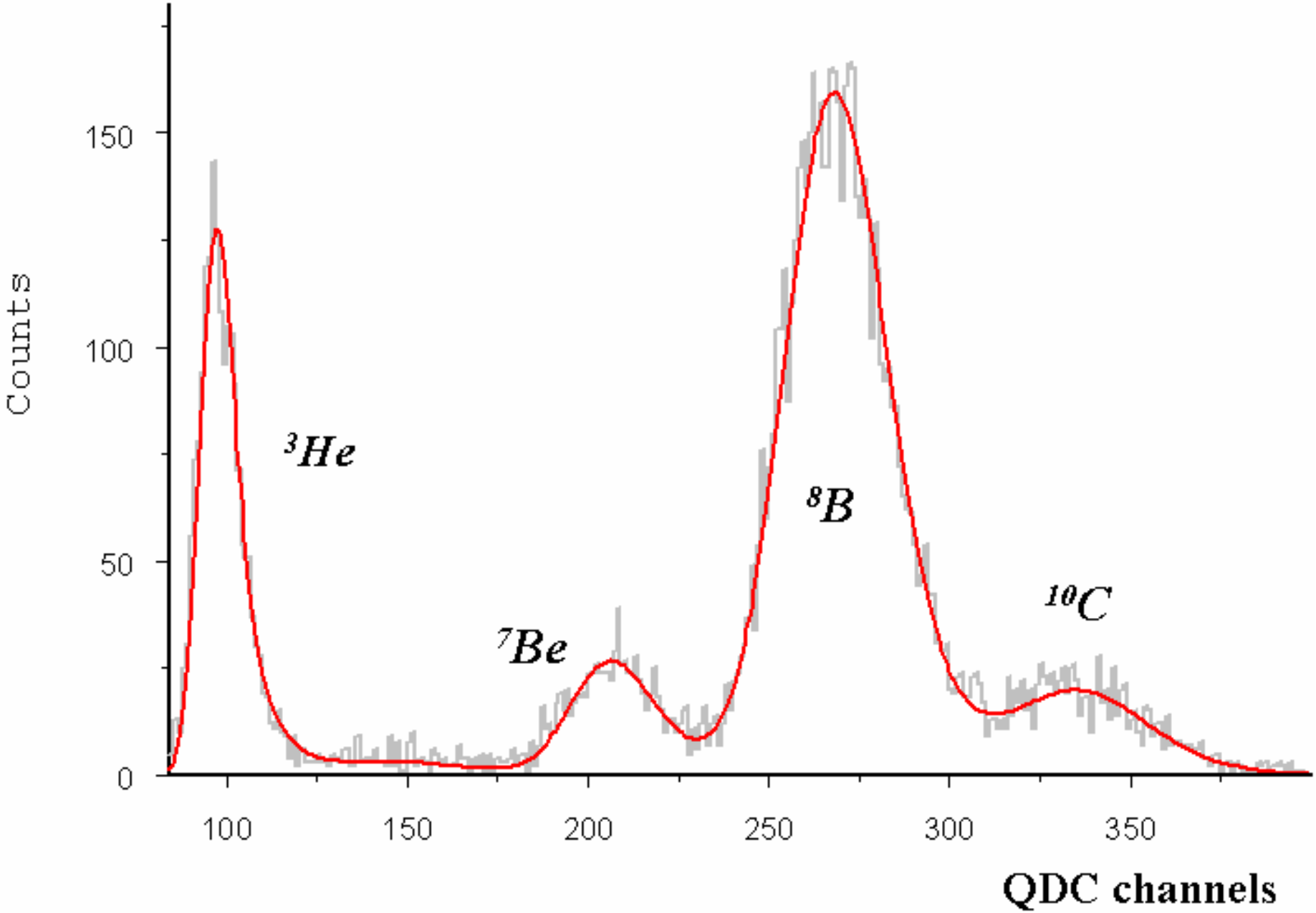


кластерные степени свободы в легких ядрах

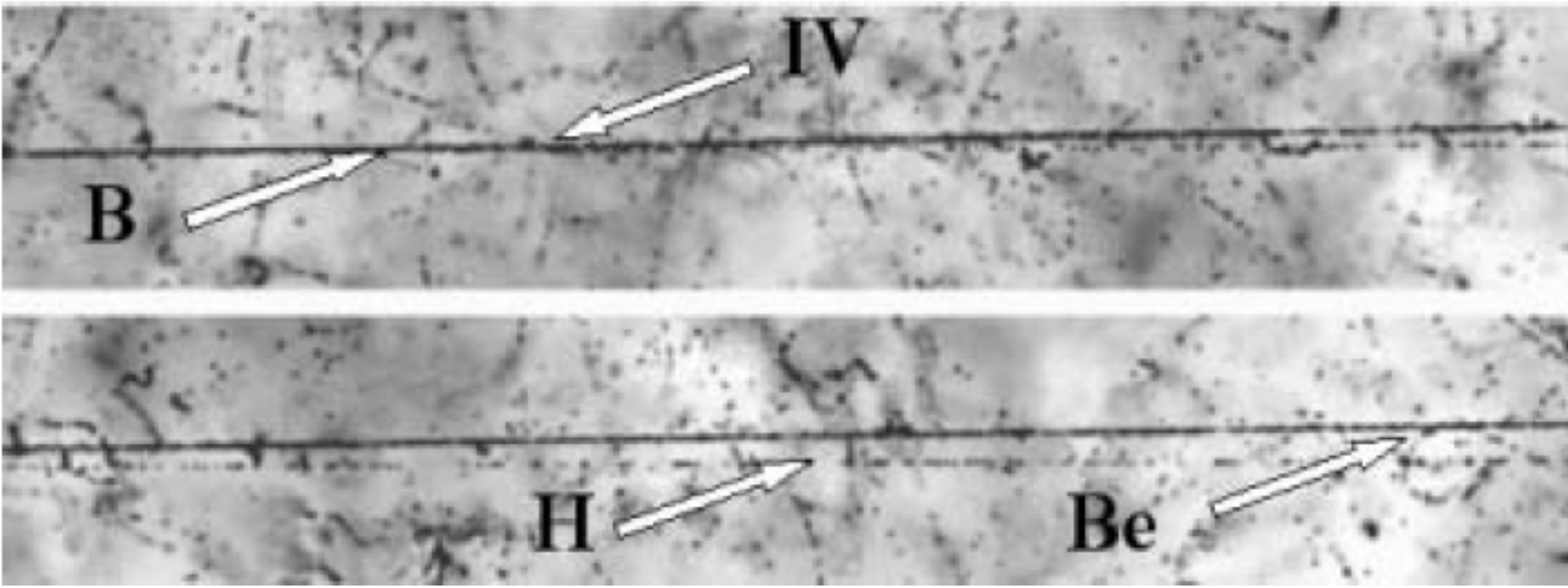

CO_2 laser



Магнитные каналы корпуса 205. Стрелками указаны ответвления 1 (канал 3v) и 2 (канал 4v) при облучении эмульсии.



Зарядовые спектры со сцинтилляционного монитора при формировании вторичного пучка с кратностью *Zpr/Apr = 5/8* в реакции фрагментации $^{10}B \rightarrow {}^{8}B$ на канале 3v.



Диссоциация $^{8}B \rightarrow {}^{7}Be + p$ с энергией *1.2 А ГэВ* в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии.
На верхней фотографии указана вершина взаимодействия IV.
При смещении по направлению струи фрагментов (нижняя фотография) можно различить фрагмент *Be* и фрагмент *H*.

Периферические взаимодействия релятивистских ядер

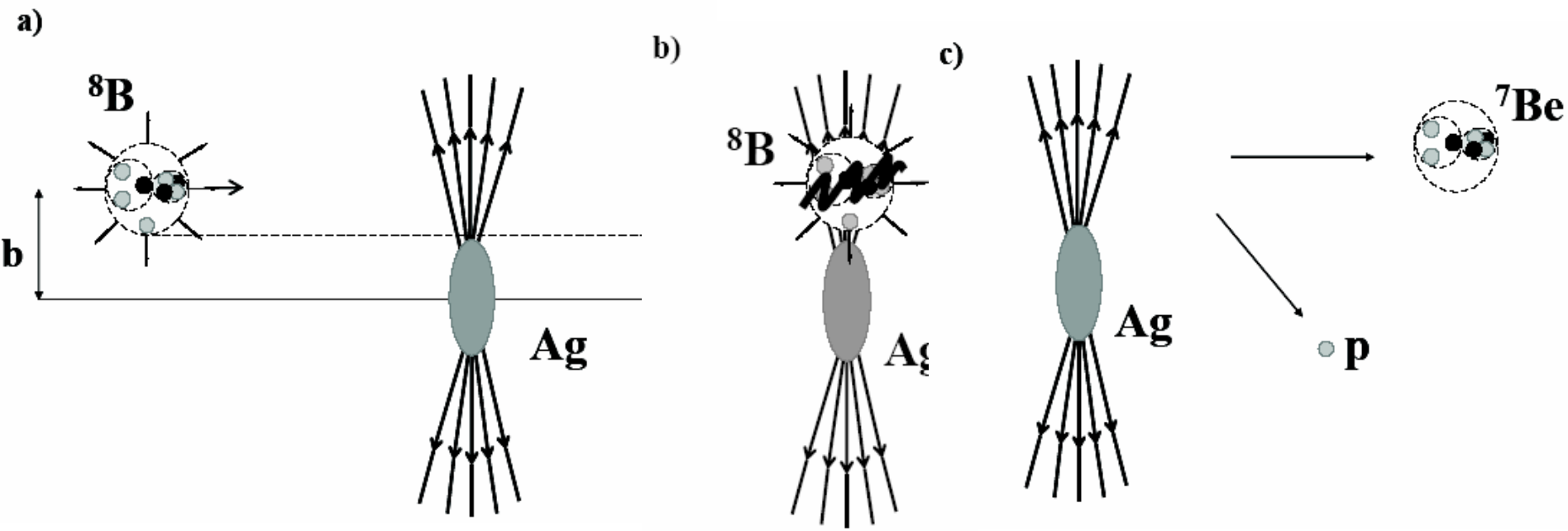
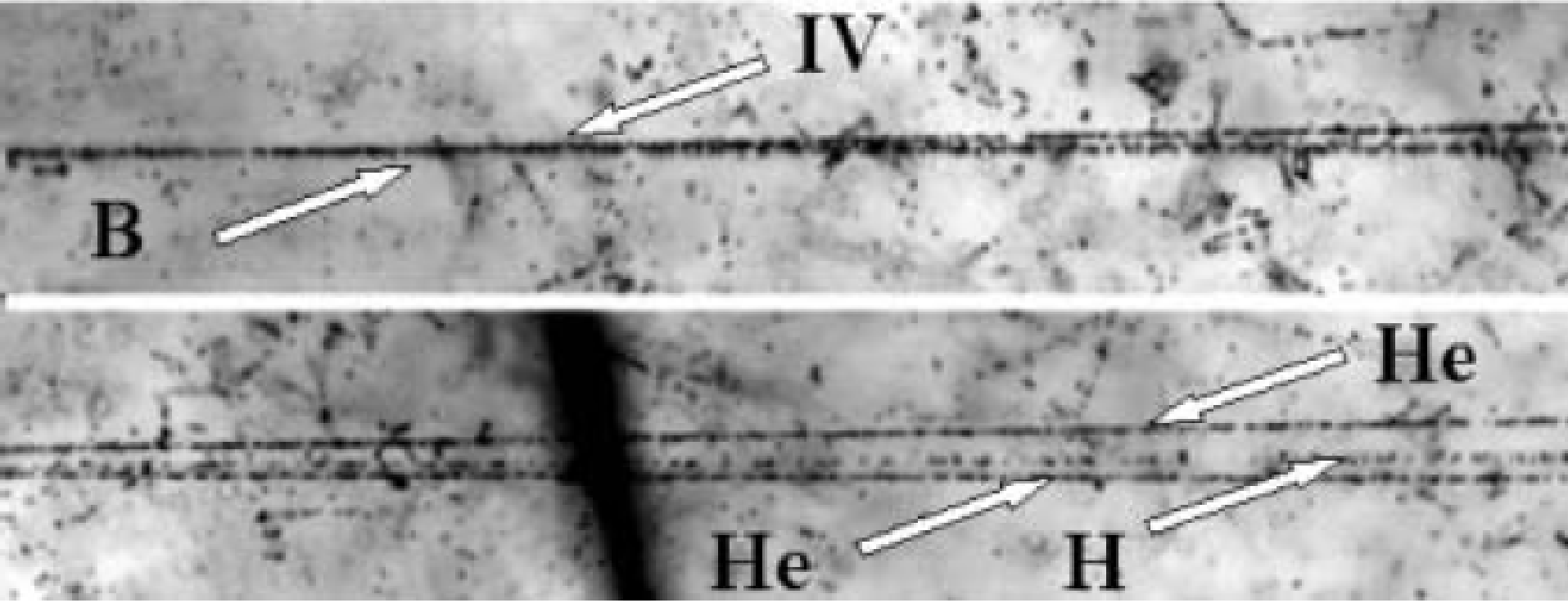
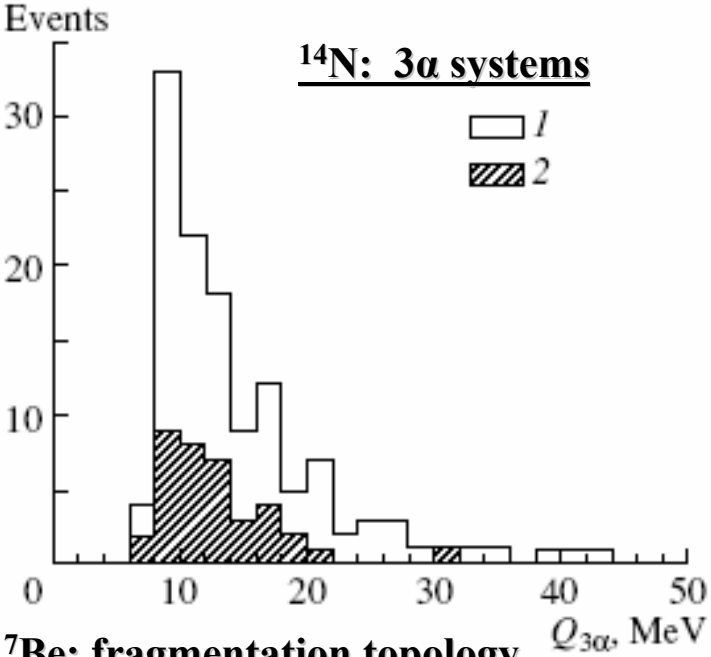


Схема периферической диссоциации релятивистского ядра ^8B в электромагнитном поле ядра *Ag*:
сближение ядер с прицельным параметром *b* (a),
поглощение ядром ^8B квазиреального фотона (b),
диссоциация на два фрагмента *p* и ^7Be (c).

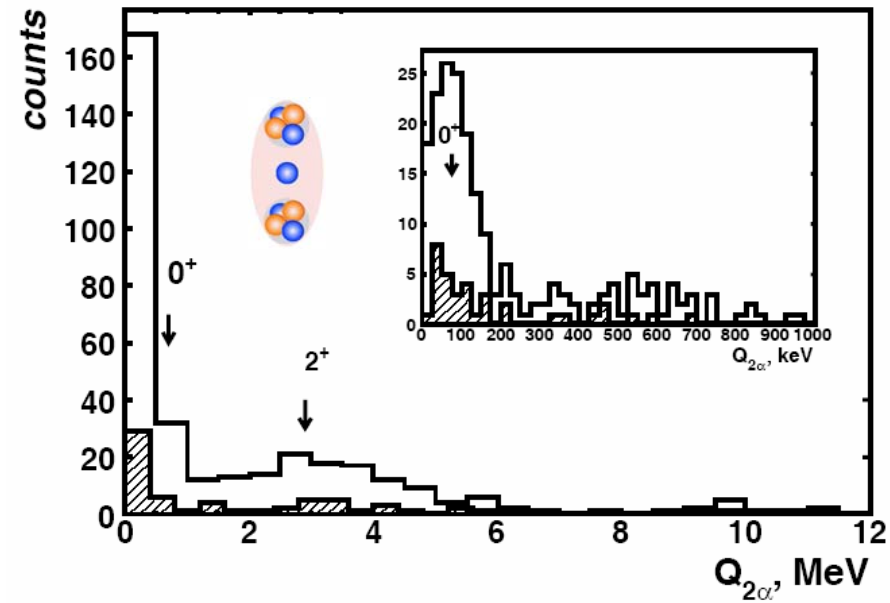


Диссоциация $^{8}B \rightarrow 2He + H$ с энергией *1.2 A* ГэВ в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии.
На верхней фотографии видна вершина взаимодействия и струя фрагментов в узком угловом конусе. При смещении по направлению струи фрагментов (нижняя фотография) можно различить *2* фрагмента *He* и фрагмент *H* (трек в середине).

^{14}N: 3α systems

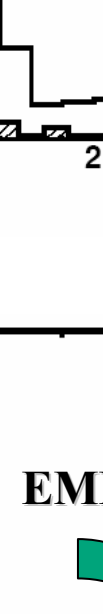


^{9}Be: Invariant mass distribution of 371 α-pairs

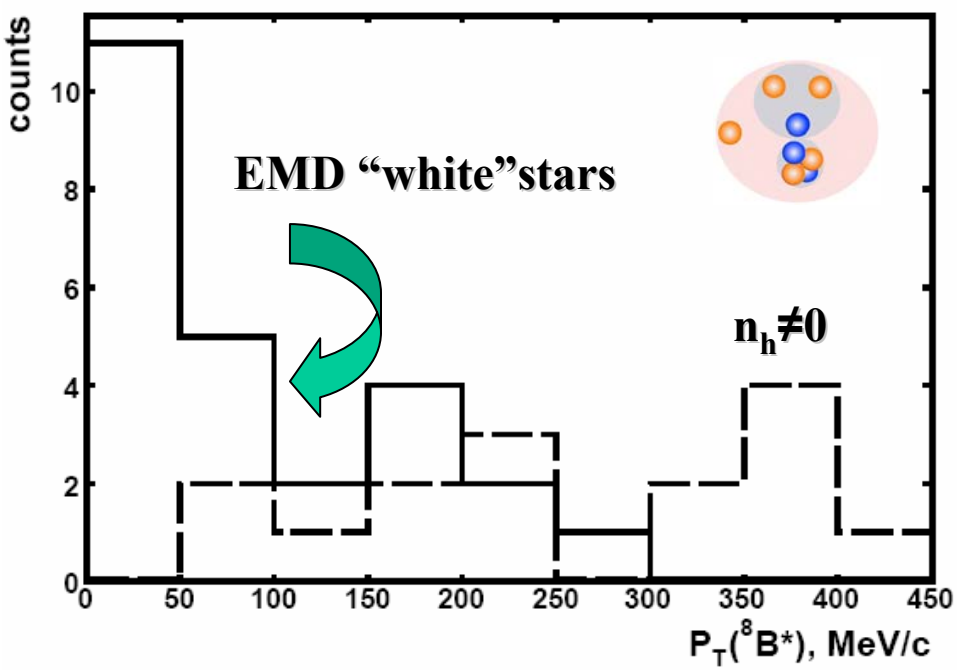


^{7}Be: fragmentation topology

Channel	2He	2He	He+2H	He+2H	4H	4H	Li+H	Li+H	Sum
	$n_b=0$	$n_b>0$	$n_b=0$	$n_b>0$	$n_b=0$	$n_b>0$	$n_b=0$	$n_b>0$	
^{3}He+^{4}He	30	11							41
^{3}He+^{3}He	11	7							18
^{4}He+2p			13	9					22
^{4}He+d+p			10	5					15
^{3}He+2p			9	9					18
^{3}He+d+p			8	10					18
^{3}He+2d			1						1
^{3}He+t+p			1						1
3p+d					2				2
2p+2d					1				1
^{6}Li+p							9	3	12
Sum	41	18	42	33	2	1	9	3	149



^{8}B: Total P_T (^{7}Be+p)



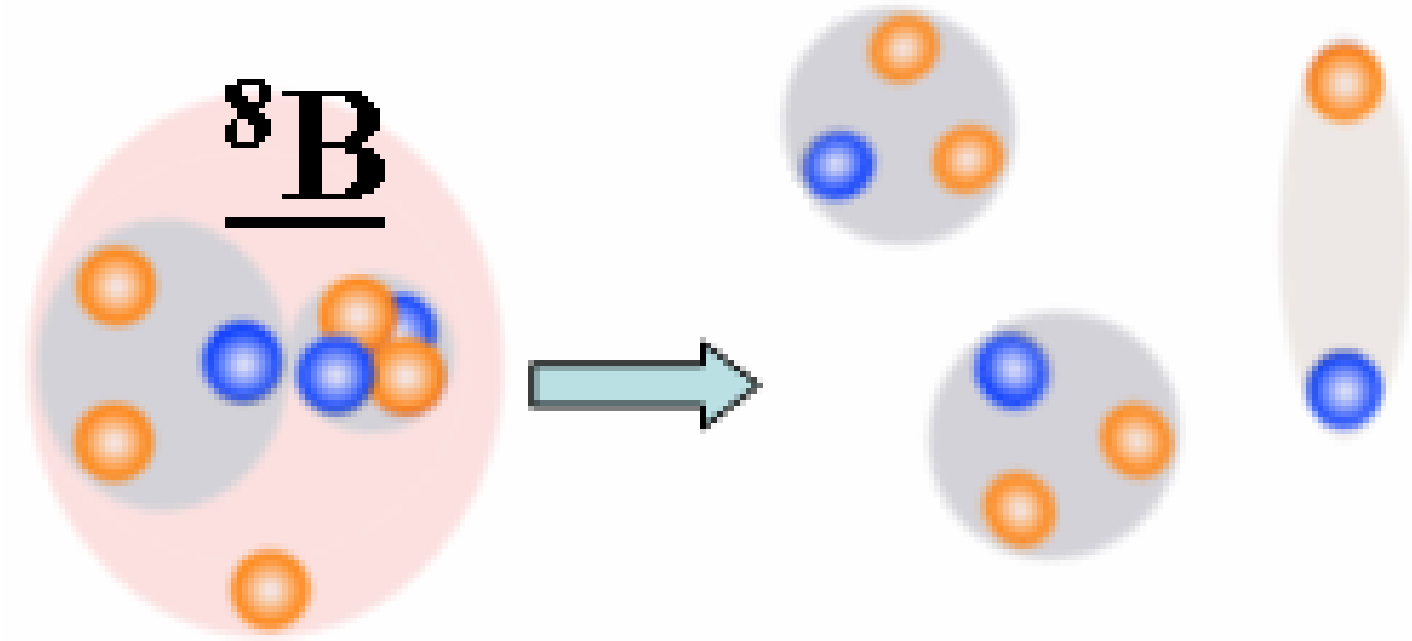
Анализ фрагментации $^9Be + p \rightarrow 2\alpha$ на новом уровне статистики

$Q_{2\alpha}$, MeV	$n_s = 0$ ($n_s \neq 0$)										
	$n_g=0$, $n_b=0$	$n_g=1$, $n_b=0$	$n_g=0$, $n_b=1$	$n_g=0$, $n_b=2$	$n_g=0$, $n_b=3$	$n_g=0$, $n_b=4$	$n_g=0$, $n_b=5$	$n_g=0$, $n_b=6$	$n_g>0$, $n_b>0$	$n_g>1$, $n_b=0$	$n_g=1$, $n_b=3$
$Q_{2\alpha} \leq 1$	98 (20)	10 -	21 (6)	8 (2)	1 (4)	3 -	1 -	- -	22 (6)	3 -	4 (1)
$1 < Q_{2\alpha} \leq 4$	33 (7)	10 (5)	14 (1)	3 (5)	2 -	1 (1)	- -	1 -	11 (3)	2 (2)	2 (2)
$Q_{2\alpha} > 4$	13 (5)	7 (1)	4 (3)	2 (3)	2 -	3 (1)	1 -	- -	7 (3)	- (1)	- -

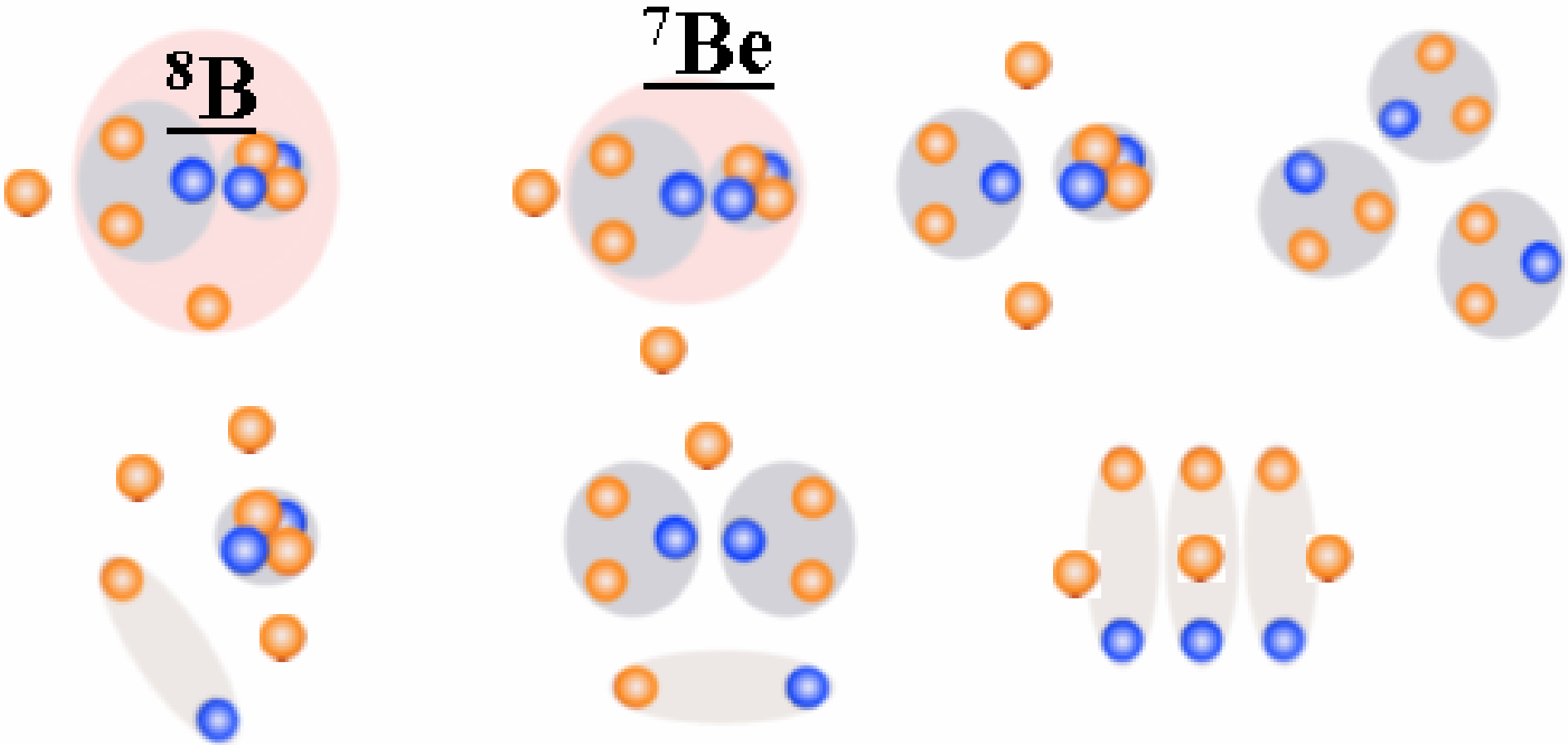
Поиск кластерной диссоциации

$$^{8}B \rightarrow 2\,^{3}He + {}^{2}H$$

Каналы фрагментации	$n_s = 0$				
	$n_g = 0$ $n_b = 0$	$n_g = 1$ $n_b = 0$	$n_g = 0$ $n_b = 1$	$n_g > 1$ $n_b = 0$	$n_g = 0$; $n_b > 1$
He + 3H	12	6	8	-	8
2He + H	14	3	8	-	7
Be + H	25	1	3	1	4
B	1	1	8	1	2



Анализ облучения ядрами ^{9}C

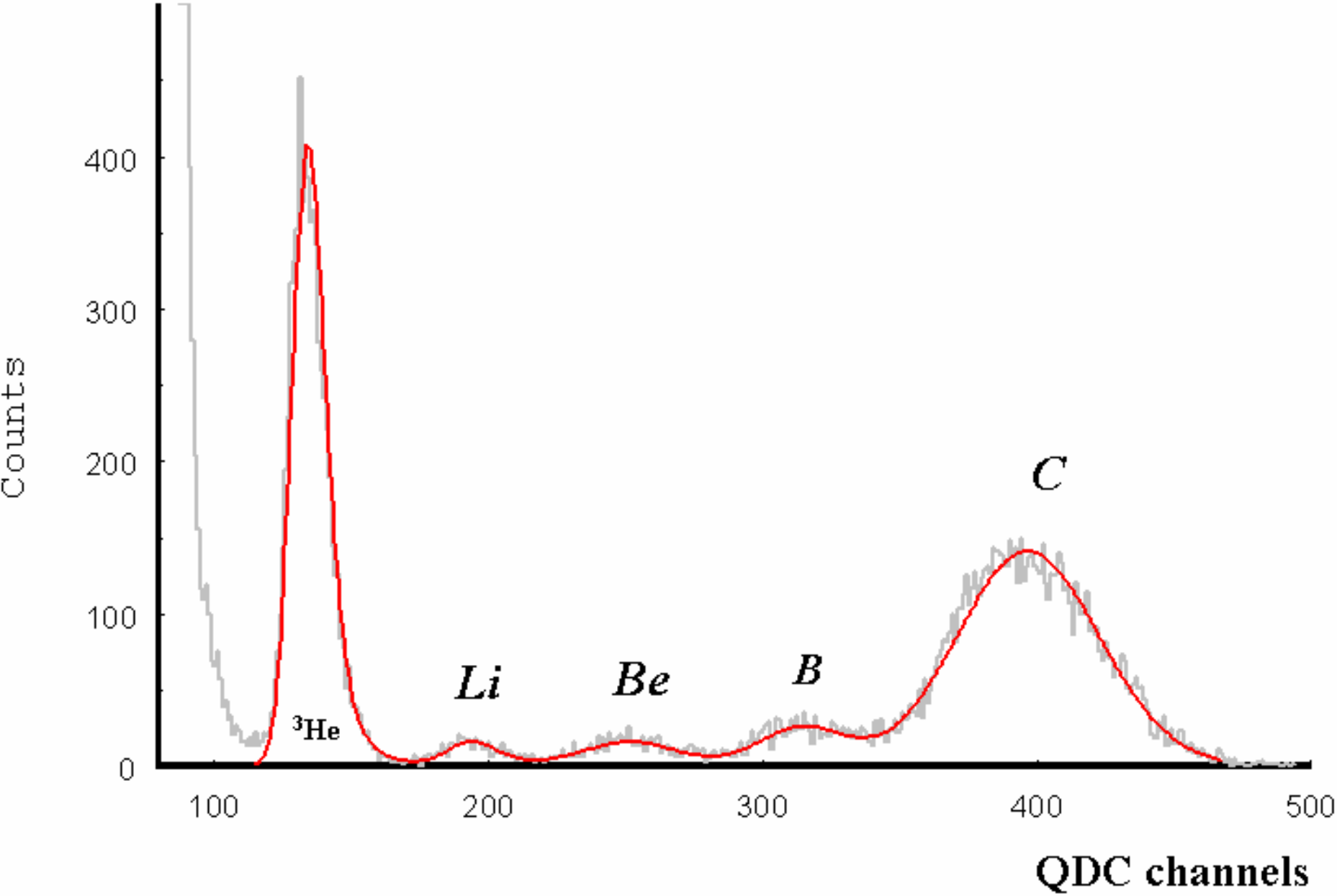


<u>Наиболее приоритетная задача проекта</u> состоит в выполнении полного анализа событий диссоциации ядер ^9C . Известными методами микроскопного анализа будет выполнен поиск по следам примерно *2000* неупругих взаимодействий. Для событий периферического типа, составляющих ≈ *10%* статистики, будут проведены зарядовые и угловые измерения и измерения многократного рассеяния следов *H* и *He* с целью их изотопной идентификации.

Такой объем первичных данных позволит идентифицировать зарядовый изотопный состав мод диссоциации $^8B + p$, $^7Be + 2p$, $^4He + {}^3He + 2p$ и др. сравнить их интенсивность, прояснить кинематические особенности их генерации. Можно предположить, что картина вероятностей каналов диссоциации ^8B и ^7Be при добавлении одного или, соответственно, двух протонов, будет расширена на ядро ^9C.

Сравнительный анализ диссоциации ^8B и ^9C может привести к выводам о роли кулоновского взаимодействия и эффектов спаривания внешних протонов в устойчивости этих ядер. Возможны наблюдения необычных случаев полного развала ^9C на *6* изотопов *H* в наиболее периферических взаимодействиях. Главный интерес представляет наблюдение «золотой» моды $3\,^3He$. Этот *3*-кластерный канал связан с перегруппировкой нуклонов в ^9C и имеет высокий порог ≈ *16* МэВ. Возможно, что установление особенностей этого возбужденного состояния создаст основания для расширения известного *3α*-процесса слияния как *3He* процесса.

При отборе струй с $\Sigma Z_{fr} = 6$ и $\Sigma A_{fr} = 8$ будет накапливаться статистика событий со срывом нейтронов, которые соответствуют распадам несвязанного ядра ^8C как из конфигурации основного состояния $^6Be + 2p$, так и возбужденного - $2\,^3He + 2p$. Изучение ^8C позволит продвинуться в малоизученную область физики ядра за линией протонной стабильности. Наблюдения о поведении многочастичных ансамблей стабильных легчайших ядер *H* и *He* могут быть востребованы в развитии сценариев нуклеосинтеза.



Зарядовые спектры со сцинтилляционного монитора при формировании вторичного пучка с кратностью *Zpr/Apr = 2/3* в реакции фрагментации $^{12}C \rightarrow {}^{9}C$ на канале 3v.

Анализ облучения ядрами ^{12}N

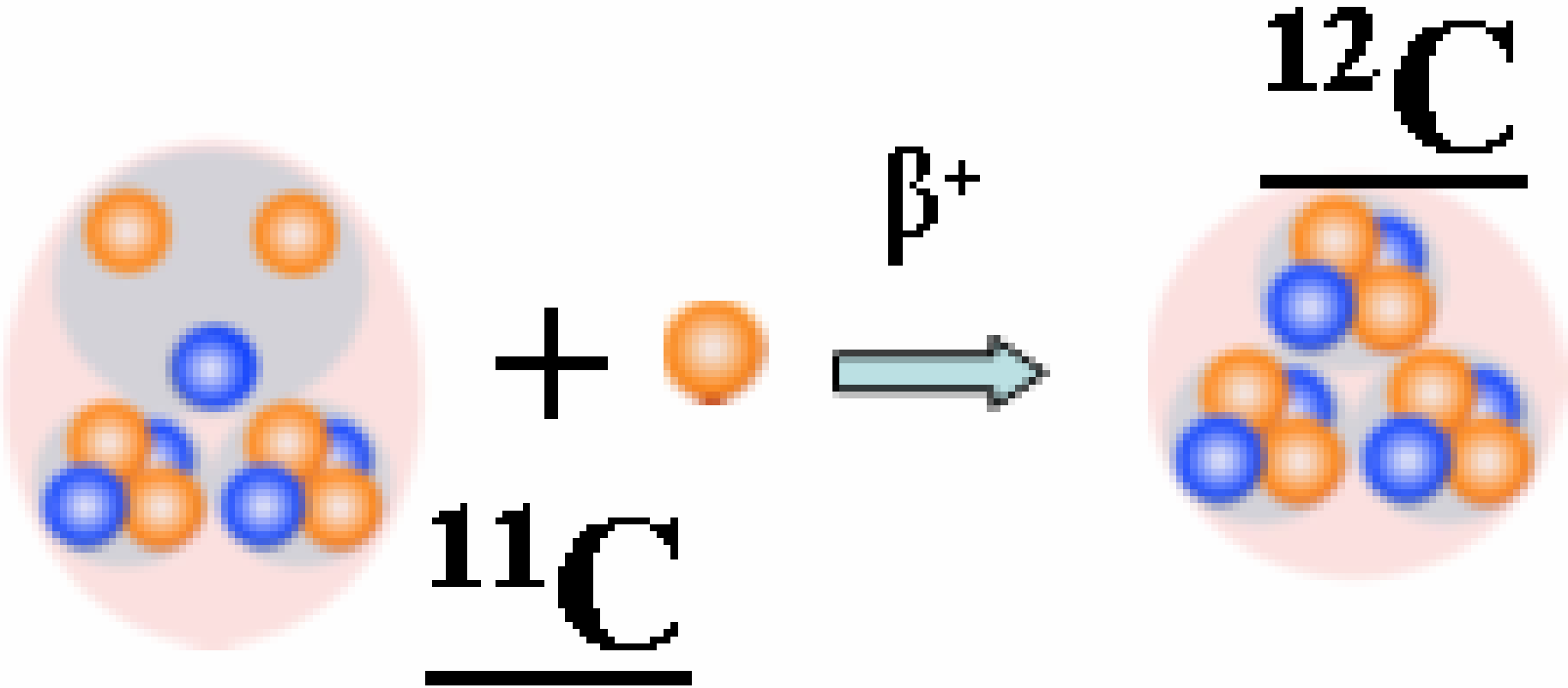
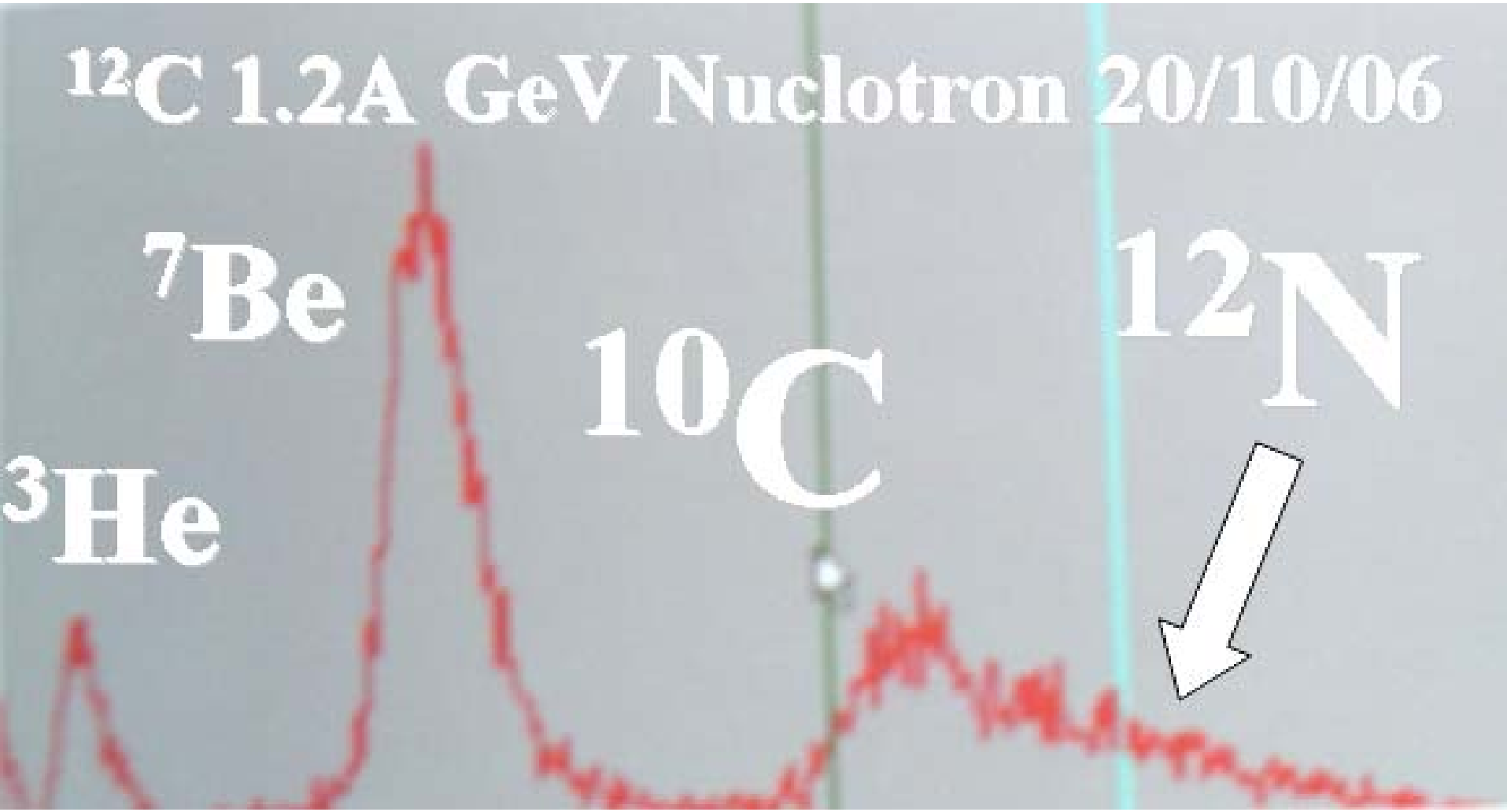
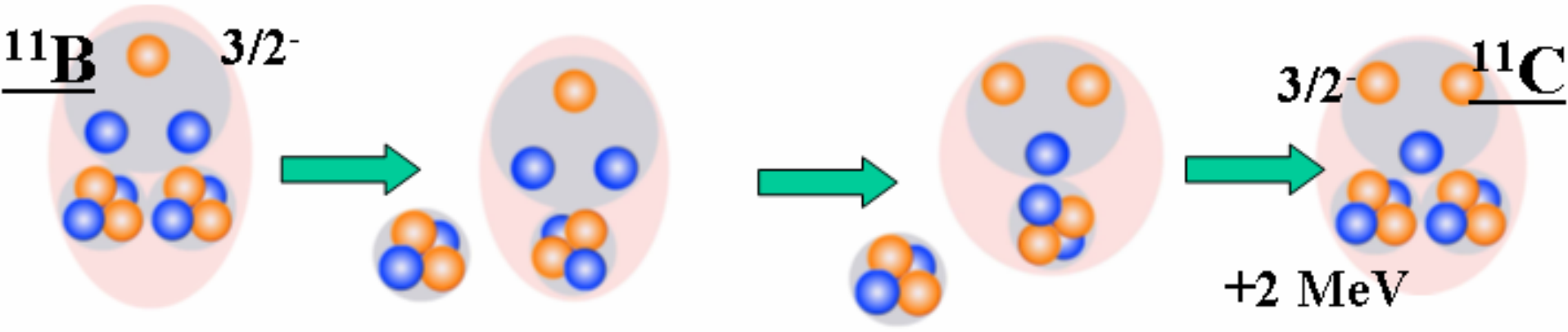


Диаграмма слияния $p + {}^{11}C$ с распадом в ядро ^{12}C.

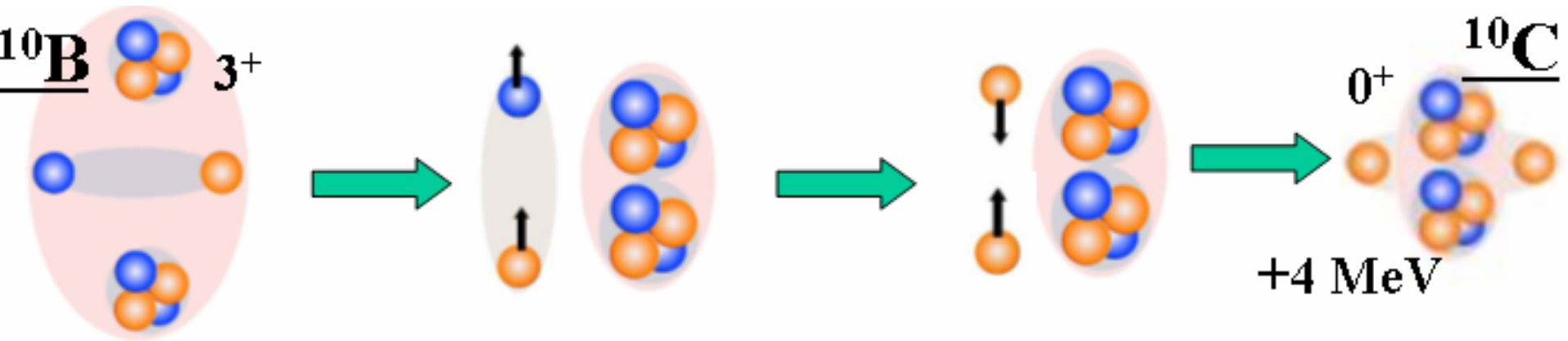


Зарядовые спектры со сцинтилляционного монитора при формировании вторичного пучка с кратностью *Zpr/Apr = 5/12* в реакции перезарядки $^{12}C \rightarrow {}^{12}N$ на канале 3v.

Облучение эмульсии ядрами ^{11}C



Облучение эмульсии ядрами ^{10}C



Запрос на приобретение электронной аппаратуры формирования пучков на 2009-11 гг.

1. Фотоумножители (Hamamatsu, Photonis)	4000 Euro	6 шт.	24000 Euro
2. Зарядово-цифровой преобразователь CAEN C1205 или аналогичный	4000 Euro	1 шт.	4000 Euro
3. Материалы и радиоэлектронные комплектующие детекторов и приемной электроники	2500 Euro		3000 Euro
4. Осциллограф TDS3000B	8000 Euro	1 шт.	8000 Euro

Итого: 39000 Euro
(13000 Euro в год)

Наименование узлов и систем установки, ресурсов, источников финансирования			Стоимость узлов (тыс.долл.) установки. Потребности в ресурсах	Предложения лабораторий по распределению финансирования и ресурсов				
				1 г.	2 г.	3 г.	4 г.	5 г.
Основные узлы и оборудование		1.Датчики для микроскопов 2.Электроника, ФЭУ	1.20 тыс. дол. 2.60 тыс.долл.	35 тыс. долл.	25 тыс. долл.	20 тыс. долл.		
Необходимые ресурсы	нормо	ОП ОИЯИ – механические работы – электроника КБ ЛАБОРАТОРИЯ ООЭП	1 чел. год	1 чел. год				
	час	Ускоритель (Нуклотрон) Реактор ЭВМ (тип)		100	100	100		
		Эксплуатационные расходы						
Источники финансирования	бюджет	Затраты из бюджета, в том числе инвалюные средства	80 тыс. долл.	35 тыс. долл.	25 тыс. долл.	20 тыс. долл.		
	внебюджетные	Вклады коллаборантов Средства по грантам Вклады спонсоров Средства по договорам Другие источники и т.д.						

BECQUEREL PROJECT

Проект БЕККЕРЕЛЬ

Beryllium (Boron) Clustering Quest in Relativistic Multifragmentation

http://becquerel.jinr.ru

<u>Предлагаемое на 2009-11 гг. продолжение проекта БЕККЕРЕЛЬ</u> должно стать новым этапом изучения легких ядер на границе протонной стабильности. Предполагается осуществить поиск редких каналов диссоциации, идентификация которых может иметь значение для развития физики ядра и сценариев нуклеосинтеза в ядерной астрофизике.

<u>Наиболее приоритетные задачи</u> состоят в исследовании множественной фрагментации радиоактивных ядер ^{9}C и ^{12}N в ядерной эмульсии. Подлежащие анализу слои эмульсии уже облучены этими ядрами.

<u>Будут продолжены исследования кластерных степеней свободы</u> в ядрах $^{7,9}Be$, $^{8,10,11}B$, ^{14}N, ^{28}Si и ^{32}S на новом уровне статистики и детальности описания.

<u>Новые облучения ядерной эмульсии будут выполнены во вторичных пучках содержащих изотопы $^{10,11}C$ и формируемых с помощью реакций перезарядки</u>. В рамках экспериментов по облучению предполагается осуществить поиск процесса двойной перезарядки ядер ^{9}Be в ^{9}C, связанного с глубокой перегруппировкой нуклонов.

NUCLOTRON: 1A GeV ^{56}Fe

Микрофотография события периферической фрагментации ядра ^{56}Fe с энергией *1A* ГэВ в эмульсии без образования фрагментов ядра мишени.

Облучение эмульсии выполнено на нуклотроне ОИЯИ.

SPS: 158 A GeV/c Pb

PHYSICAL REVIEW C **72**, 048801 (2005)

Multifragmentation reactions and properties of stellar matter at subnuclear densities

A. S. Botvina[1] and I. N. Mishustin[2,3]

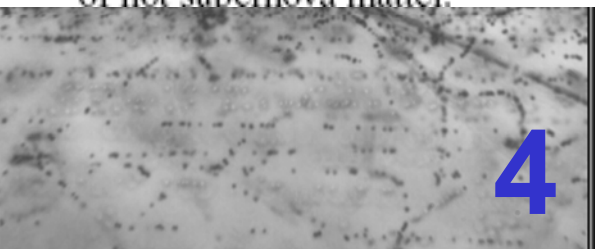
[1]*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, RU-117312 Moscow, Russia*

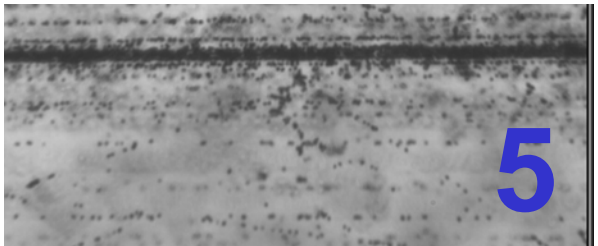
[2]*Frankfurt Institute for Advanced Studies, J.W. Goethe University, D-60438 Frankfurt am Main, Germany*

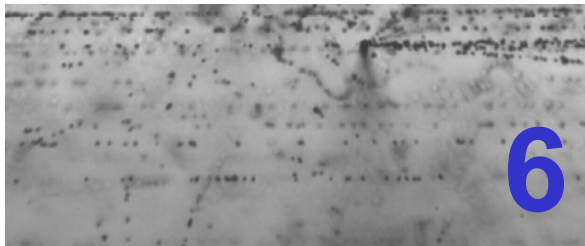
[3]*Kurchatov Institute, Russian Research Center, RU-123182 Moscow, Russia*

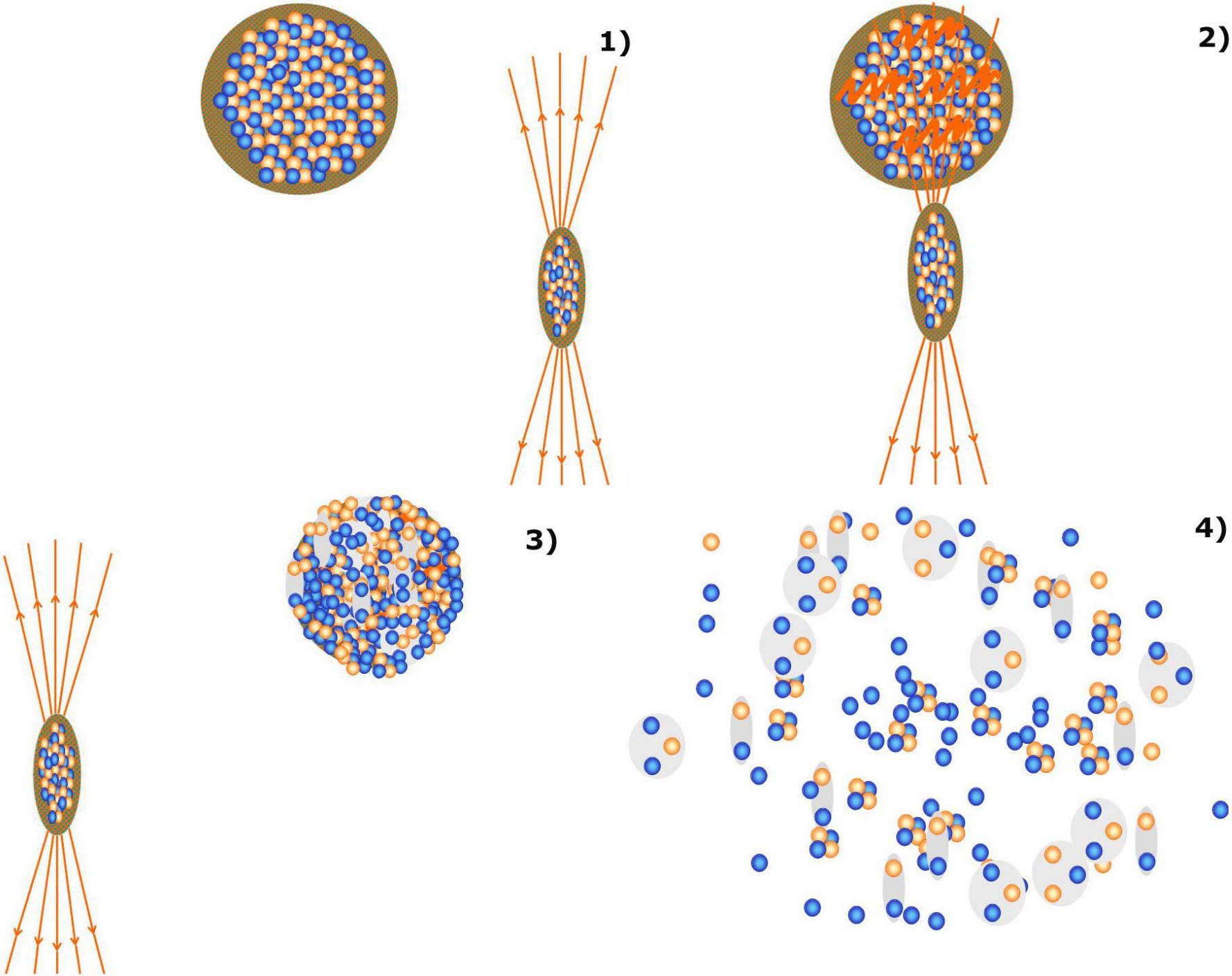
(Received 20 June 2005; published 24 October 2005)

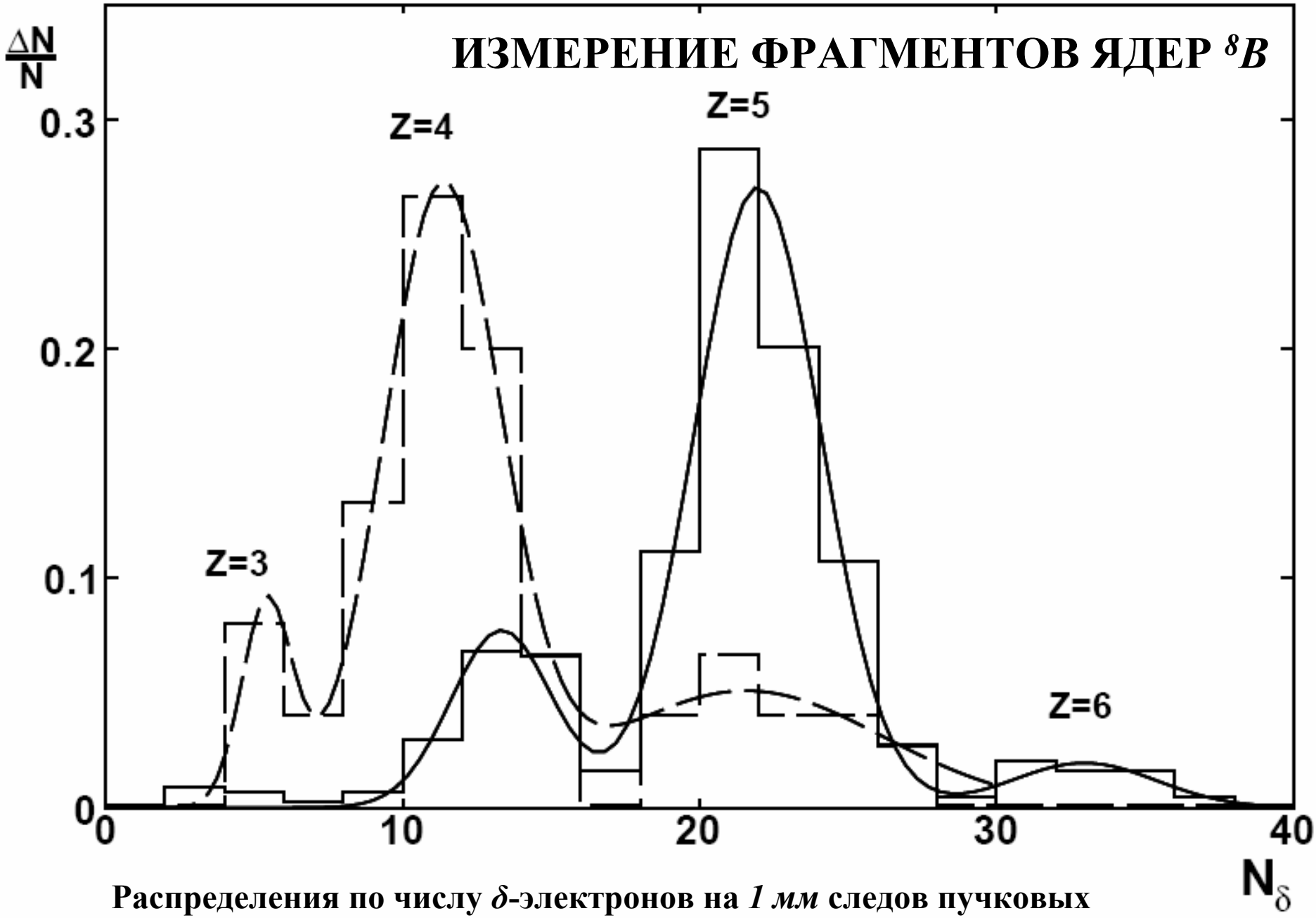
We point out the similarity of thermodynamic conditions reached in nuclear multifragmentation and in supernova explosions. We show that a statistical approach previously applied for nuclear multifragmentation reactions can also be used to describe the electroneutral stellar matter. Then properties of hot unstable nuclei extracted from the analysis of multifragmentation data can be used to determine a realistic nuclear composition of hot supernova matter.



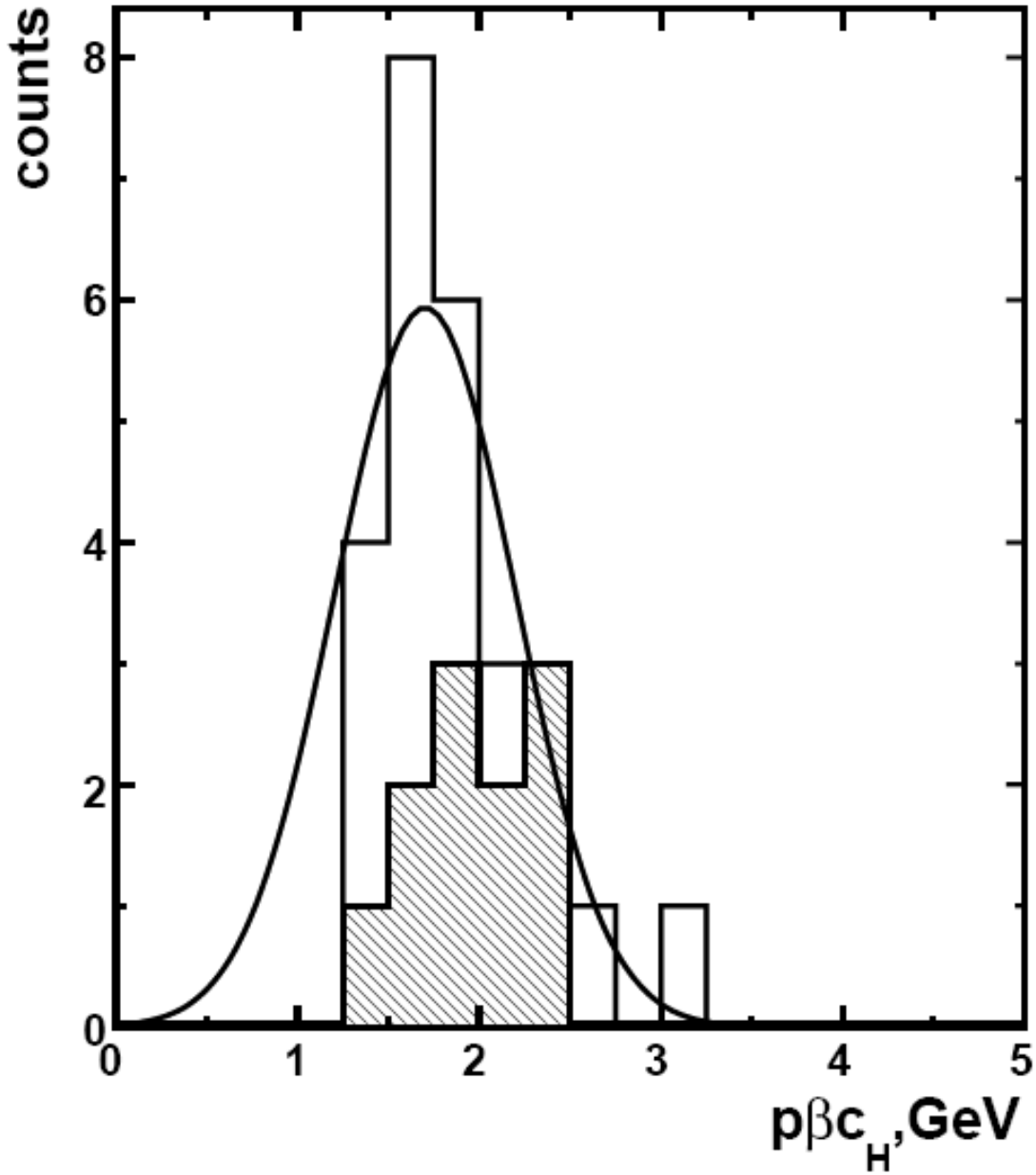




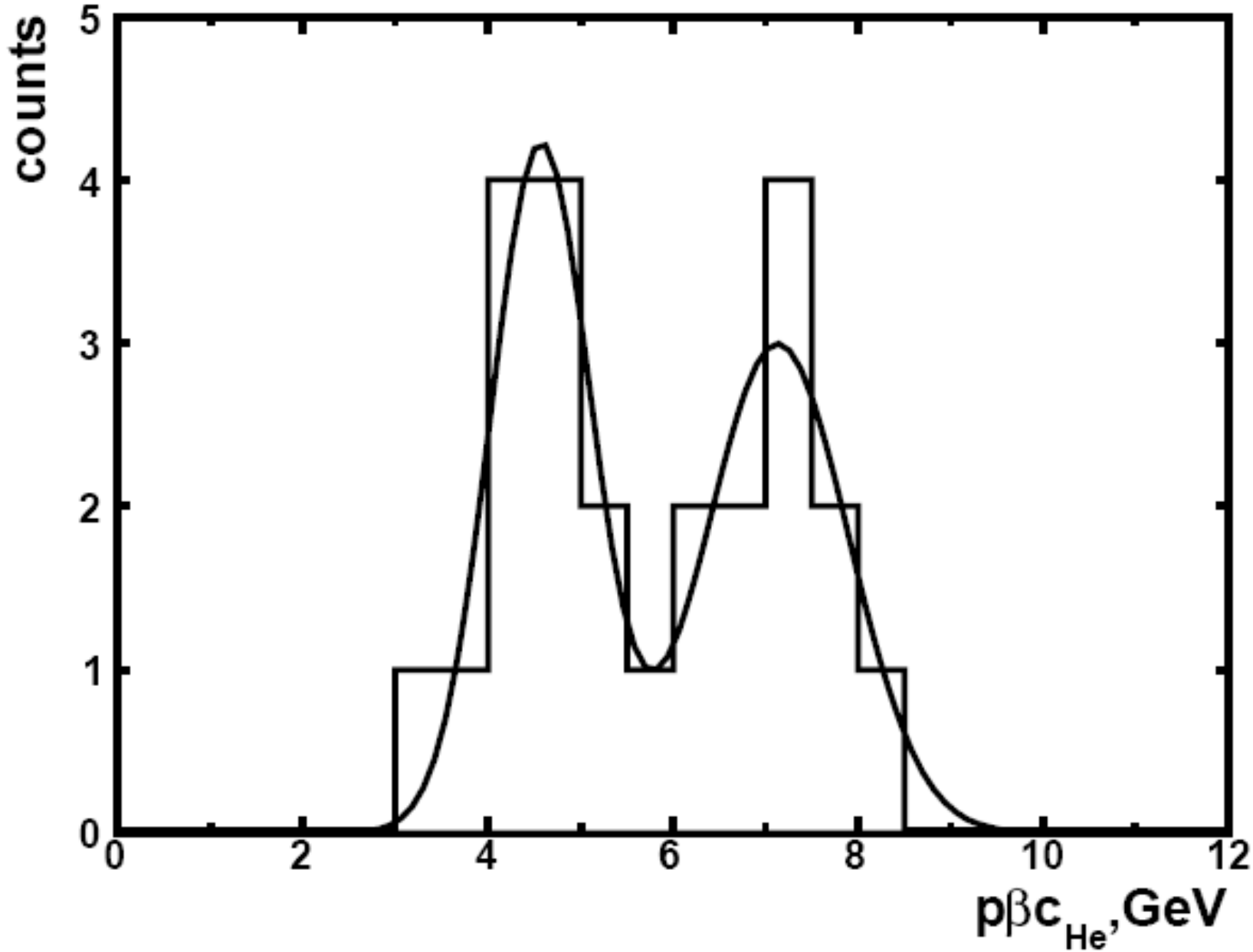

1)
2)
3)
4)



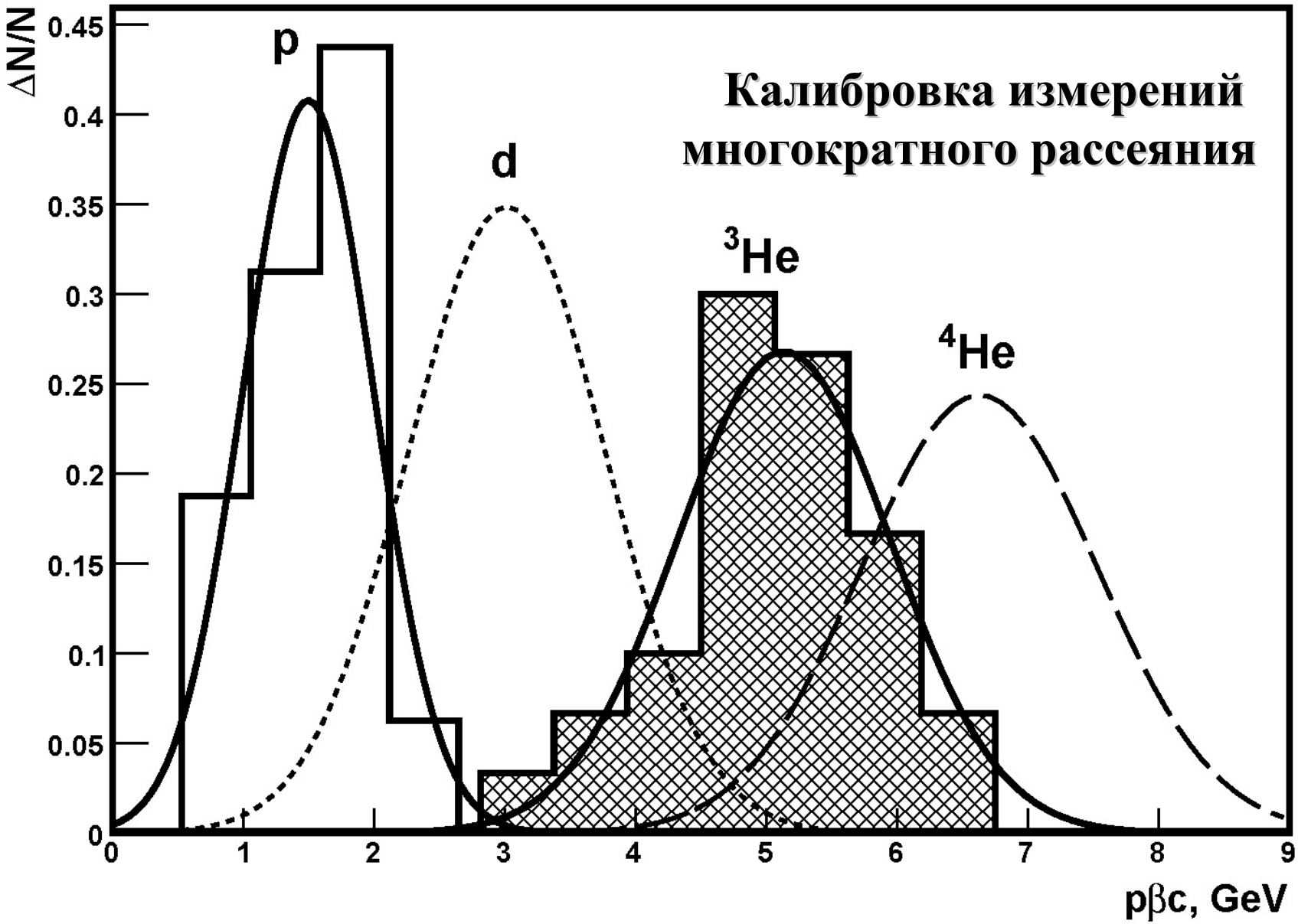
Распределения по числу *δ*-электронов на *1 мм* следов пучковых частиц и релятивистских фрагментов с зарядами $Z_{fr} > 2$.



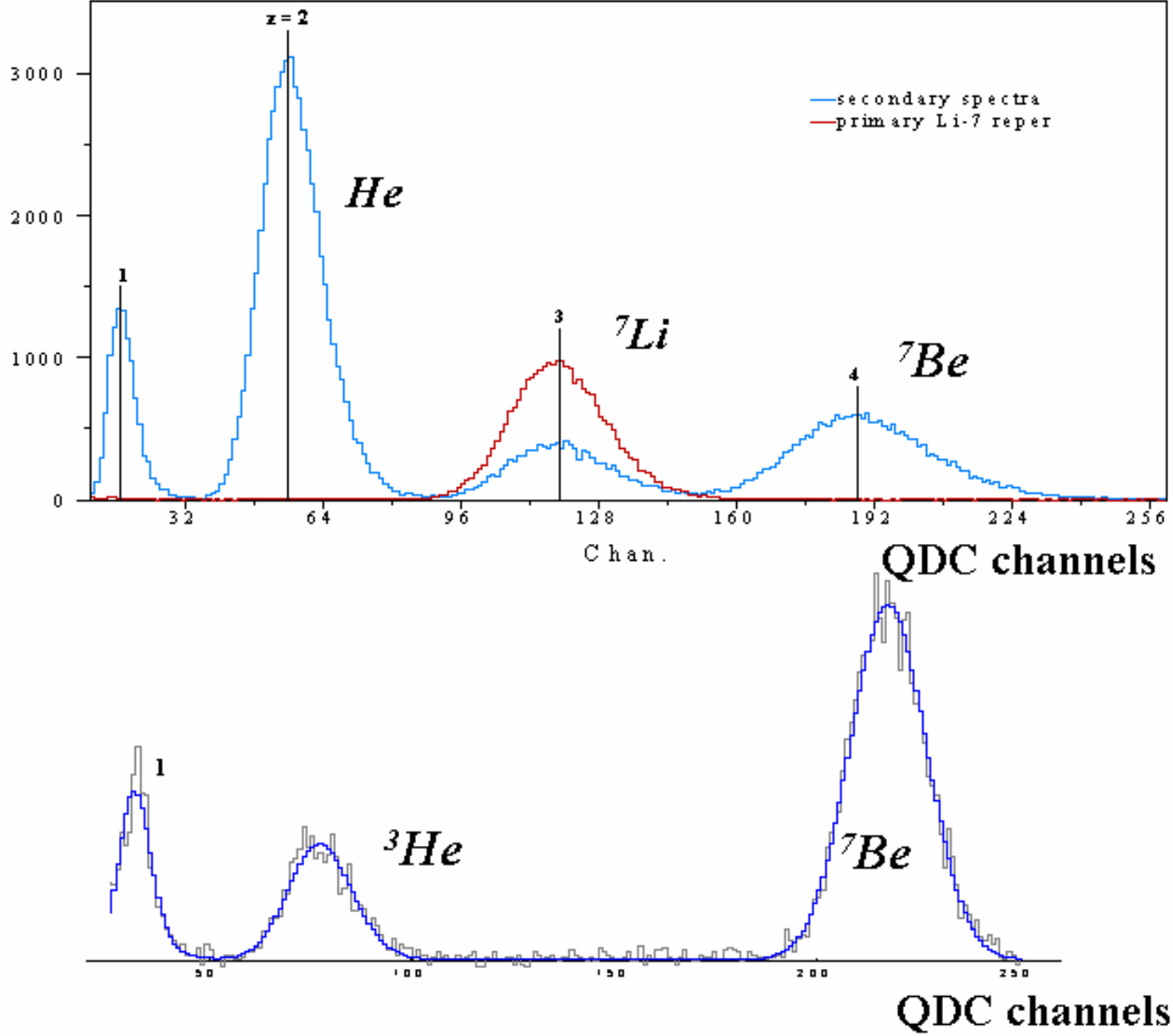
Распределение однозарядных фрагментов ядра ^{8}B по измеренным значениям $p\beta c$ в каналах диссоциации *Be + H* и *2He+H*. Заштрихованная часть гистограммы относится к каналу *2He + H*.



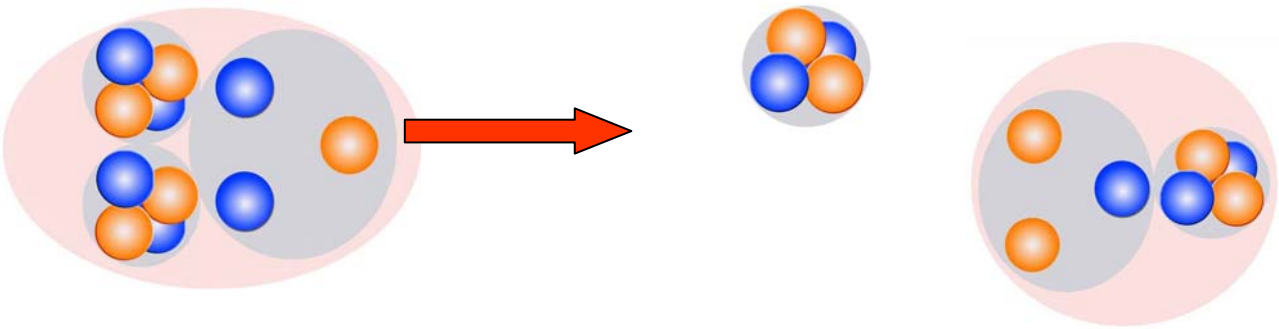
Распределение двухзарядных фрагментов ядра ^{8}B по измеренным значениям $p\beta c$.



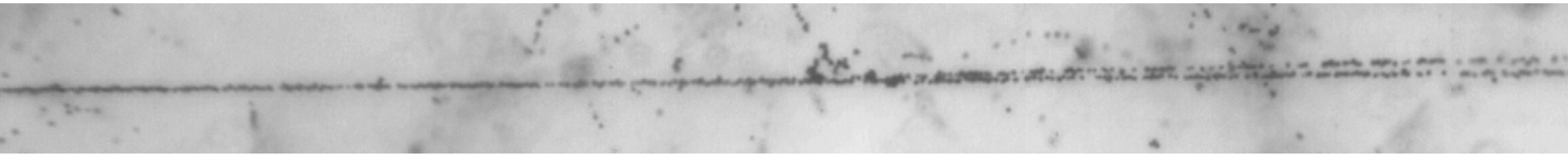
Распределение одно- и двухзарядных частиц по измеренным значениям *pβc*.

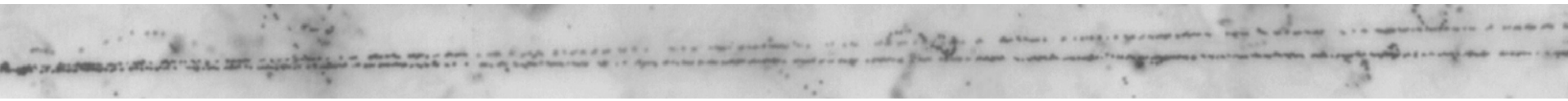


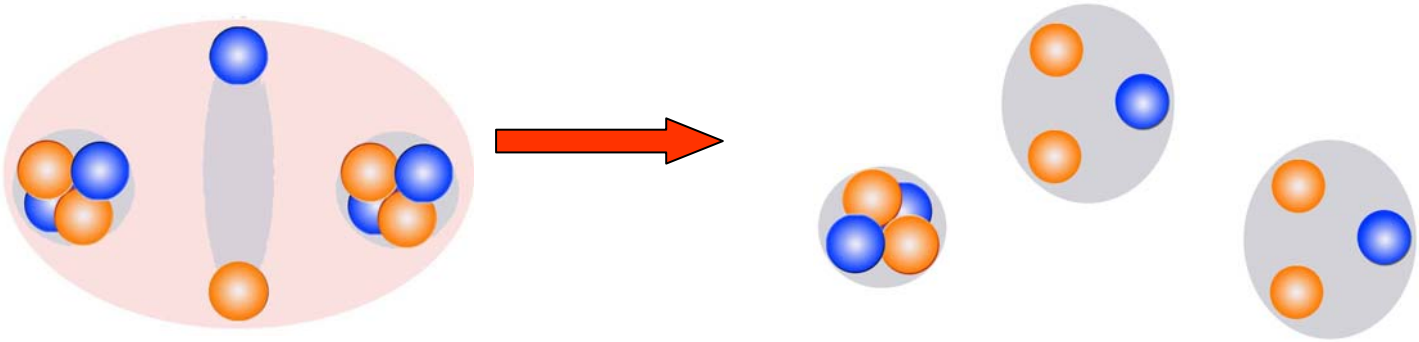
Зарядовые спектры со сцинтилляционного монитора при формировании вторичного пучка с кратностью *Zpr/Apr = 4/7* в реакции перезарядки $^{7}Li \rightarrow {}^{7}Be$.



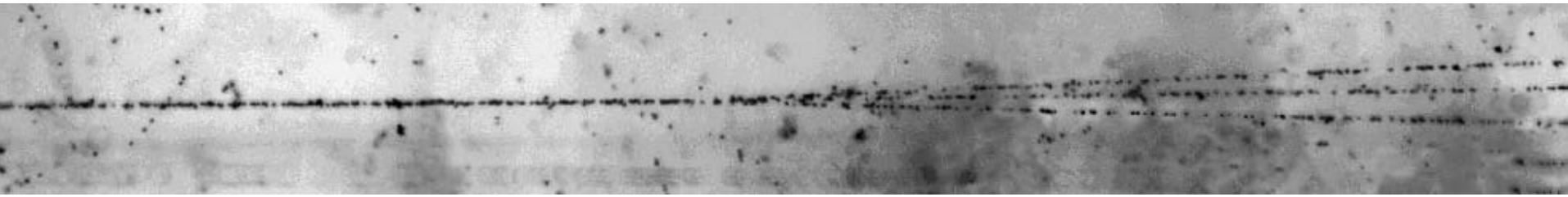
2.0 A GeV $^{11}B \rightarrow {}^{4}He + {}^{7}Be$

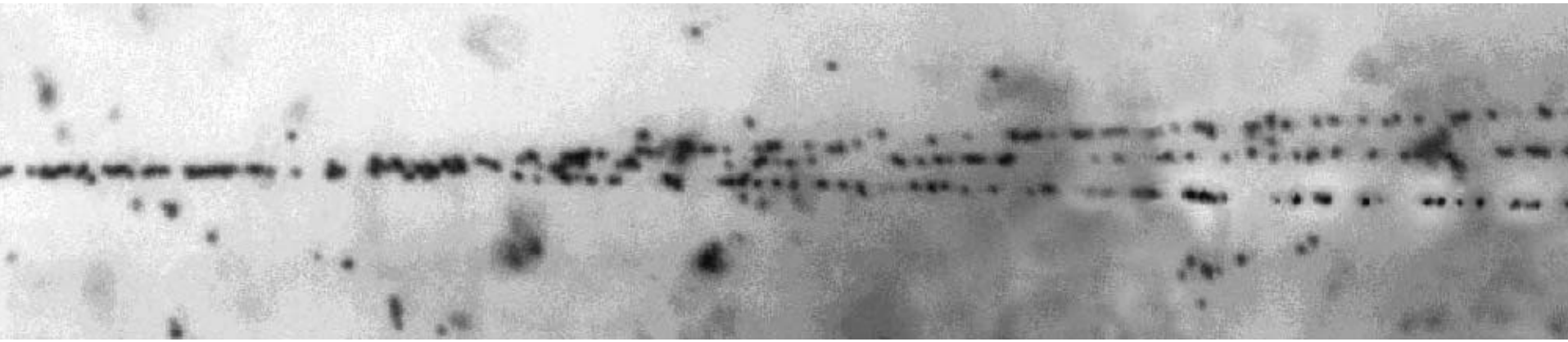






1.0 А ГэВ $^{10}B \rightarrow 2\,^{3}He + ^{4}He$

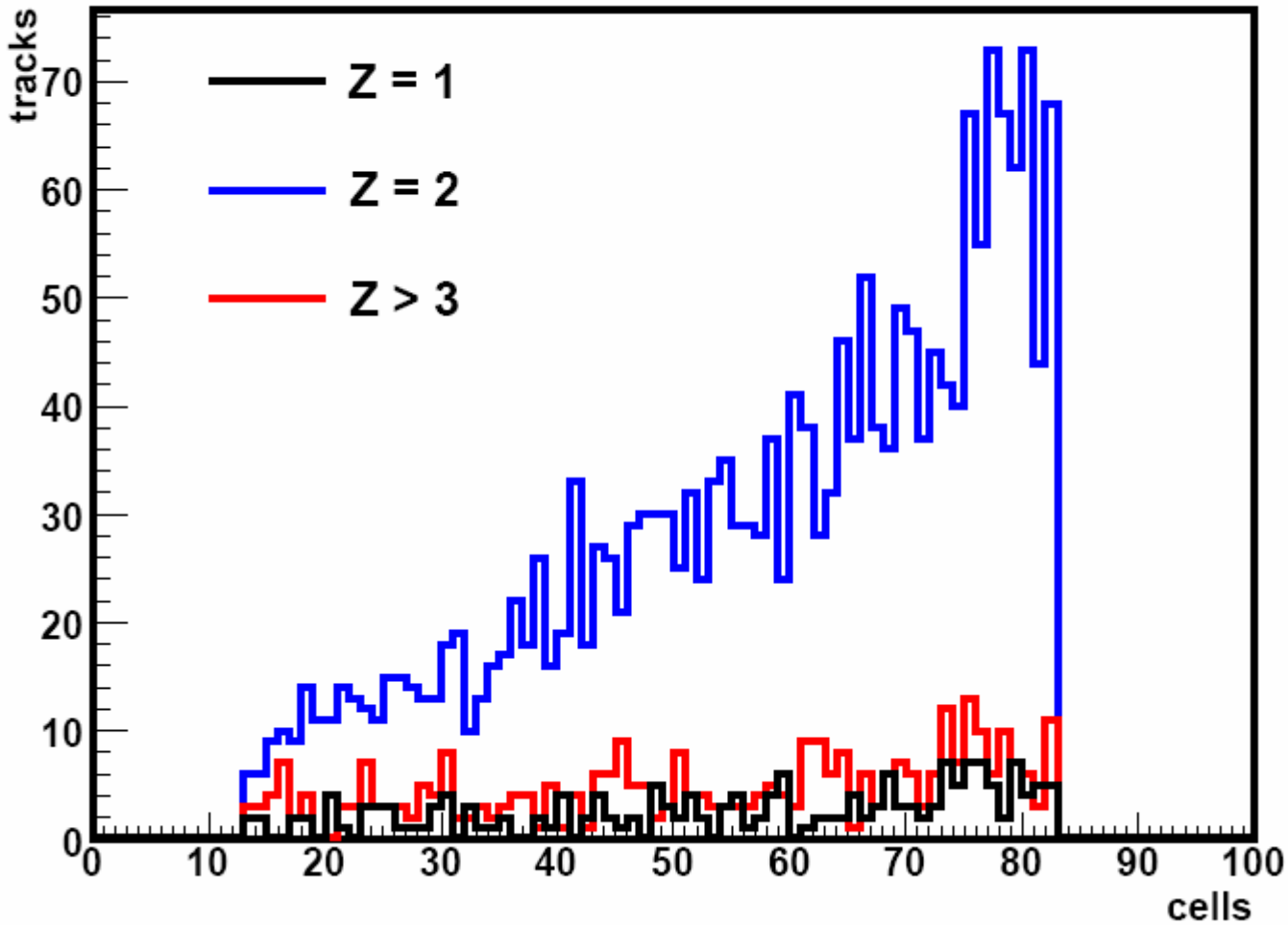




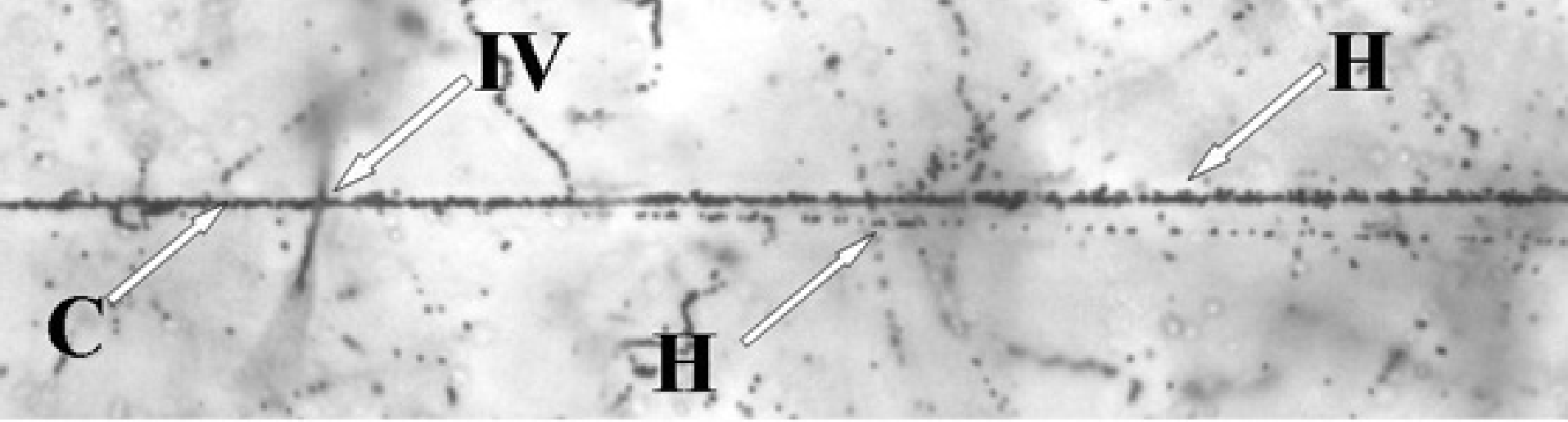
Распределение по зарядовой топологии взаимодействий наиболее периферического типа («белые» звезды) N_{ws} для первичных треков с зарядами $Z_{pr} = 4\text{-}7$, наблюдавшихся в эмульсии, облученной во вторичном пучке ядер ^{9}C.

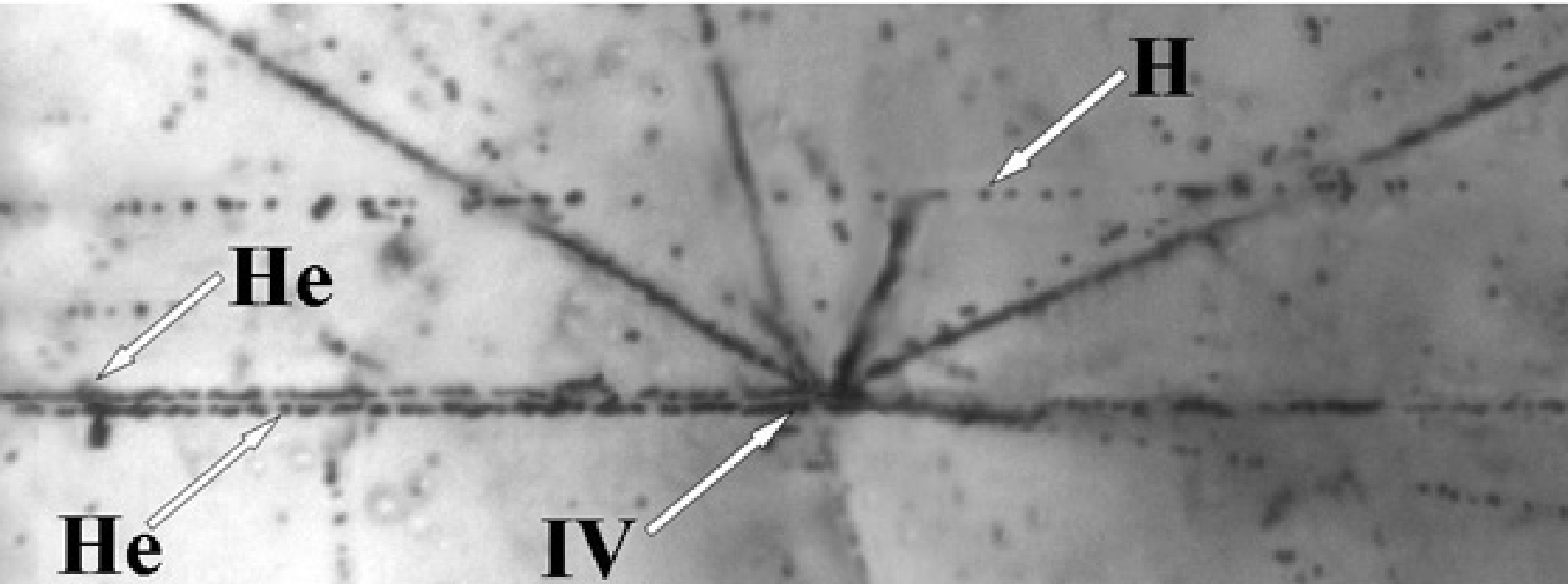
ΣZ_{fr}	Fragment Charge, Z_{fr}						N_{ws}
	6	5	4	3	2	1	
$Z_{pr} = 7$							
7	-	-	-	-	1	5	1
7	-	-	-	-	2	3	2
$Z_{pr} = 6$							
6	-	1	-	-	-	1	4
6	-	-	1	-	-	2	3
6	-	-	-	-	3	-	2
6	-	-	1	-	1	-	1
6	-	-	-	1	1	1	1
6	-	-	-	-	1	4	4
6	-	-	-	-	2	2	6
6	-	-	-	-	-	6	2
$Z_{pr} = 5$							
5	-	-	1	-	-	1	2
5	-	-	-	-	1	3	2
5	-	-	-	-	2	1	1
$Z_{pr} = 4$							
4	-	-	-	-	1	2	3

Накопление статистики взаимодействий ядер ^{9}C

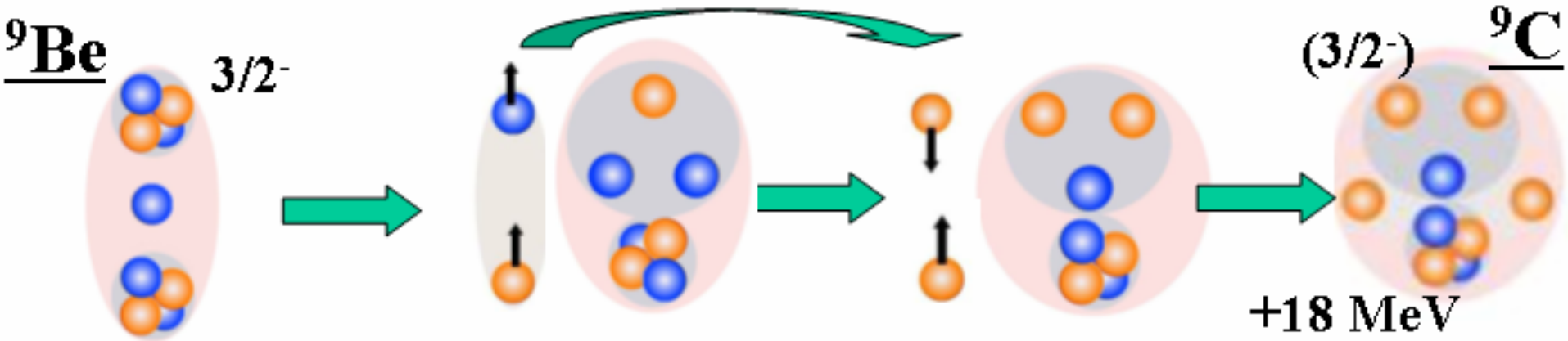


Горизонтальный профиль вторичного пучка на входе в эмульсионную стопку при настройке на отношение $Z_{pr} / A_{pr} = 2/3$. По оси абсцисс указаны номера ячеек соответствующие шагу разбиения *1* мм.

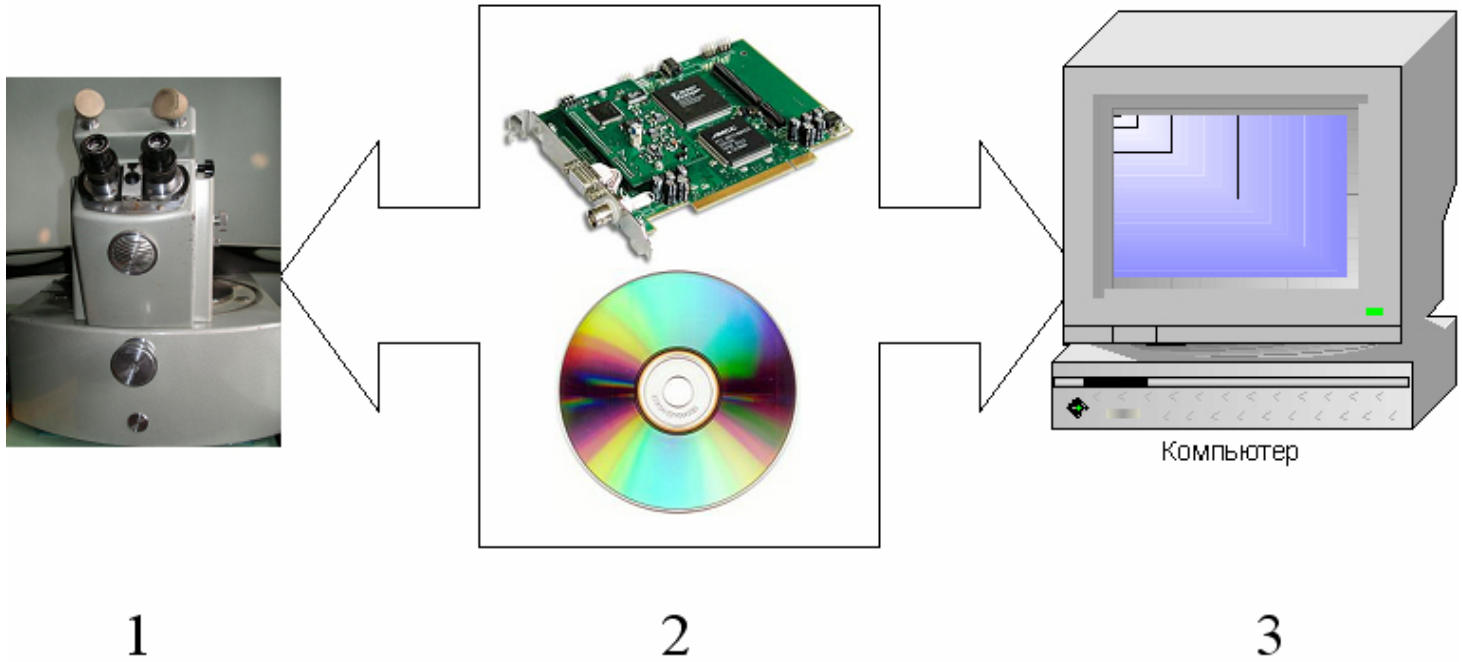




Фрагментация ядра ^{10}C с энергией *1.2 A* ГэВ в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии. На верхней микрофотографии видна вершина взаимодействия и струя фрагментов в узком угловом конусе. При смещении по направлению струи фрагментов (нижняя микрофотография) можно различить *2* фрагмента *He* и *2* фрагмента *H*.


^{9}Be
3/2$^-$
(3/2$^-$)
^{9}C
+18 MeV

Разработка заключается в создании связующего элемента (2) рисунок 2 включающего некоторую физическую реализацию АЦП (интерфейс шины PCI, или др.) и необходимое для работы программное обеспечение (драйверы, консольные утилиты, библиотеки для возможности интеграции измерительного комплекса и вычислительных процедур). В качестве датчиков перемещения винтов предполагается использовать преобразователи угловых перемещений BE 178A5H, BE178AH.



<u>Приблизительная оценка стоимости.</u> В зависимости от изготовителя и вариации требований стоимость изготовления такой системы может составлять приблизительно 360-400 тыс. руб.