



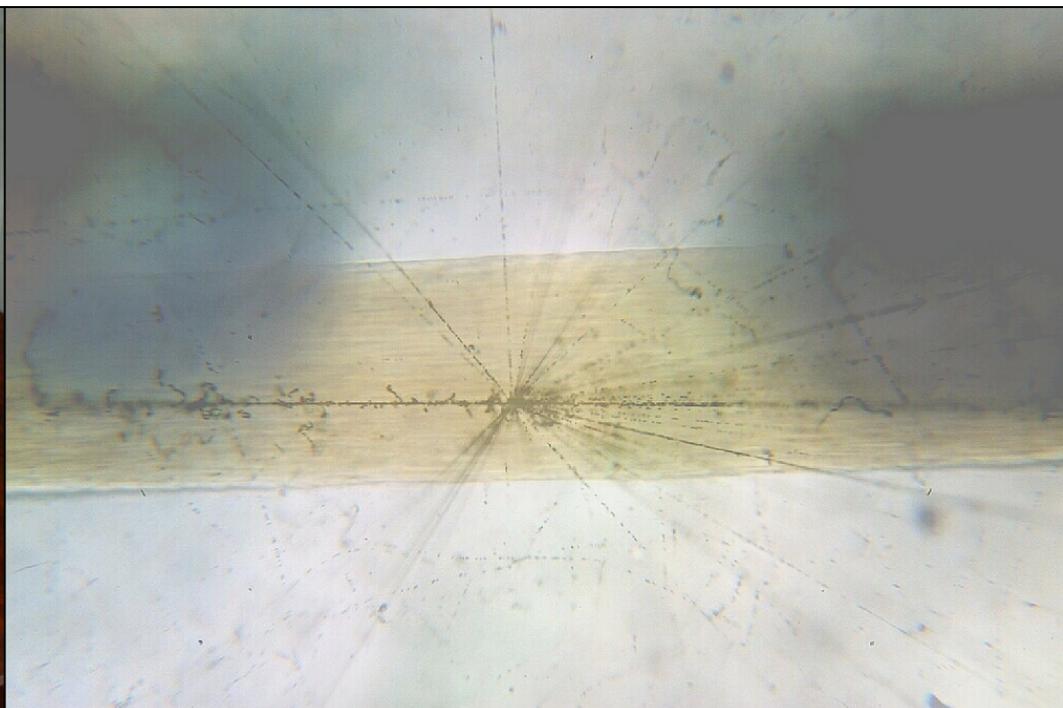
BEQUEREL  
PROJECT

Проект  
БЕККЕРЕЛЬ

Beryllium (Boron)  
Clustering  
Quest in  
Relativistic Multifragmentation

<http://becquerel.jinr.ru>

# Исследования с релятивистскими радиоактивными ядрами на нуклотроне ОИЯИ П. И. Зарубин



Несмотря на десятилетия интенсивного изучения, атомное ядро остается «лабораторией» квантовой физики все еще полной сюрпризов. Одной из проблем структуры ядра является изучение коллективных степеней свободы в возбужденных ядрах, в которых отдельные группы нуклонов ведут себя как составляющие кластеры.

Естественными кластерными компонентами являются малонуклонные системы, не имеющие возбужденных состояний ниже порога связи нуклонов - ядра  ${}^4\text{He}$  и  ${}^3\text{He}$ , а также дейтроны, тритоны.

Кластеризация нуклонов как структурная особенность отчетливо проявляется в возбужденных состояниях легких ядер, где возможное число кластерных конфигураций невелико. Легкие ядра являются источниками для генерации базовых конфигураций нуклонных кластеров.

Кластерная структура основных и возбужденных состояний легких ядер имеет несомненную и глубокую связь с процессами ядерной астрофизики.

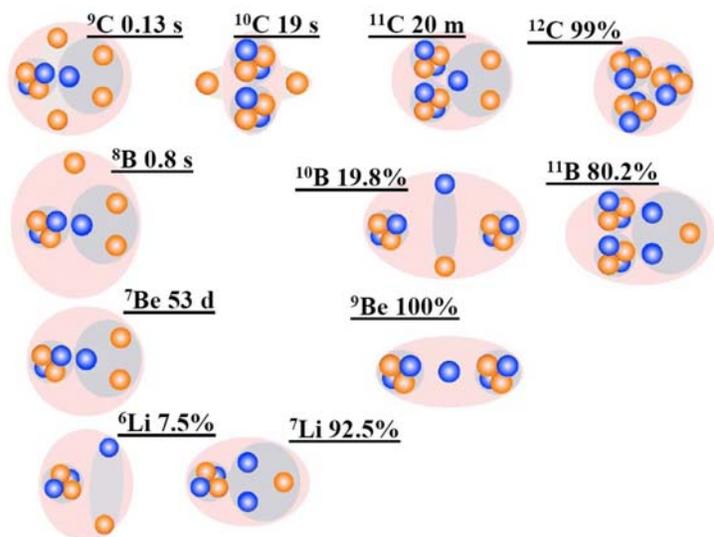


Рис. 1. Диаграмма кластерных степеней свободы в стабильных и нейтронодефицитных ядрах указаны распространенности изотопов или времена жизни; светлые кружки соответствуют протонам, темные - нейтронам; темным фоном выделены кластеры

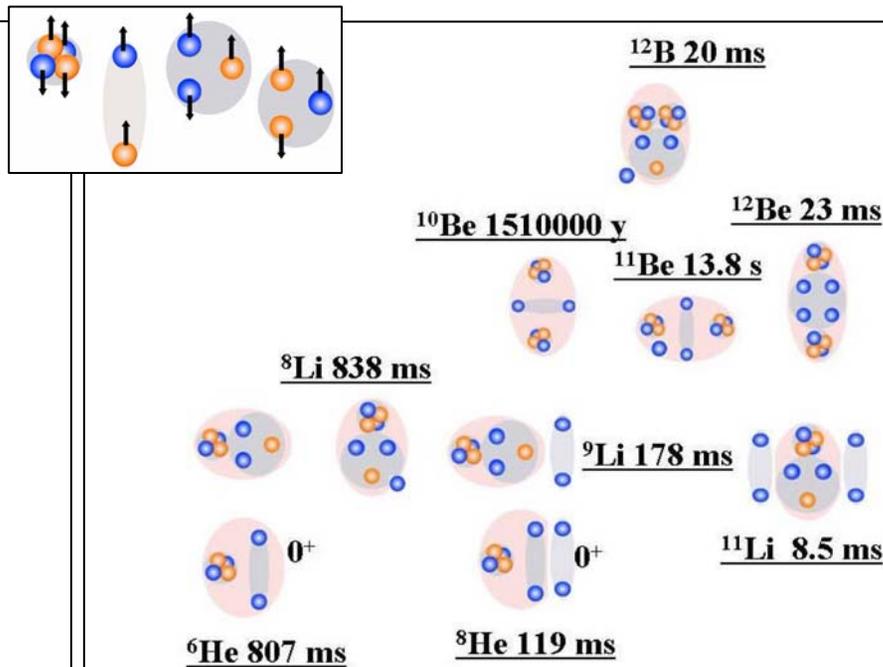
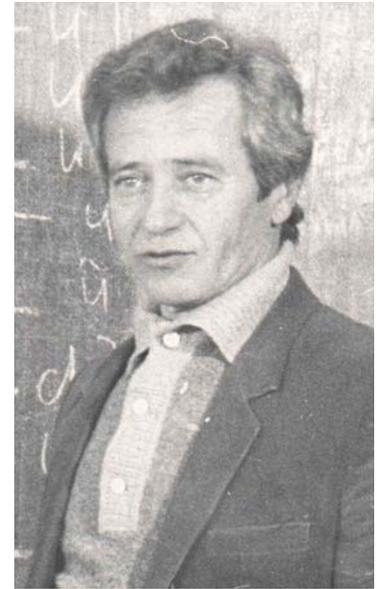
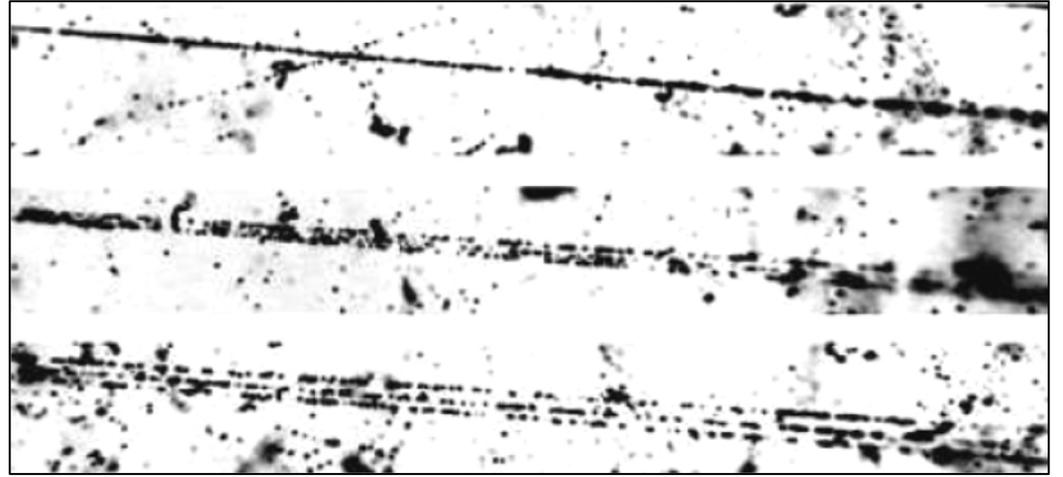
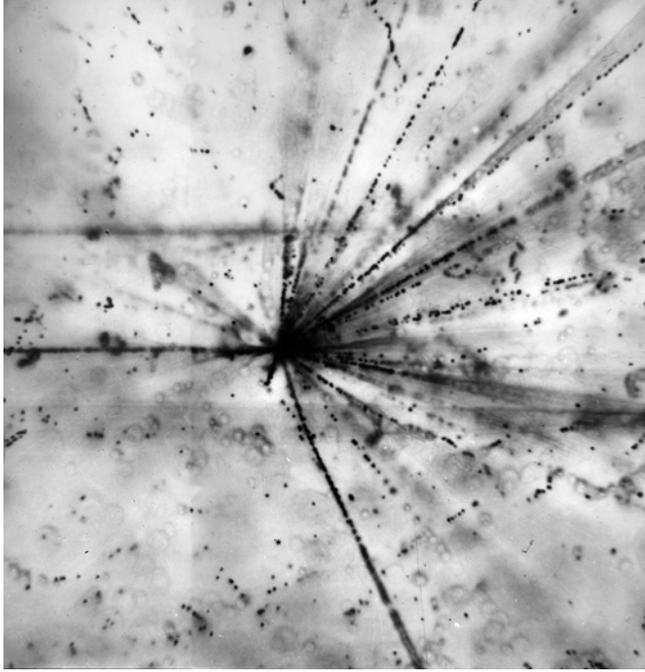


Рис. I.12. Диаграмма кластерных степеней свободы в легких нейтроноизбыточных ядрах



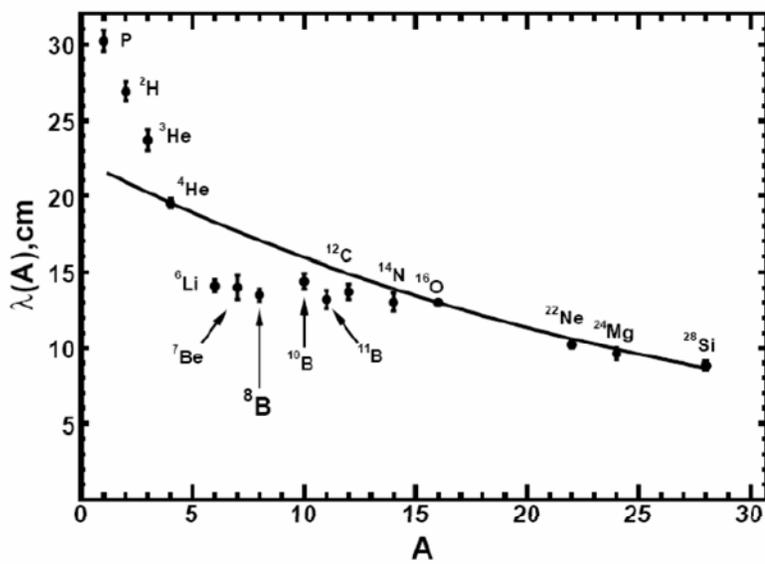


Рис. II.11 Данные по пробегам легких ядер в эмульсии, включая измерения настоящей работы (<sup>7</sup>Be, <sup>8</sup>B, <sup>10,11</sup>B, <sup>14</sup>N)

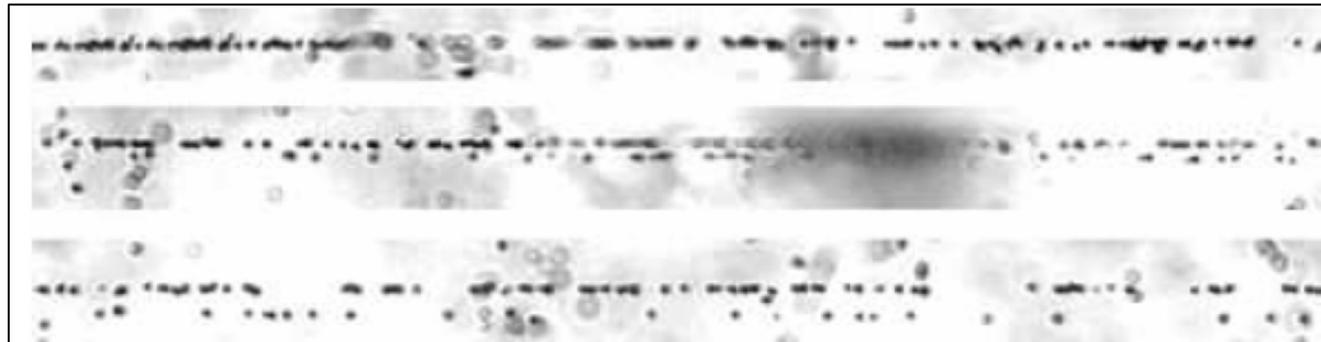
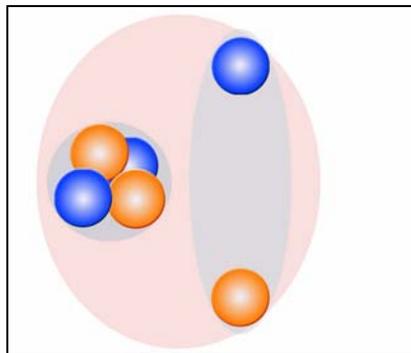
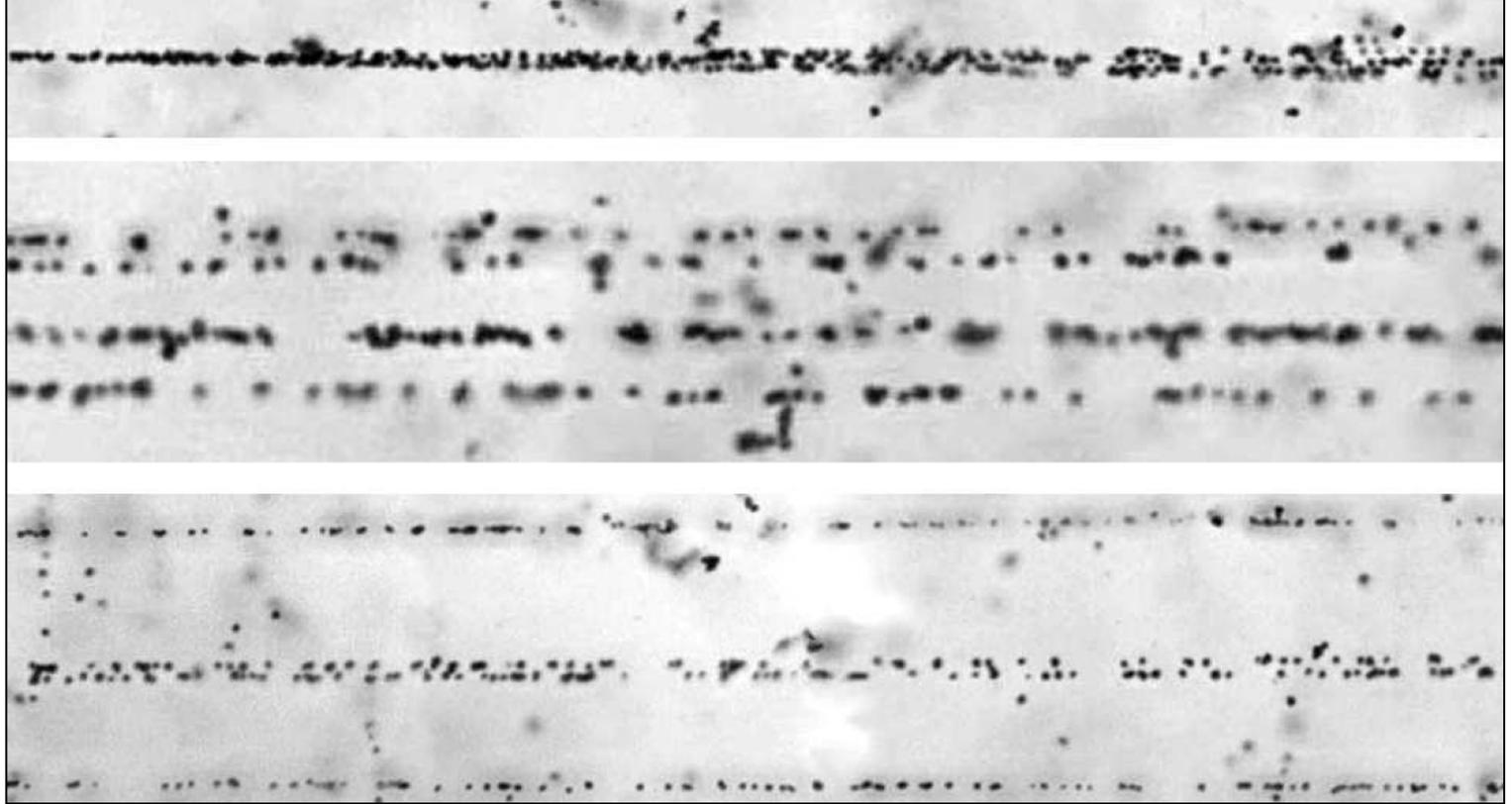


Рис II.12. Фрагментация релятивистского ядра <sup>6</sup>Li на одно- и двухзарядный фрагмент в эмульсии; на верхней фотографии видна вершина взаимодействия и узкая струя их двух фрагментов; при смещении вдоль струи фрагментов (нижние фотографии) отчетливо разделяются один однозарядный и один двухзарядный фрагменты

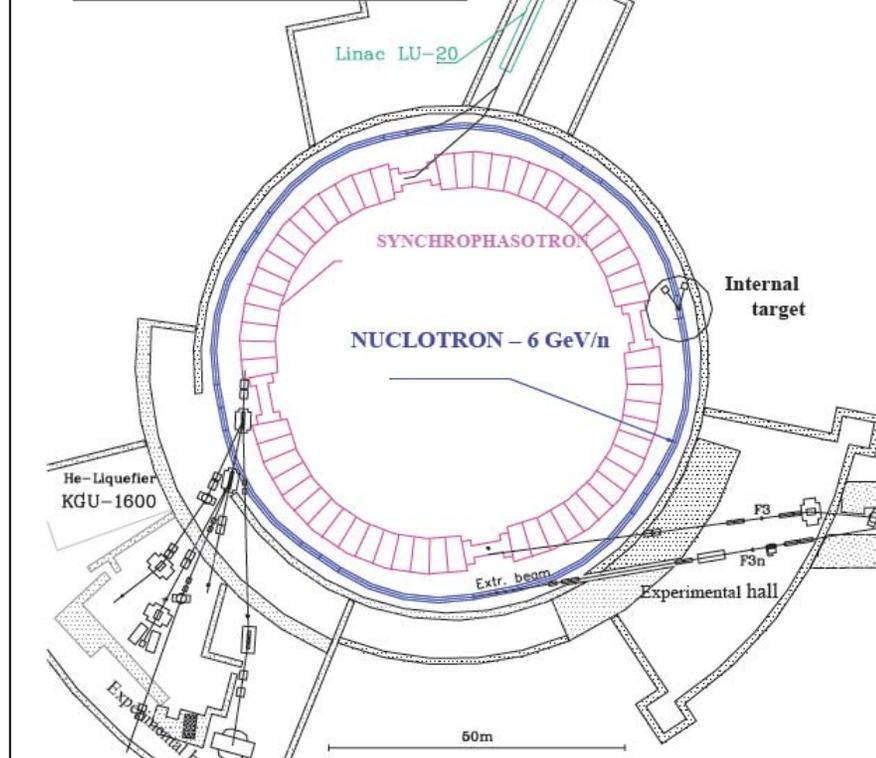


Качественно разнообразить кластерную спектроскопию позволяют пучки радиоактивных ядер. С развитием исследований по релятивистской ядерной физике на ускорительном комплексе синхрофазотрон - нуклотрон была создана целая система магнитооптических каналов транспортировки пучков. Эти каналы также могут служить для формирования вторичных пучков релятивистских радиоактивных ядер, позволяя расширить эксперименты по ядерной физике

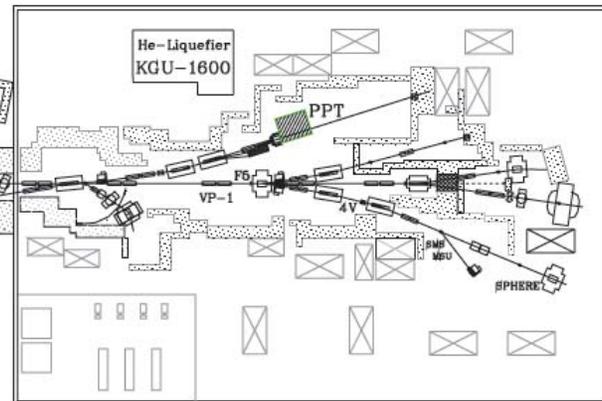
## Dubna: Relativistic Nuclei



Polaris –  $d^{\uparrow}$   
 EBIS – N, Ar, Fe ...  
 Laser – Li, B, C, F, Mg  
 ...  
 Duoplasmatron – p, d,  $\alpha$ ,  
 $^3\text{He}$

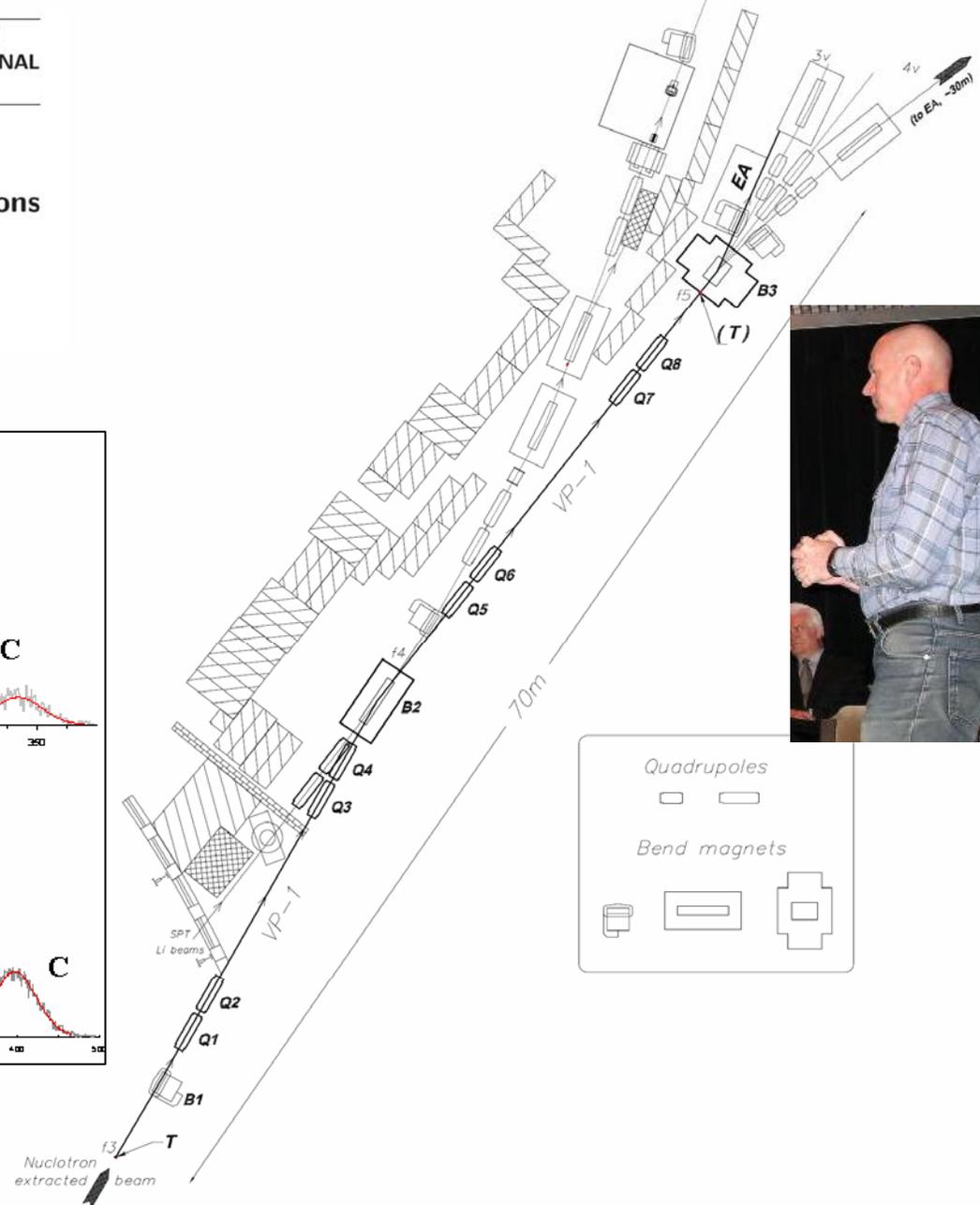
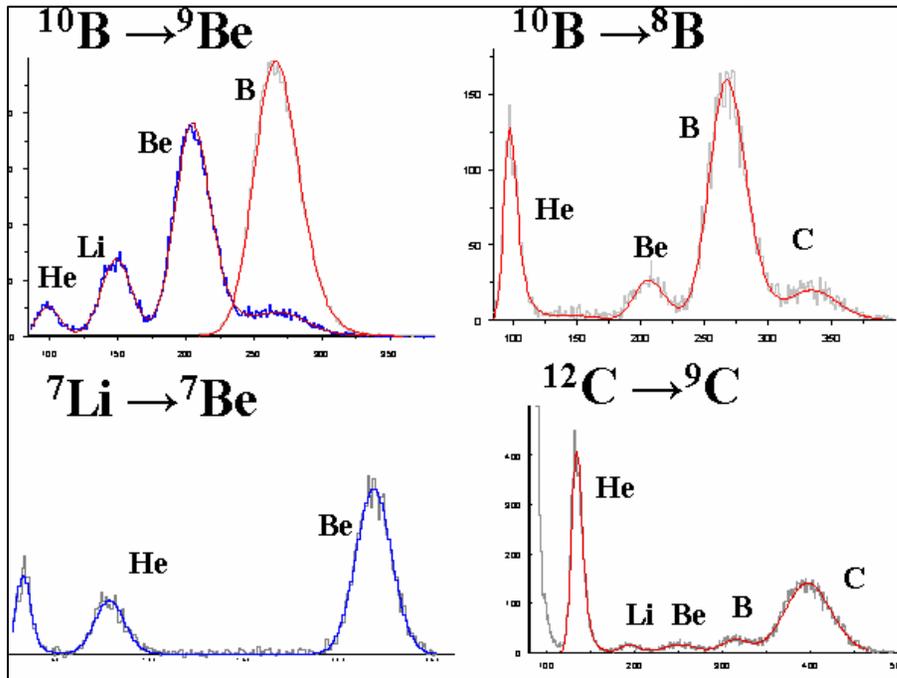


Experimental hall 205



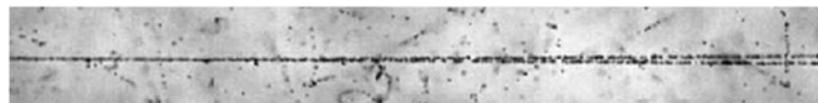
## Secondary nuclear fragment beams for investigations of relativistic fragmentation of light radioactive nuclei using nuclear photoemulsion at Nuclotron

P.A. Rukoyatkin<sup>a</sup>, L.N. Komolov, R.I. Kukushkina, V.N. Ramzhin, and P.I. Zarubin  
JINR, Veksler and Baldin Laboratory of High Energies, 141980 Dubna, Russia



**Fig. 1.** Scheme of an experimental area at Nuclotron extracted beam. The main part of the VP-1 beam line and the 4v line were applied to form secondary nuclear fragment beams for emulsion irradiations. T – stripping target positions. EA – emulsion assemblage positions.

«белая» звезда



звезда с протоном отдачи (g-частицей)



звезда с тяжелым осколком (b-частицей)

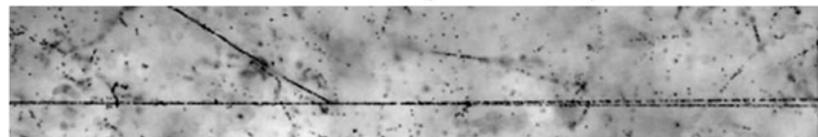
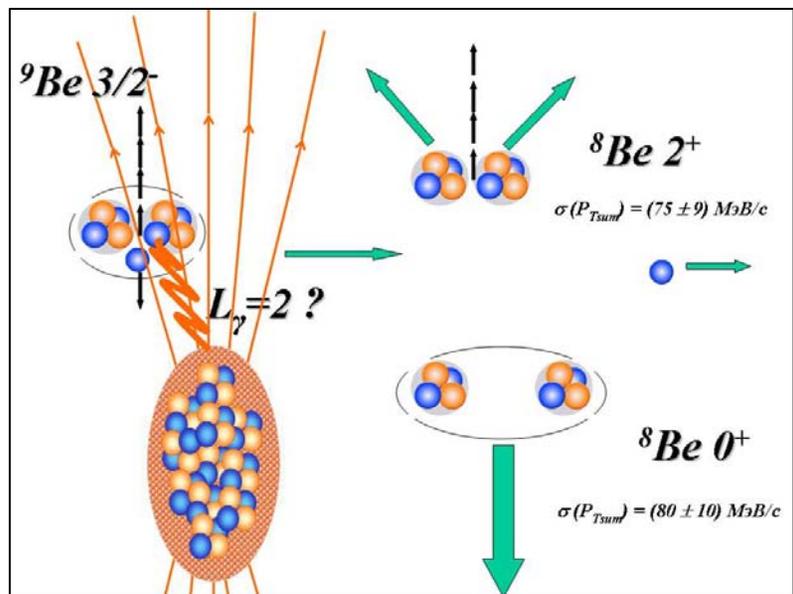


Рис. 5. Микрофотография событий фрагментации ядра  ${}^9\text{Be}$  с образованием двух  $\alpha$ -частиц в переднем конусе фрагментации



Около 81 % событий по величине угла разлета  $\Theta$  образуют две примерно равные группы – это «узкие»  $\alpha$ -пары в интервале  $0 < \Theta_{n(\text{arrow})} < 10.5$  мрад и «широкие» -  $15.0 < \Theta_{w(\text{ide})} < 45.0$  мрад. Образование «узких» пар  $\Theta_n$  сопоставляется распадам ядер  ${}^8\text{Be}$  из основного состояния  $0^+$ , а пар  $\Theta_w$  – из первого возбужденного состояния  $2^+$ . Доли событий  $\Theta_n$  и  $\Theta_w$  составляют  $0.56 \pm 0.04$  и  $0.44 \pm 0.04$ .

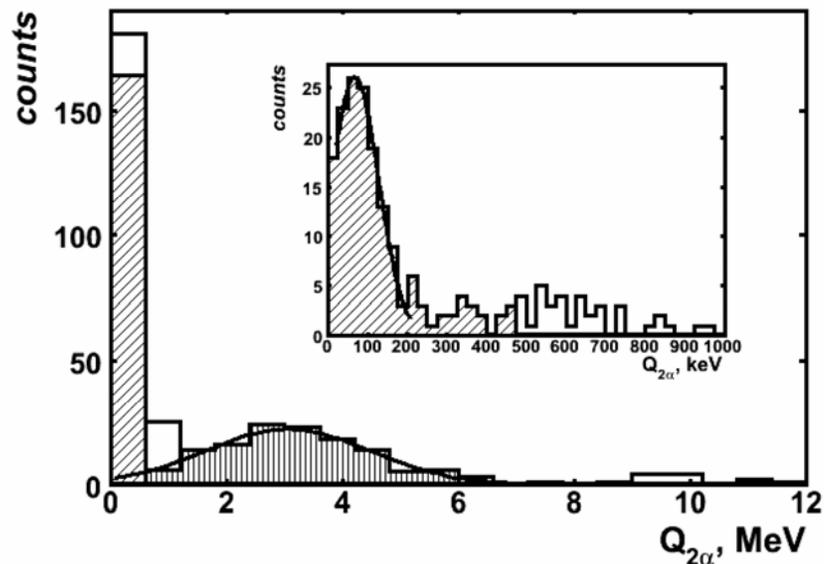
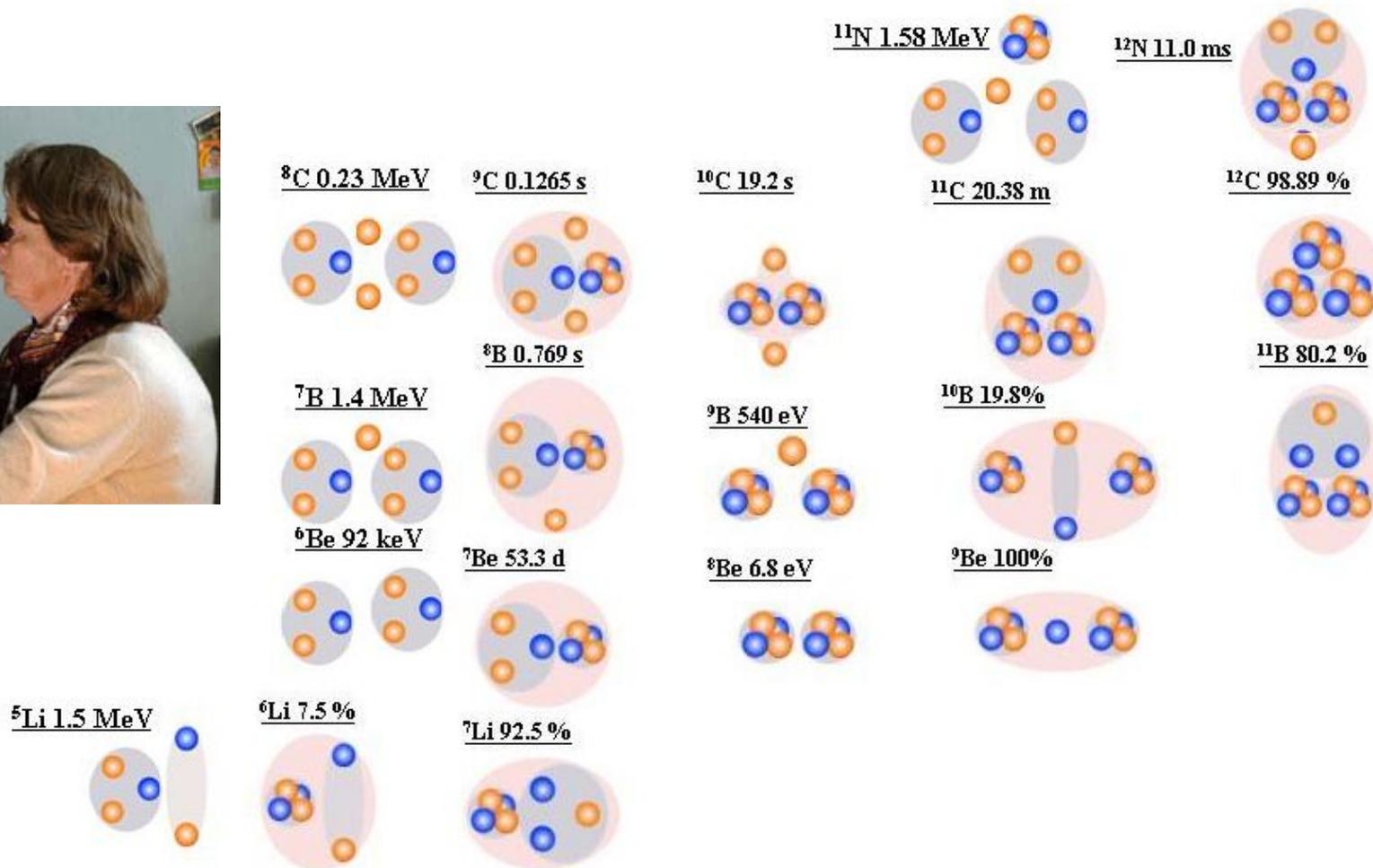
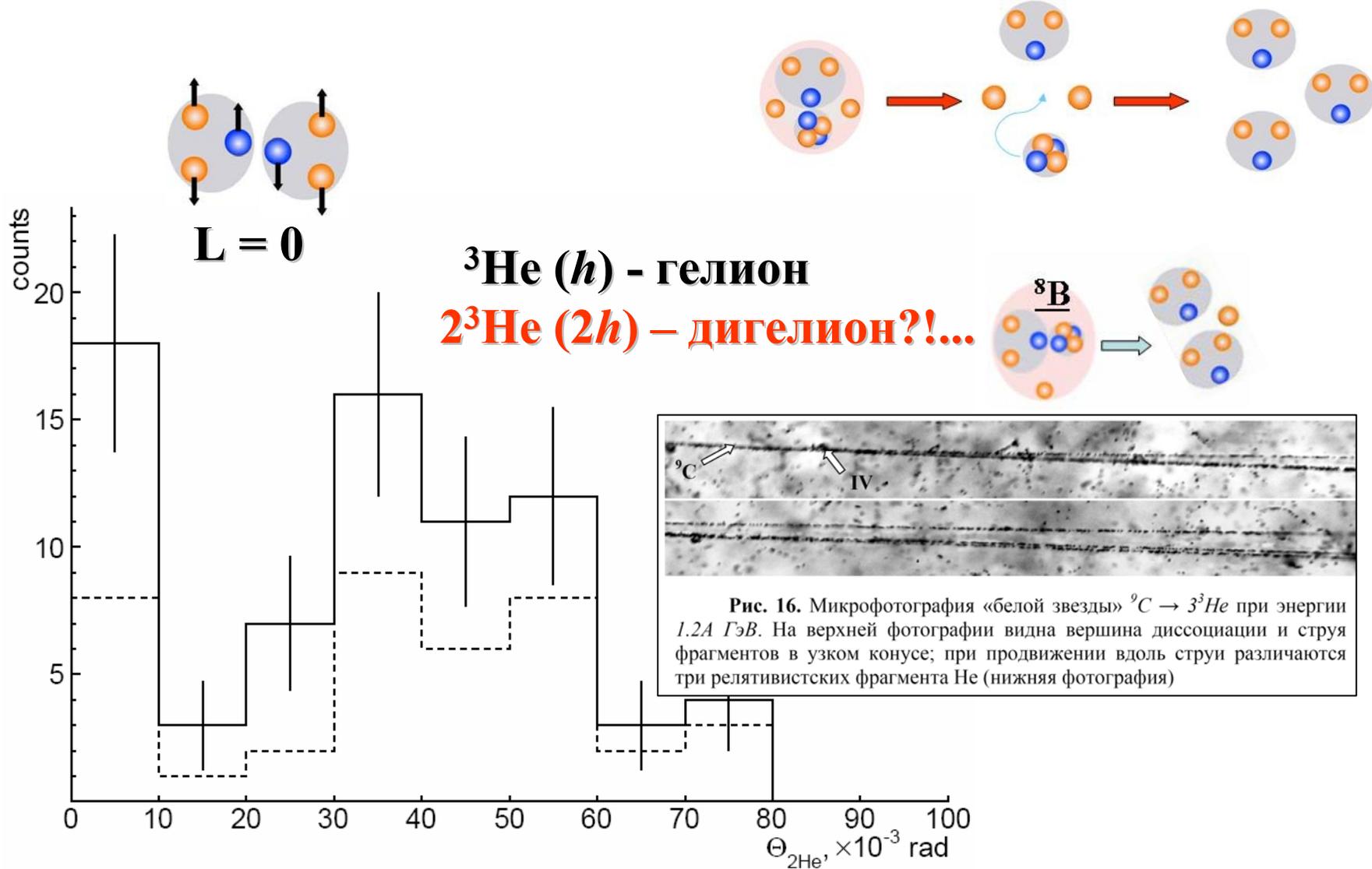


Рис. 7. Распределение событий фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  по величине энергии  $Q_{2\alpha}$  пары  $\alpha$ -частиц; наклонно заштрихованная гистограмма - события с углами разлета  $\Theta_n$ ; вертикально заштрихованная гистограмма - события с углами разлета  $\Theta_w$ ; на вставке – увеличенное распределение событий по  $Q_{2\alpha}$  в области углов  $\Theta_n$ ; сплошная гистограмма – суммарное распределение

Эти данные можно рассматривать как доказательство того, что в структуре ядра  ${}^9\text{Be}$  с высокой вероятностью имеется кор в виде двух состояний ядра  ${}^8\text{Be}$  и внешнего нейтрона. Полученные результаты согласуются с теоретическими работами по описанию структуры ядра  ${}^9\text{Be}$ , предполагающими присутствие в его основном состоянии состояния  $0^+$  и  $2^+$  ядра  ${}^8\text{Be}$  приблизительно с одинаковыми весами.



Благодаря значительной вероятности канала  $^9\text{C} \rightarrow 3^3\text{He}$  получено указание на резонанс в системе  $2^3\text{He}$  вблизи порога образования (аналог ядра  $^8\text{Be}$ ), заслуживающее изучения на большой статистике в событиях релятивистской диссоциации  $^7\text{Be} \rightarrow 2^3\text{He}$  с выбиванием нейтрона.



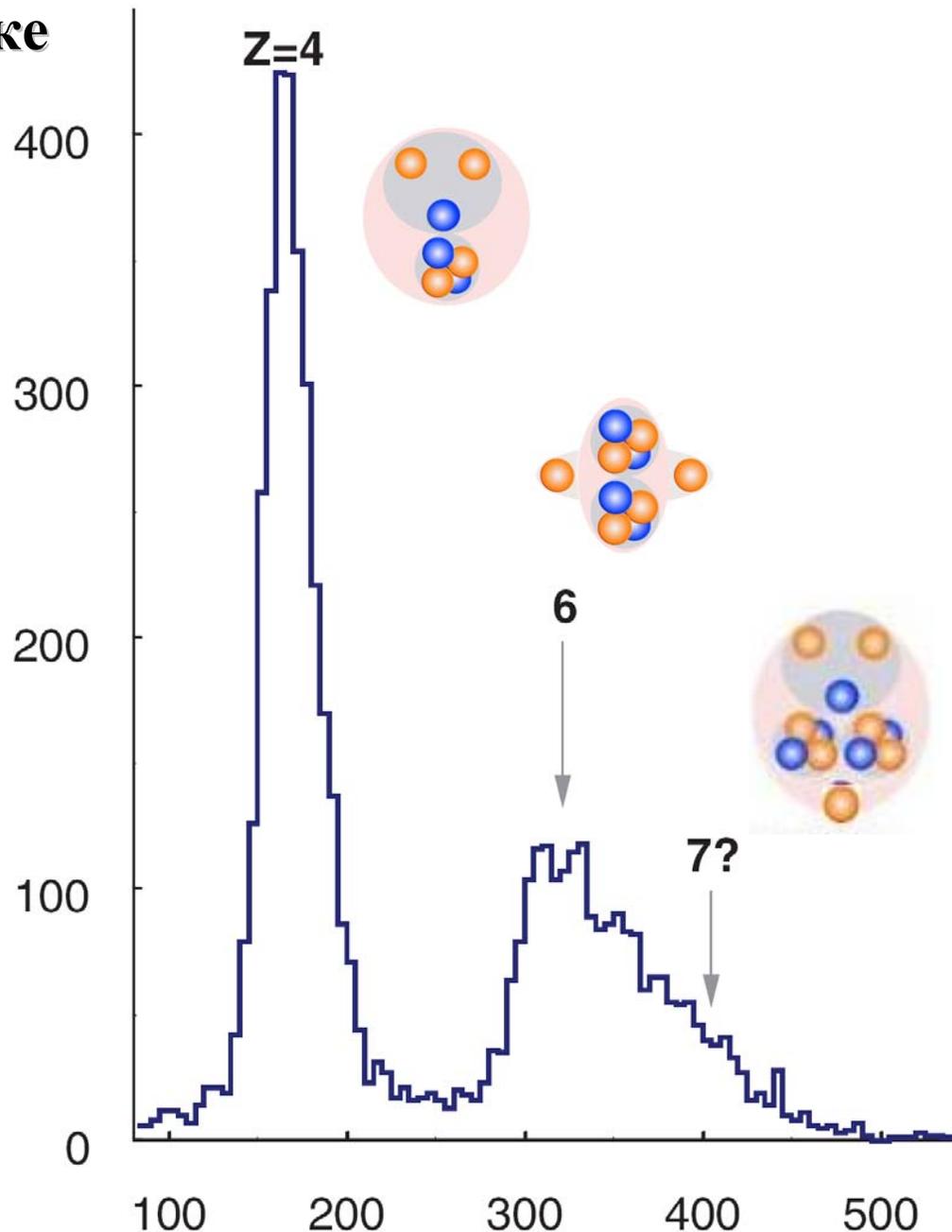
Суммарное распределение по парному углу  $\Theta_{2\text{He}}$ , между релятивистскими ядрами фрагментами He в событиях  ${}^8\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$  с образованием фрагментов ядра мишени или мезонов и в белых звездах  ${}^9\text{C} \rightarrow 3{}^3\text{He}$ ; вклад  ${}^9\text{C}$  белых звезд указан пунктиром.

# Облучения в смешанном пучке ядер $^{12}\text{N}$ , $^{10}\text{C}$ и $^7\text{Be}$

Генерация ядер  $^{12}\text{N}$  и  $^{10}\text{C}$  возможна в реакциях перезарядки и фрагментации ускоренных ядер  $^{12}\text{C}$ . Для ядер  $^{10}\text{C}$  и  $^{12}\text{N}$  отношений зарядов к весам  $Z_{\text{pr}}/A_{\text{pr}}$  отличаются всего на 3%, а импульсный акseptанс сепарирующего канала нуклотрона 2 - 3 %, поэтому они образуют пучковый «коктейль».

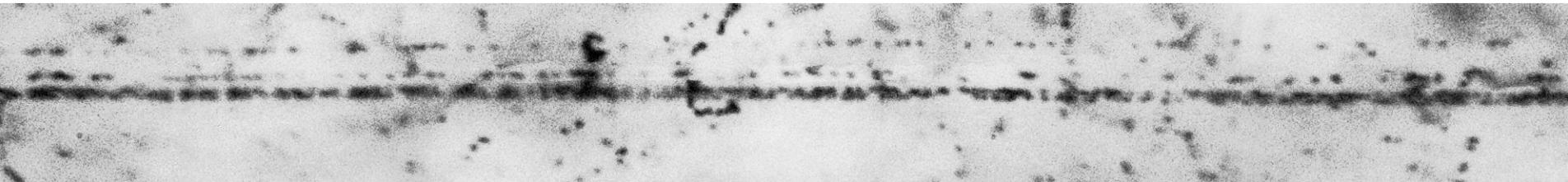
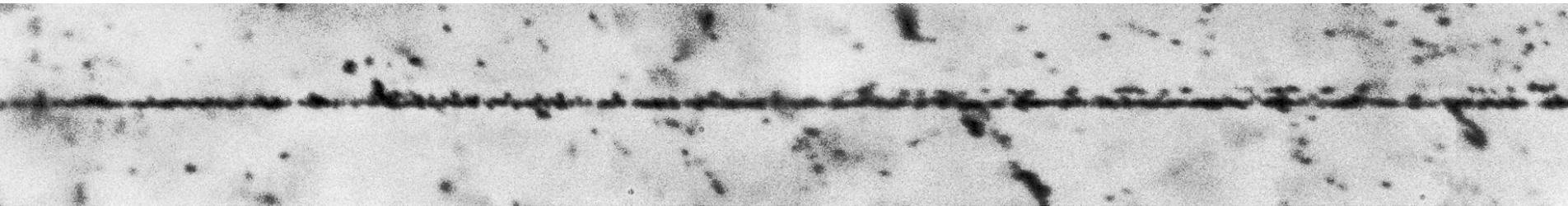
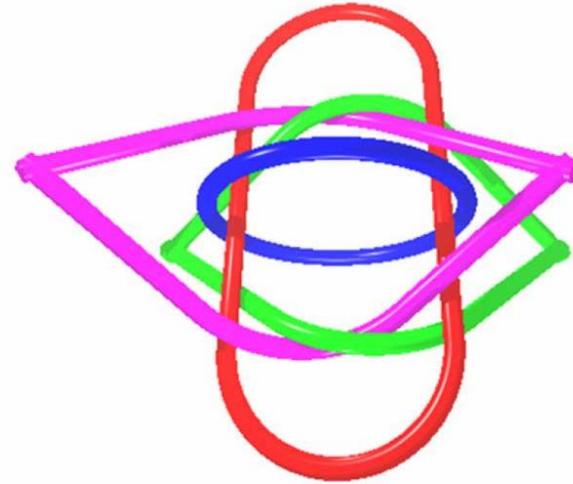
Присутствуют и ядра  $^7\text{Be}$ , у которых отличие по  $Z_{\text{pr}}/A_{\text{pr}}$  от  $^{12}\text{N}$  только 2%. Для соседних ядер  $^8\text{B}$ ,  $^9\text{C}$  и  $^{11}\text{C}$  отличие по  $Z_{\text{pr}}/A_{\text{pr}}$  от  $^{12}\text{N}$  оказывается около 10%, что обуславливает их подавление при облучении эмульсии.

Звёзды	"Белые звёзды"	длина
6144	516	924.7 м

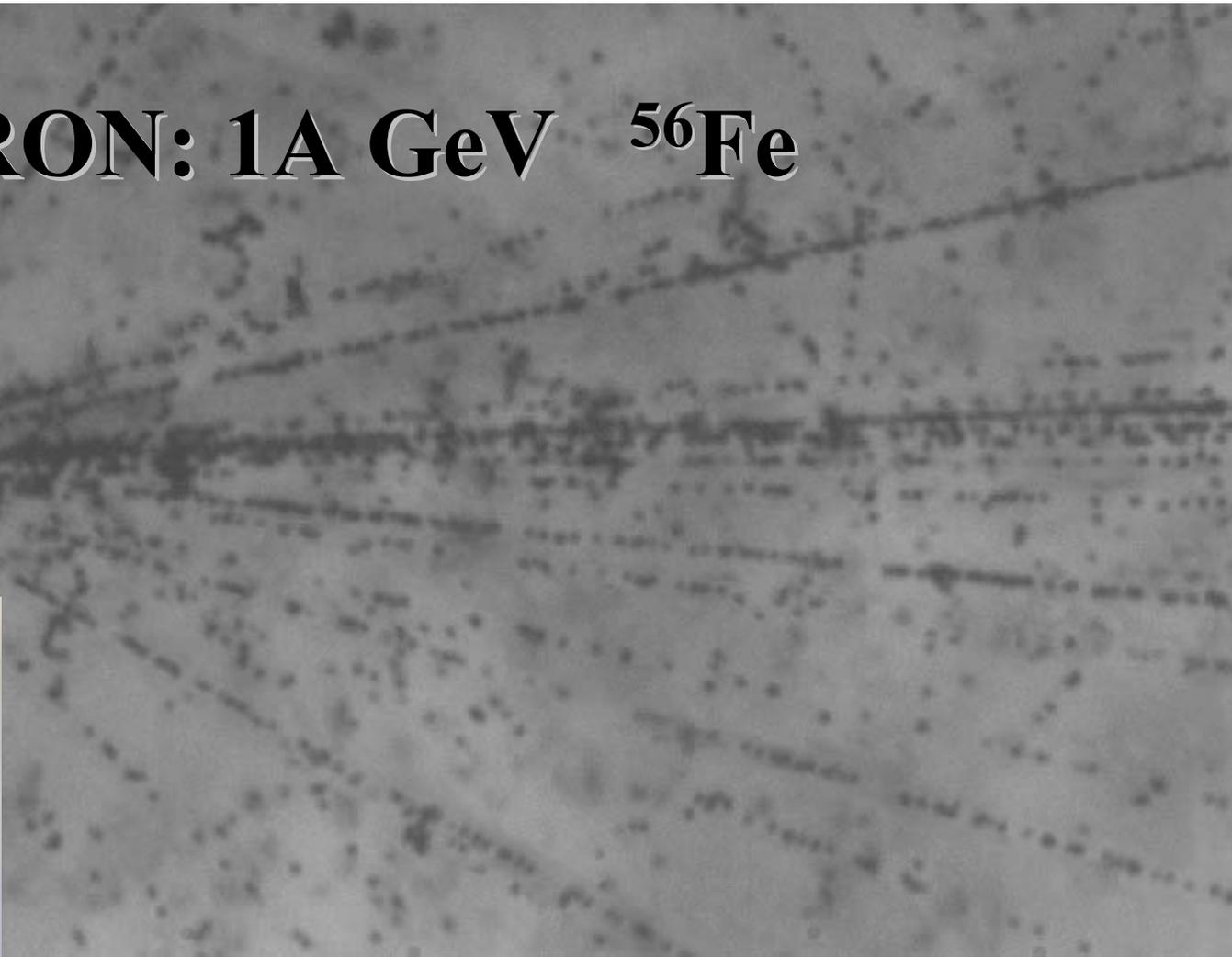


Ядро  $^{10}\text{C}$  является обладает супербороминовскими свойствами, поскольку удаление из него одного из кластеров в структуре  $2\alpha + 2p$  (порог 3.8 МэВ) ведет к несвязанному состоянию.

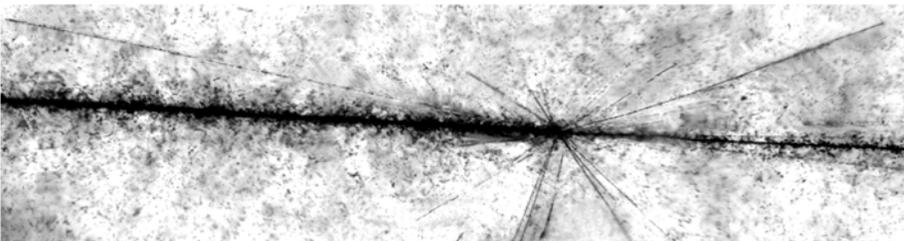
		$^9\text{C}$	$^{10}\text{C}$	$^{11}\text{C}$	$^{12}\text{C}$
		$^8\text{B}$	$^9\text{B}$	$^{10}\text{B}$	
	$^6\text{Be}$	$^7\text{Be}$	$^8\text{Be}$	$^9\text{Be}$	
	$^5\text{Li}$	$^6\text{Li}$	$^7\text{Li}$	$^8\text{Li}$	
$^3\text{He}$	$^4\text{He}$	$^5\text{He}$	$^6\text{He}$		



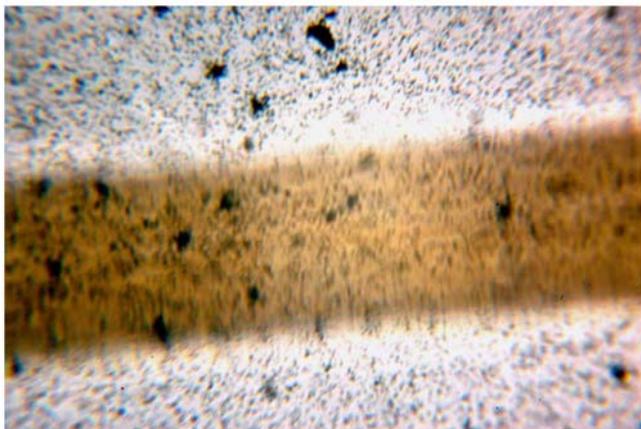
# NUCLOTRON: 1A GeV $^{56}\text{Fe}$



# Облучение на нуклотроне ядрами Хе



**Рис. 1.** Макрофотография при 60-кратном увеличении взаимодействия ядра Хе в эмульсии с образованием высокозарядного фрагмента



**Рис. 4.** Макрофотографии при 90-кратном увеличении эмульсионной пленки, облученной в пучке ядер Хе, в области наибольшей плотности пучка; приведена суперпозиция с фотографией волоса

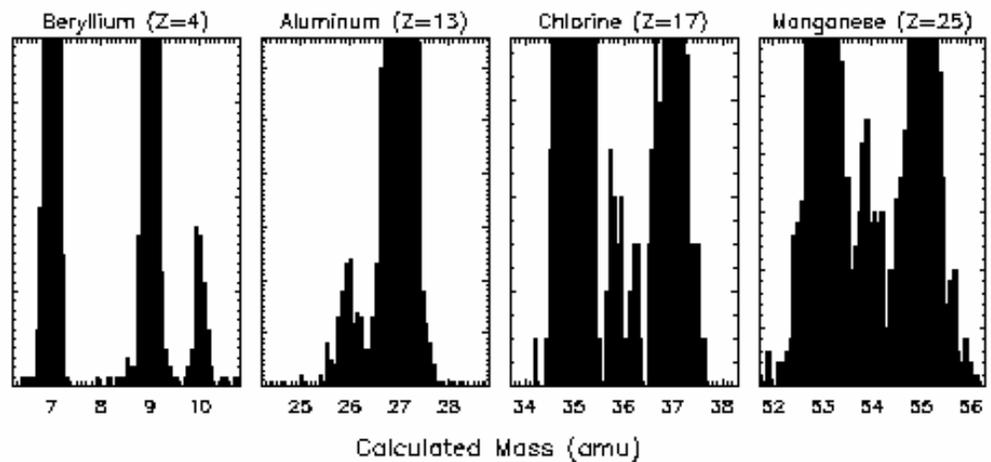
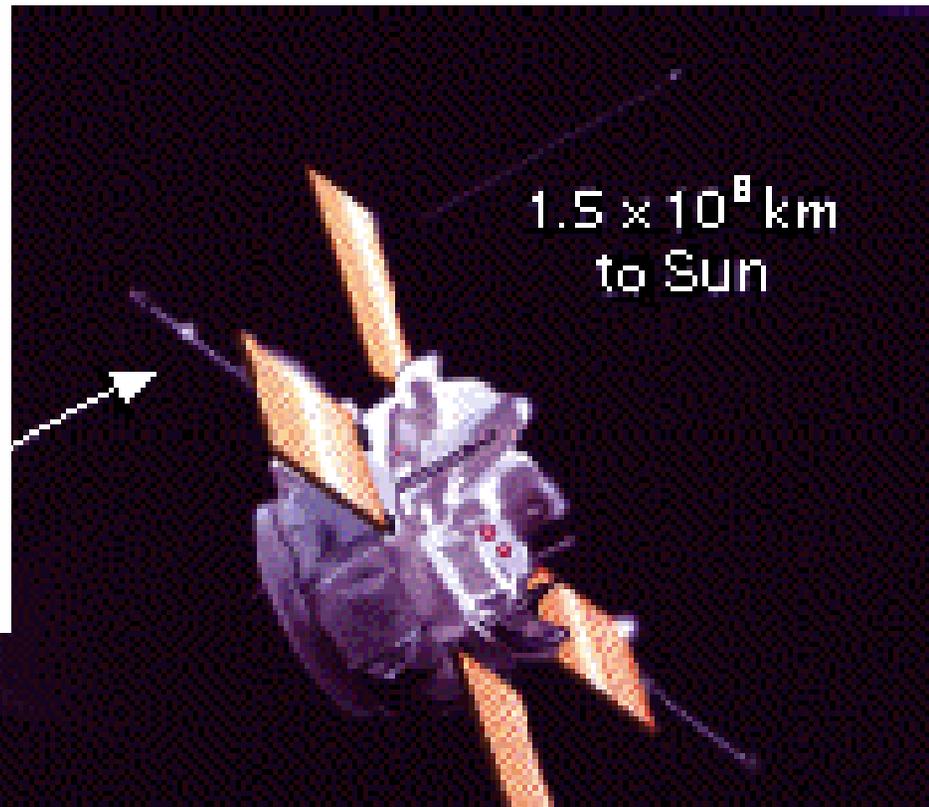
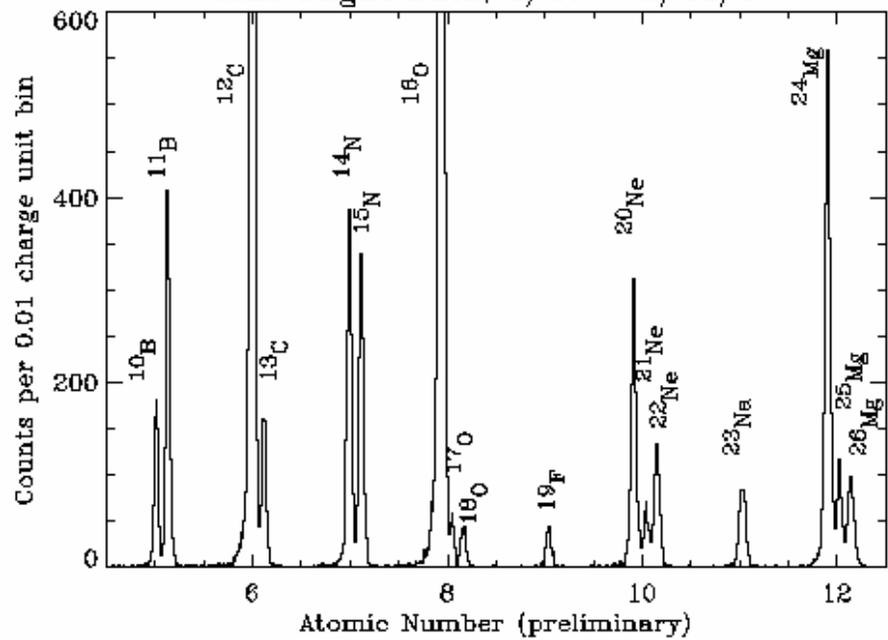


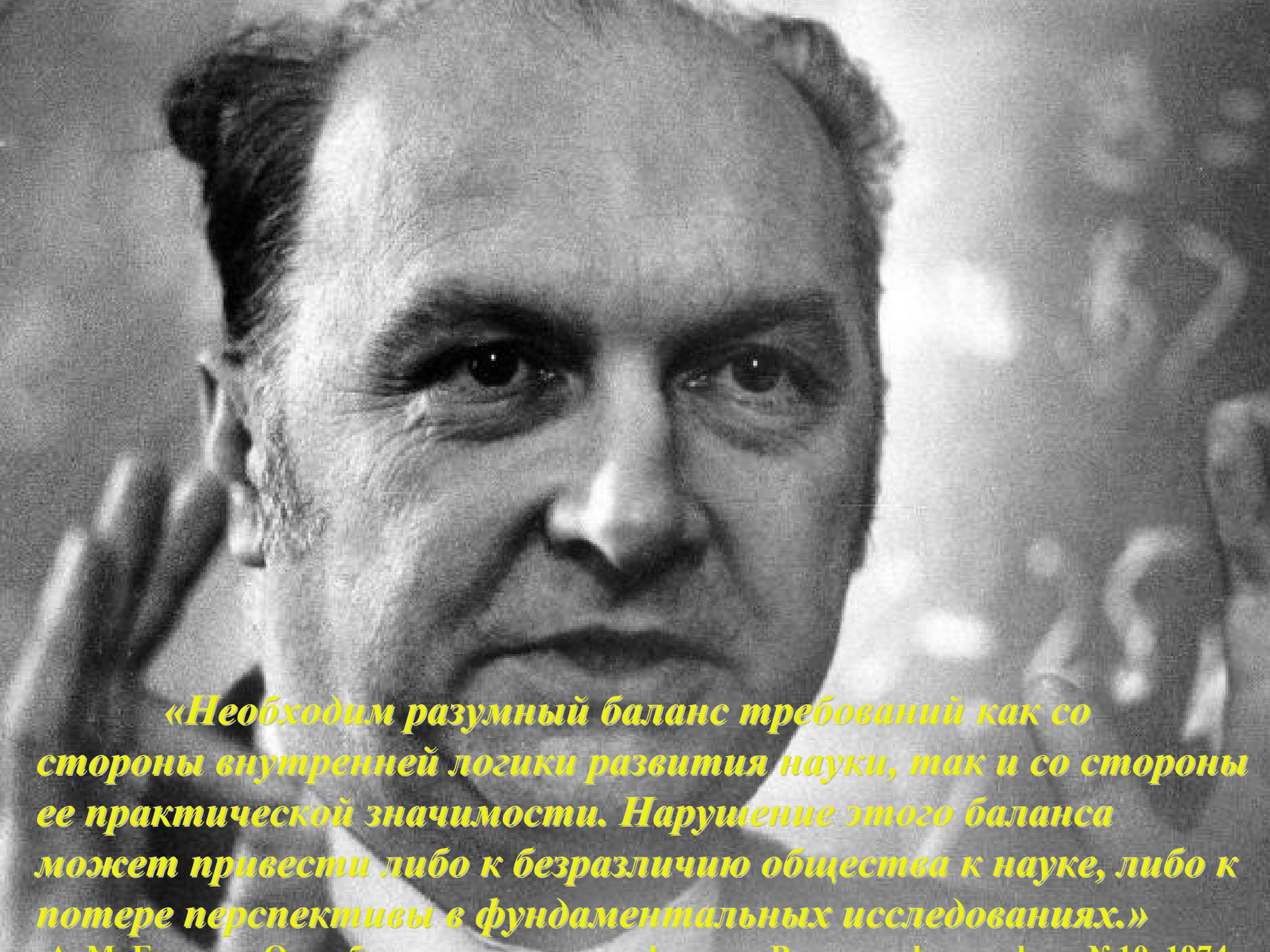
**Рис. 8.** Автоматизированный комплекс ПАВИКОМ-2 (ФИАН; создан на основе микроскопа МПЭ-11 с управляемым столиком, видеокамерой и платой захвата изображения); на экране – изображение участка облученной эмульсионной пленки





CRIS Flight Data, 8/27 - 9/11/97





*«Необходим разумный баланс требований как со стороны внутренней логики развития науки, так и со стороны ее практической значимости. Нарушение этого баланса может привести либо к безразличию общества к науке, либо к потере перспектив в фундаментальных исследованиях.»*